



## Water wave reflection over shear currents and dredged multi-arrayed trenches

Cho, Yong-Sik<sup>a\*</sup> · Lee, Kwang-Jun<sup>b</sup> · Lee, Jun-Whan<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, VA, USA

Paper number: 20-068

Received: 20 July 2020; Revised: 1 September 2020; Accepted: 1 September 2020

### Abstract

Understanding the wave characteristics near the outlet of coastal power plants for cooling water in the vicinity of the dredged areas is critically important for the construction and operation of the plants. By Employing the eigenfunction expansion method, in this study, we analyzed the reflection of monochromatic water waves over (1) shear currents near the outlet and (2) multi-arrayed trenches representing dredged areas. We firstly optimized the number of grids expressing shear currents and the number of evanescent modes based on a convergence test. We then analyzed the sensitivity of the reflection coefficients depending on (1) magnitude of shear currents, (2) width of shear currents, (3) a distance between adjacent trenches, and (4) a number of trenches. The results showed that the reflection coefficient was more sensitive to the number of trenches and the distance between trenches than the velocity of shear currents and the width of shear currents. We also found that even the effect of shear currents is relatively small, the effect is not negligible in a relative water depth from shallow to near shallow water waves ( $0.01 < kh \leq 0.70$ ).

**Keywords:** Eigenfunction expansion method, Diffraction, Shear currents, Reflection coefficient

## 외부 흐름과 준설된 다열 함몰지형에 의한 파랑의 반사

조용식<sup>a\*</sup> · 이광준<sup>b</sup> · 이준환<sup>c</sup>

<sup>a</sup>한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, <sup>b</sup>한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정,

<sup>c</sup>버지니아 폴리테크닉 주립 대학교 건설환경공학과 박사과정

### 요 지

임해발전소의 냉각수 배출구 인근과 준설된 해역을 전파하는 파랑의 특성을 이해하는 것은 임해발전소 건설과 운영에 매우 중요하다. 본 연구에서는 (1) 배출구 주변 외부 흐름과 (2) 준설된 해저지형을 나타내는 함몰지형에 의한 파랑의 반사율을 고유함수전개법을 이용하여 해석하였다. 먼저, 외부흐름을 나타내기 위한 격자수와 소멸파수의 최적값을 수렴 테스트를 통해 산정하였다. 그리고 <sup>1</sup>)외부흐름의 속도, <sup>2</sup>)외부흐름의 폭, <sup>3</sup>)함몰지형 간 거리, <sup>4</sup>)함몰지형의 개수에 따른 반사율 변화 정도를 분석하였다. 분석결과, 함몰지형 수와 거리에 따른 반사율이 외부흐름의 속도와 폭에 따른 반사율보다 더 민감한 결과를 보였다. 또한, 외부흐름의 영향이 작을지라도 천해와 천해부근 상대수심 ( $0.01 < kh \leq 0.70$ )에서는 외부흐름의 영향을 무시할 수 없다는 것을 확인하였다.

**핵심용어:** 고유함수전개법, 회절, 외부 흐름, 반사율

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-2220-0393

E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr (Y.-S. Cho)

### 1. 서론

심해에서 바람에 의해 생성된 파랑은 해안선 부근으로 이동하면서 해저지형의 변화, 외부 흐름(shear currents) 변화 및 인공적인 구조물과의 상호작용, 파랑과 파랑의 상호작용 등으로 인하여 다양한 물리적 현상을 나타낸다. 최근, 우리나라는 연료와 냉각수의 원활한 공급체계 연계를 위하여 해안가에 원자력발전소 및 화력발전소를 건설하였거나 건설하고 있다. 대부분의 임해발전소(coastal power plants)는 상당량의 바닷물을 냉각수로 사용한 후 이를 다시 주변에 방류하게 되며, 방류되는 외부 흐름이 다양한 해저지형을 지날 때 입사하는 파랑의 반사와 전달 등에 영향을 끼칠 수 있다. 특히, 가파른 경사의 함몰지형(steep-shaped trenches)은 선박의 항로로 이용하기 위해 준설한 지역은 물론 임해발전소 등에서 전력 송출을 위한 해저케이블 설치를 위한 함몰지역 준설과 온배수의 해저방류를 위한 배수로 준설 등의 이유로 존재한다. 따라서, 외부 흐름과 가파른 경사의 함몰지형을 모두 고려한 파랑 해석은 임해발전소의 안전한 건설과 원활한 운영을 위해서 필요하다.

고유함수전개법(eigenfunction expansion method)은 수치기법을 이용하지 않고 선형 파랑 이론에 기초하여 해석해를 구하는 방법으로 수치모델보다 상대적으로 빠른 연산이 가능하여 많은 파랑 연구 분야에 활용되었다(Kirby and Dalrymple, 1983). 예를 들어, 수심이 변하는 다양한 지형 위를 통과하는 파랑해석(Liu *et al.*, 1992; Cho and Lee, 1998; Kang *et al.*, 2007), 불투과성 퇴적층에 의한 다열 수중구조물의 성능 평가(Lee *et al.*, 2014), 정현파형 지형(Liu and Cho, 1993; Cho and Lee, 2000) 또는 다열 사다리꼴 수중 방파제(Jeon and Cho, 2006), 다열 멤브레인과 수중 방파제(Ding *et al.*, 2019)와 같이 규칙적인 해저지형을 지나는 파랑의 파장이 해저지형 파장의 두 배가 될 때 발생하는 Bragg 반사에 관한 연구에 활용되었다. 해저지형에 의한 파랑 회절뿐만 아니라 외부 흐름에 의한 파랑도 고유함수전개법으로 해석 가능하여 많은 연구에 활용되었다(Belibassakis, 2007; Kirby *et al.*, 1987). McKee, 2006)는 측면으로 입사하는 외부흐름의 영향력을 분석하였으며, Lee and Cho, 2013)은 외부흐름 형상에 따라 파랑의 반사율이 달라질 수 있음을 보였으며, Lee *et al.* (2013)은 정현파형 지형과 외부흐름을 동시에 고려한 Bragg 반사를 분석하였다. Lee *et al.* (2015)은 함몰지형 경사와 함몰지형 내 흐르는 외부흐름에 의한 파랑을 분석하였으며, 외부흐름과 다열 함몰지형에 의해 Bragg 반사와 유사한 효과가 나타날 수 있음을 보였다. 그러나 기존 연구에서는 임해발전소 운영에 중요한 외부흐름의 특성(Froude 수와 폭)과 함몰지형의 특성(개수와 함몰지형간 거리)을 동시에 고려하지 못하였다. 본 연구의 목적은 기

존 연구에서 고려하지 못한 임해발전소 주변에서 발생 가능한 외부 흐름과 다열 함몰지형을 고유함수전개법을 이용하여 경사지게 입사하는 파랑에 대하여 반사율을 분석하는 것이다.

### 2. 고유함수전개법

고유함수전개법은 수심과 외부 흐름의 변화에 따른 입사파의 회절을 해석하는 방법 중 하나로 4단계를 통해 입사하는 파랑의 반사율과 통과율을 산정할 수 있다.

첫 번째 단계는 외부흐름과 해저 지형을 이상화하여 구간을 설정하는 것이다. 본 연구에서는 준설 지역을 함몰지형의 결합 형태로 이상화 하였으며, 임해발전소의 냉각수 배출구 인근의 외부 흐름을 삼각형 형상으로 가정하였다(Fig. 1). 삼각형 분포를 적절하게 고려하기 위해 Lee and Cho (2013)가 제안한 방법을 따라 외부 흐름을  $m'$  개의 구간으로 나누는 방법을 사용하였으며  $Fr_{max}$  는 외부 흐름의 최대 상대유속을 나타내는 Froude 수이다. 여기에  $N$ 개의 함몰지형을 나타내기 위하여 수심이 변하는 구간  $2N$ 개를 추가하여 총 구간  $m(=m'+2N)$  개의 구간을 설정하였다. 해저지형의 수심과 외부 흐름의 변화는  $x$  축 방향으로 변화하나  $y$  축 방향으로 일정하다고 가정한다. 상대수심은 천해 및 중간수심 영역에 포함되는 범위 ( $0 < k_1 h_1 \leq 1.4$ )로 한정하였으며, 입사하는 파랑은  $\theta = 30^\circ$  로 경사지게 입사한다. 본 연구에서는  $Fr_{max} = 0.2, b_1/h_1 = 10, d_1/h_1 = b_2/h_1 = d_2/h_1 = 10, h_2/h_1 = 2, N=2$  를 기본 값으로 설정하였다.

두 번째 단계는 구간  $m$  에서 왼쪽 및 오른쪽으로 진행되는 진행파 성분과 소멸파 성분의 속도포텐셜을 다음과 같이 나타내는 것이다.

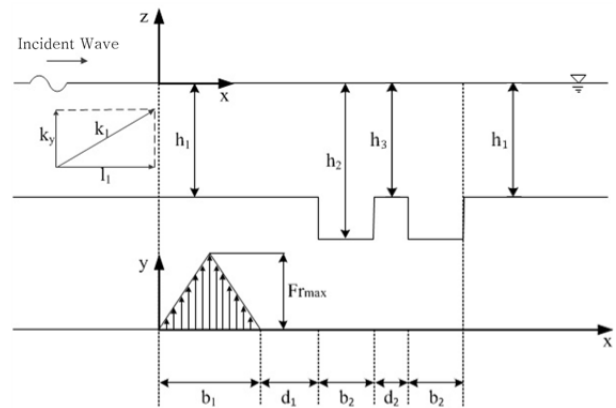


Fig. 1. A schematic sketch of shear currents and dredged multi-trenches

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

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

Eqs. (1) and (2)에서  $A_m^L, B_{m,n}^L, A_m^R$  및  $B_{m,n}^R$  은 모두 복소수로 표현되는 진폭함수이며, 결정되어야 할 미지수이다. 아래첨자  $m$  과  $n$  은 각각 구간과 소멸파 성분의 수를 의미하며,  $\theta$  는 입사파의 입사각, 위첨자  $L$  과  $R$  은 각각 왼쪽과 오른쪽으로 진행되는 성분을 의미한다. 또한,  $l_m$  과  $\lambda_{m,n}$  은 각각  $x$  축 방향으로 진행되는 파랑성분 중 진행파와 소멸파 성분의 파수 (wave number)를 나타내며, 다음과 같이 계산된다.

$$l_m = [k_m^2 - k_y^2]^{1/2}, \quad \lambda_{m,n} = [K_{m,n}^2 + k_y^2]^{1/2} \quad (3)$$

Eq. (3)에서  $k_y$  는  $y$  축 방향의 파수이며, 파수  $k_m$  과  $K_{m,n}$  은 분산방정식으로부터 계산할 수 있다. 외부 흐름이 있을 경우 다음과 같이 고유 각진동수 (intrinsic angular frequency)를 정의할 수 있다.

$$\sigma_m = \omega - V_m k_y \quad (4)$$

Eq. (4)에서  $\sigma_m$  는  $m$  영역에서 파랑의 고유 각진동수,  $\omega$  는 각진동수,  $V_m$  은  $Fr \times \sqrt{gh}$  로 계산될 수 있는 외부 흐름의 속도를 나타내며, 분산방정식은 다음과 같다.

$$\sigma_m^2 = g k_m \tanh k_m h_m, \quad \sigma_m^2 = -g K_{m,n} \tan K_{m,n} h_m \quad (5)$$

세 번째 단계는 Eqs. (1) and (2)를 각 구간에서 해석하기 위한 두 구간이 만나는 경계에서 두 개의 접합조건 (matching conditions)을 정의하는 것이다. 첫 번째 접합조건은  $x$  축 방향의 연속방정식으로 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sigma_m} \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} = \frac{1}{\sigma_{m+1}} \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x}, \quad x = x_m, \quad -h_m \leq z \leq 0 \quad (6)$$

두 번째 접합조건은 압력의 연속성으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m \Phi_m = \sigma_{m+1} \Phi_{m+1}, \quad x = x_m, \quad -h_m \leq z \leq 0 \quad (7)$$

마지막 단계는 Eqs. (1) and (2)를 접합조건 (6)과 (7)에 대입하여 선형행렬식 계산하는 것으로 고유함수전개법은 삼각함수와 쌍곡선함수의 직교성(orthogonality)을 이용하여 선형행렬식의 미지수를 획기적으로 줄여 미지수인  $A_m^L, B_{m,n}^L, A_m^R$  및  $B_{m,n}^R$  을 계산할 수 있다. 계산된 미지수로부터 반사율( $R$ )과 통과율( $T$ )은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R = |A_1^L| \quad (8)$$

$$T = \frac{\sigma_j}{\sigma_1} \frac{\cosh k_j h_j}{\cosh k_1 h_1} |A_j^R| \quad (9)$$

Eqs. (8) and (9)에서 아래첨자 1은 영역 1, 아래첨자  $j$  는 구간  $j$  를 의미한다. 고유함수전개법을 이용하여 계산된 반사율과 통과율의 정확도는 에너지 보존식을 이용하여 검증할 수 있다(Cho and Lee, 1998).

$$R^2 + \frac{n_j k_1 \cos \theta_j}{n_1 k_j \cos \theta_1} T^2 = 1, \quad n_j = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2k_j h_j}{\sinh 2k_j h_j} \right] \quad (10)$$

### 3. 외부흐름 구간의 수( $m'$ )와 소멸파 성분의 수( $n$ ) 설정

고유함수전개법을 적용하여 파랑을 해석하기 위해서는 외부흐름 구간의 수( $m'$ )와 소멸파 성분의 수( $n$ )를 미리 설정하여야 한다. 만약 외부흐름 구간의 수( $m'$ )와 소멸파 성분의 수( $n$ )가 충분하지 않으면 해석해의 오차가 클 수 있으며, 만약 외부흐름 구간의 수( $m'$ )와 소멸파 성분의 수( $n$ )가 필요 이상으로 클 경우 연산 속도가 기하급수적으로 느려질 것이다. 본 연구에서는 외부흐름 구간의 수( $m'$ )와 소멸파 성분의 수( $n$ )를 점진적으로 증가하여 더 이상 변화하지 않는 값을 찾는 수렴성 테스트를 수행하였다.

Fig. 2는 외부흐름 구간의 수( $m'$ )를 결정하기 위한 수렴성 테스트 결과를 나타낸다. 외부흐름 구간의 수( $m'$ )가 15개 미만인 경우 중간수심 영역( $k_1 h_1 > 0.314$ )에서 큰 차이를 보였으며, 15개 이상일 때 외부흐름의 형상을 충분히 반영하여 반

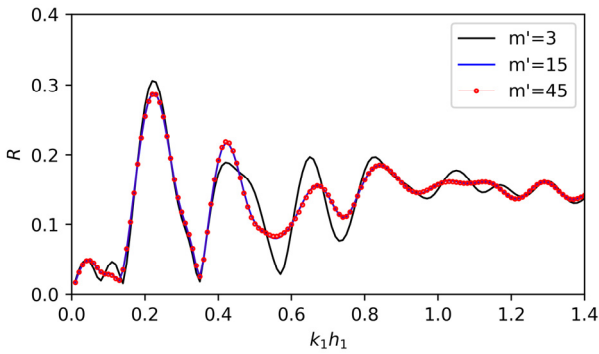


Fig. 2. Convergence test of the numbers of grids for shear currents ( $b_1/h_1 = 10$ ,  $d_1/h_1 = b_2/h_1 = d_2/h_1 = 10$ ,  $h_2/h_1 = 2$ ,  $N = 2$ ,  $n = 0$ ,  $Fr_{max} = 0.2$ )

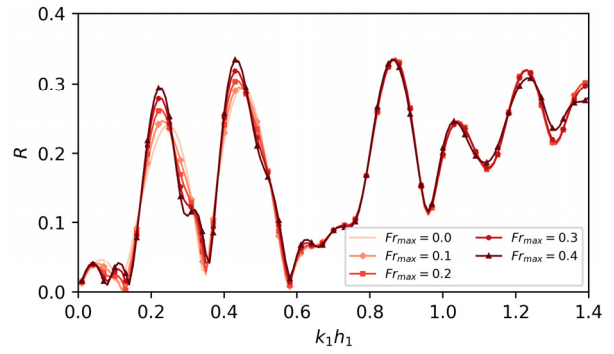


Fig. 4. Sensitivity of reflection coefficients with variable maximum Froude numbers ( $b_1/h_1 = 10$ ,  $d_1/h_1 = b_2/h_1 = d_2/h_1 = 10$ ,  $h_2/h_1 = 2$ ,  $N = 2$ )

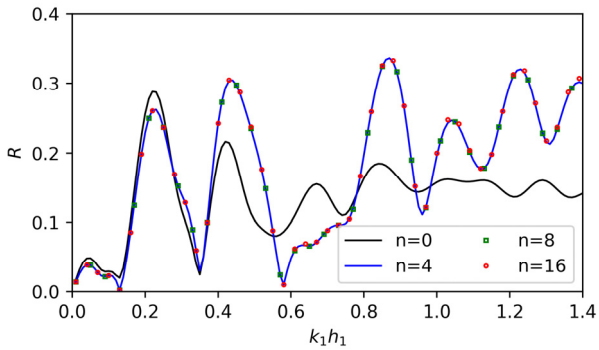


Fig. 3. Convergence test of the numbers of evanescent modes ( $b_1/h_1 = 10$ ,  $d_1/h_1 = b_2/h_1 = d_2/h_1 = 10$ ,  $h_2/h_1 = 2$ ,  $N = 2$ ,  $m' = 15$ ,  $Fr_{max} = 0.2$ )

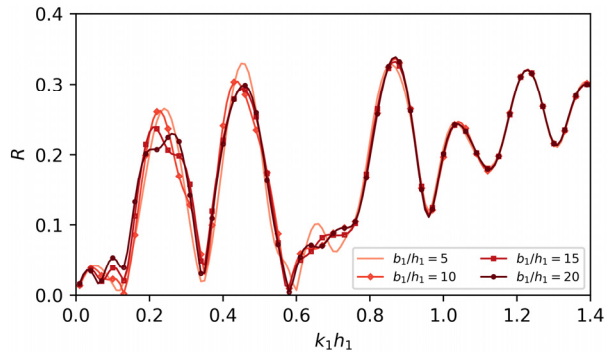


Fig. 5. Sensitivity of reflection coefficients with variable relative widths of shear currents ( $d_1/h_1 = b_2/h_1 = d_2/h_1 = 10$ ,  $h_2/h_1 = 2$ ,  $Fr_{max} = 0.2$ )

사을 변화에 더 이상 영향을 주지 않음을 확인하였다.

Fig. 3는 소멸파 성분 수( $n$ )를 결정하기 위한 수렴성 테스트 결과를 나타낸다. 소멸파를 고려하지 않고 오직 진행파만을 고려한 경우(plane wave approximation), 소멸파 성분 수( $n$ )를 고려한 경우와 중간수심 영역( $k_1h_1 > 0.314$ )에서 큰 차이를 보였으며, 소멸파 성분 수( $n$ )가 4개 이상일 때 반사율에 더 이상 큰 변화를 끼치지 않음을 확인하였다. 본 연구에서는 오차를 최소화하며 연산속도를 최대화하는 외부 흐름 구간 의 수( $m'$ )를 15개, 소멸파 성분 수( $n$ )를 4개로 설정하였다.

### 4. 반사율 계산과 민감도 분석

먼저, 외부 흐름과 흐름의 상대적인 폭에 따른 반사율과 민감도를 분석한다. 외부 흐름은 속도( $Fr_{max}$ )와 폭( $b_1/h_1$ )으로 결정되며, 본 연구에서는 속도와 폭을 제외한 모든 변수를 고정 한 후 분석하고자 하는 변수의 값을 변화시키는 민감도 분

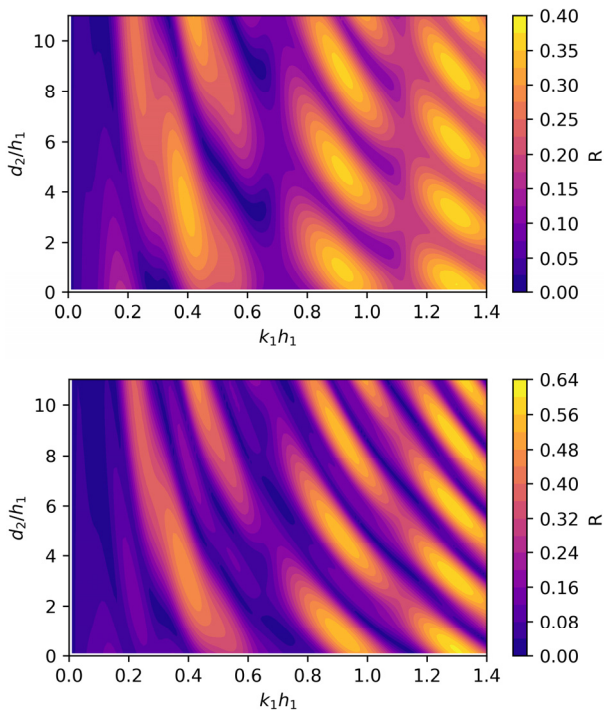
석을 수행하였다. Fig. 4는 외부 흐름의 속도에 따른 반사율 민감도 분석 결과이다. 전반적으로 외부 흐름의 속도는 반사율에 큰 영향을 끼치지 않았다. 그러나  $Fr_{max}$ 가 증가함에 따라 천해 영역과 일부 중간수심 영역( $k_1h_1 < 0.6$ )에서 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 0.6 - 1.1 범위의 상대수심( $k_1h_1$ )에서는 외부 흐름의 속도에 따른 반사율 변화가 없으며, 그 이상의 상대수심( $k_1h_1$ )에서는 외부 흐름의 속도가 증가함에 따라 반사율이 작아지는 부분이 존재한다.

Fig. 5는 외부 흐름의 폭( $b_1/h_1$ )에 따른 반사율 민감도 분석 결과이다. 전반적으로 외부 흐름의 폭( $b_1/h_1$ )은 반사율에 큰 영향을 끼치지 않았다. 그러나 일부 구간에서는 외부 흐름의 폭( $b_1/h_1$ )이 증가함에 따라 반사율이 증가하거나( $k_1h_1 < 0.15$ ) 반사율이 점진적으로 감소하거나( $0.15 < k_1h_1 < 0.6$ ), 불규칙한 변화( $0.6 < k_1h_1 < 0.8$ )를 보였다. 그 이상의 상대수심( $k_1h_1 > 0.8$ )에서는 반사율의 변화가 거의 없었다.

외부 흐름의 속도( $Fr_{max}$ )와 외부 흐름의 폭( $b_1/h_1$ )에 따른 반

**Table 1.** Comparison of maximum reflection and transmission coefficients with Froude numbers and relative water depths

$Fr_{max}$	$b_1/h_1$	$k_1h_1$	$R_{max}$	$T$	$R_{max}^2 + \frac{n_j k_1 \cos \theta_j}{n_i k_j \cos \theta_i} T^2$
0.0	10	0.87	0.33	0.94	1.00
0.1		0.87	0.34	0.94	1.00
0.2		0.87	0.34	0.94	1.00
0.3		0.87	0.33	0.94	1.00
0.4		0.43	0.33	0.94	1.00
0.2	5	0.45	0.33	0.94	1.00
	15	0.87	0.33	0.94	1.00
	20	0.87	0.34	0.94	1.00



**Fig. 6.** Sensitivity of reflection coefficients depending on the distance between trenches. (upper)  $N=2$  (bottom)  $N=3$ . ( $d_1/h_1 = b_2/h_1 = 10$ ,  $h_2/h_1 = 2$ ,  $Fr_{max} = 0.2$ )

사율 민감도 분석을 통해, 외부흐름은 전반적으로 반사율에 큰 영향을 미치지 못하나 상대적으로 천해영역과 천해영역에 가까운 중간수심 영역에서는 외부 흐름의 영향을 무시할 수 없다는 것을 확인하였다. Table 1은 Figs. 4 and 5에서 고려된 외부흐름의 속도( $Fr_{max}$ )와 폭( $b_1/h_1$ ) 조건에 따른 최대반사율( $R_{max}$ )과 최대반사율이 나타나는 상대수심( $k_1h_1$ )과 통과율( $T$ ) 그리고 Eq. (10)으로 표현되는 에너지 보존식 계산 결과를 보여준다. 대부분의 외부흐름의 속도와 폭( $b_1/h_1$ ) 조건에서 최대반사

율은 0.33 – 0.34이며, 상대수심( $k_1h_1$ )이 0.45 또는 0.87 부근에서 발생한다. 모든 조건에서 Eq. (10)에 의한 계산 결과가 1.0으로 에너지보존식을 만족하는 것을 확인하였다.

다음은 함몰지형간 거리( $d_2/h_1$ )와 함몰지형 개수( $N$ )에 따른 반사율의 민감도 분석을 수행하였다 (Fig. 6). 전반적으로 외부흐름의 특성에 따른 반사율 변화 정도와 비교하여, 함몰지형의 특성은 반사율에 큰 영향을 미쳤다. 본 연구에서 사용한 조건에서는 상대수심( $k_1h_1$ )이 0.7인 지점을 경계로 반사율 양상이 구분된다. 경계 이하의 구간에서의 최대반사율을 나타내는 최적거리는 2열 함몰지형의 경우 상대수심  $k_1h_1 = 0.39$ 에서 최대반사율  $R \approx 0.34$ 이 나타난  $d_2/h_1 = 3.4$ 이며, 3열 함몰지형의 경우 동일한 거리와 상대수심이나 최대 반사율이  $R \approx 0.48$ 로 증가했다. 이는 Lee *et al.* (2015)의 결과처럼 다열 함몰지형이 Bragg 반사와 유사한 효과를 나타내는 것으로 해석된다. 상대수심이 0.7 이상인 경우, 함몰지형 간의 거리가 증가함에 따라 반사율이 주기적인 변화를 보인다. 이러한 반사율 민감도 분석을 통해, 해안 지역 준설 작업 시 주변 파랑 환경에 영향을 줄 수 있으므로 반사율을 고려한 작업 설계가 중요함을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 고유함수전개법을 이용하여 임해발전소 주변에서 발생 가능한 외부 흐름과 다열 함몰지형에 경사지게 입사하는 파랑의 반사율을 분석하였다. 민감도 분석을 통하여 함몰지형 수와 거리에 따른 반사율이 외부흐름의 속도와 폭에 따른 반사율보다 더 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 외부흐름의 영향이 작을지라도 천해와 천해부근 상대수심 ( $0.01 < kh \leq 0.70$ )에서는 외부흐름의 영향을 무시할 수 없다는 것을 확인하였다.

본 연구는 해안지역에 건설되었거나 건설 중인 원자력발전소와 화력발전소 등과 같은 임해발전소에서 해저케이블 매설을 함몰지역 등의 준설작업에서 적절한 규모의 함몰지형 결정에 응용이 가능하다. 또한, 고유함수전개법을 이용한 본 연구는 임해발전소의 유지보수에 필요한 소형선박의 운항을 위한 항로 준설 시 항로의 규격 등을 결정할 때도 이용이 가능할 것으로 판단된다.

고유함수전개법은 선형이론 가정과 고유함수의 직교성 등을 통해 간편하고 정확한 연산이 가능한 매우 효율적인 방법이다. 향후 연구에서는 보다 현실적인 조건을 해석할 수 있도록 최근 많은 연구가 진행되고 있는 해저지형의 투과성(예를

들어, Singla *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020; Venkateswarlu *et al.*, 2020), 해수면 얼음층(Paul *et al.*, 2019) 등을 고려할 수 있도록 확장하여야 하며, Aydin and Kânoğlu (2017)의 연구와 같이 비선형이론을 이용하여 해석할 수 있는 모델 개발이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년 (재)한국연구재단 중견연구자지원사업 과제 해안구조물에서 파랑의 처오름높이에 관한 연구(과제 번호: No. 2015R1A2A1A15054097)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Aydin, B., and Kânoğlu, U. (2017). "New analytical solution for nonlinear shallow water-wave equations." *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 174, No. 8, pp. 3209-3218.
- Belibassakis, K.A. (2007). "A coupled-mode model for the scattering of water waves by shearing currents in variable bathymetry." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 578, pp. 413-434.
- Cho, Y.-S., and Lee C.H. (1998). "Calculation of reflection and transmission coefficients of waves over a varying topography." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 2-4, pp. 351-358.
- Cho, Y.-S., and Lee, C.H. (2000). "Resonant reflection of waves over sinusoidally varying topographies." *Journal of Coastal Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 870-876.
- Ding, W.-W., Zou, Z.-J., and Wu, J.-P. (2019). "Bragg reflection of water waves by multiple floating horizontal flexible membranes with submerged rectangular bars on the seabed." *Applied Ocean Research*, Vol. 83, pp. 103-111.
- Guo, Y.C., Mohapatra, S.C., and Guedes Soares, C. (2020). "Wave energy dissipation of a submerged horizontal flexible porous membrane under oblique wave interaction." *Applied Ocean Research*, Vol. 94, No. 101948, pp. 1-16.
- Jeon, C.-H., and Cho, Y.-S. (2006). "Bragg reflection of sinusoidal waves due to trapezoidal submerged breakwaters." *Ocean Engineering*, Vol. 33, No. 14-15, pp. 2067-2082.
- Kang, G.Y., Jung, T.-H., and Cho, Y.-S. (2007). "Analysis of reflection coefficients of waves propagating over various depression of topography." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 11, pp. 899-908.
- Kirby, J.T., and Dalrymple, R.A. (1983). "Propagation of obliquely incident water waves over a trench." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 133, pp. 47-63.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., and Seo, S.N. (1987). "Propagation of obliquely incident water waves over a trench, part 2, currents flowing along the trench." *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 176, pp. 95-116.
- Lee, J.-W., Cha, J.-H., and Cho, Y.-S. (2014). "Performance evaluation of multi-arrayed submerged structures by impermeable depositional topography." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 4, pp. 343-349.
- Lee, J.-W., and Cho, Y.-S. (2013). "The calculation of reflection coefficients of water waves over various shear currents with a uniform depth topography." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 245-252.
- Lee, J.-W., Park, K.-Y., and Cho, Y.-S. (2015). "Shear current effects on monochromatic water waves crossing trenches." *Journal of Applied Mathematics*, Vol. 2015, No. 256084, pp. 1-11.
- Lee, J.-W., Seo, K. H., and Cho, Y.-S. (2013). "Resonant reflection by sinusoidally varying topography with various shear currents." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 3, pp. 209-214.
- Liu, P. L.-F., and Cho, Y.-S. (1993). "Bragg reflection of infragravity waves by sandbars." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. C12, pp. 22733-22741.
- Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Kostense, J.K., and Dingemans, M.W. (1992). "Propagation and trapping of obliquely incident wave groups over a trench with currents." *Applied Ocean Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 201-213.
- McKee, W.D. (2006). "The propagation of water waves across a laterally sheared current." *Applied Ocean Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 339-344.
- Paul, S., Sasmal, A., and De, S. (2019). Interaction of oblique waves with an ice sheet over an asymmetric trench. *Ocean Engineering*, Vol. 193, No. 106613, pp. 1-8.
- Singla, S., Behera, H., Martha, S.C., and Sahoo, T. (2019). "Scattering of obliquely incident water waves by a surface-piercing porous box." *Ocean Engineering*, Vol. 193, No. 106577, pp. 1-11.
- Venkateswarlu, V., and Karmakar, D. (2020). "Influence of impermeable elevated bottom on the wave scattering due to multiple porous structures." *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 13, No. 1, pp. 371-385.