정현형 지형과 다양한 외부흐름에 의한 반사

Resonant Reflection by Sinusoidally Varying Topography with Various Shear Currents

이준환* · 서규학** · 조용식***

Lee, Jun-Whan · Seo, Kyu Hak · Cho, Yong-Sik

Abstract

The resonant reflection caused by sinusoidally varying submerged structure and wave could protect coastal facilities from wave attack by reducing wave energy. Water waves deform by not only bottom topography but also interaction with shear currents. In this study, a resonant reflection by a sinusoidally varying topography with various shear currents is investigated. The water depth and the slope of shear currents are represented by a finite number of tiny steps. The proper numbers of steps are proposed and the effects of evanescent modes are shown.

Key words : Eigenfunction expansion method, Diffraction, Bragg reflection, Shear current

요 지

정현형 수중구조물과 파랑의 공명을 이용하여 파랑의 에너지를 감소시킴으로써 파랑으로부터 해안 시설물을 보존할 수 있다. 파랑은 해저지형뿐만 아니라 외부흐름과의 상호작용에 의하여 변형한다. 본 연구에서는 정현형 지형과 다양한 외부흐름에 의한 공명을 해석하였다. 수심과 외부흐름의 경사를 작은 구간의 계단형으로 단순화하였다. 계산에 필요한 적절한 구간의 수를 제안했으며, 소멸과 성분 고려 여부에 따른 차이를 보였다.

핵심용어 : 고유함수전개법, 회절, Bragg 반사, 외부흐름

1. 서 론

오늘날 지구온난화 등에 의한 기후변화 문제로 온실기체를 배출하지 않고 고효율인 원자력발전소 건설이 각광받고 있다. 우리나라의 경우, 큰 하상계수로 인하여 하천보다는 냉각수 공급이 용이한 해안 주변에 원자력 발전소가 위치한다. 2011년 3월 11일 발생한 일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고와 같은 원전사고의 위험성으로 인하여 해안방재의 필요성이 증가하고 있다. 원자력발전소를 가동하기 위해서 대용량의 냉각수가 필요하기 때문에 취수구와 배수구 주변의 수심을 적절히 유지하는 것이 중요하다. 파랑은 원자력 발전소 등의 항만 시설물 안전을 위협하는 대표적인 요소로 먼 바다에서 바람에 의해 생성되어 해안가로 전파해 온다. 그 과정에서 파랑은 주변 환경에 의해 반사, 회절 등의 변형과정을 겪는다. 그러므로 파랑의 변형과정을 정확하게 예측하는 것이 중요하다.

고유함수전개법을 이용한 파랑 해석법은 수치기법을 이용하지 않고 선형과 성분의 해를 구하는 방법 중 하나로 많은 연구에 사용되었다. 특히 수심이 일정하지 않은 해저지형은 파랑 변형의 가장 큰 요인 중 하나로 해안 침식, 구조물 안전과 관련된 방파제, 수중방파제 및 함몰지형 등의 외곽시설에 관한 연구가 많이 수행되었다(Cho and Lee, 1998; Bender and Dean, 2003; Jung *et al.*, 2004; Kang *et al.*, 2007). 그리고 입사하는 파랑의 파장이 정현형 해저지형 파장의 두 배가 될 때 발생하는 Bragg 반사를 통한 파랑 에너지 저감 방안도 활발히 연구되어왔다(Liu and Cho, 1993; Mei and Liu, 1993; Cho and Lee, 2000).

해안 주변에서는 하구(river mouth), 조류구(tidal inlet), 조석파(tidal race) 및 해양구조물 주변 등에서 형성되는 외부흐름이 지형과 더불어 파랑 변형에 큰 영향을 미친다(MacIver *et al.*, 2006). 고유함수전개법을 이용한 파랑 해석에 외부흐름을 고려하기 위하여 Kirby *et al.* (1987)와 Liu *et al.*

*정회원. 한양대학교 건설환경공학과 석사과정(E-mail: junwhan89@hanyang.ac.kr)
Member. MS Candidate, Department of Civil and Environment Engineering, Hanyang University

**한양대학교 건설환경공학과 박사과정
Ph.D candidate, Department of Civil and Environment Engineering, Hanyang University

***교신저자. 정회원. 한양대학교 건설환경공학과 교수(Tel: +82-2-2220-0393, Fax: +82-2-2220-1945, E-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Hanyang University

(1992)은 Evans (1975)의 방법을 이용하여 일정한 외부흐름에 대한 트렌치 지형과 수심이 일정한 지형을 통과하는 파랑을 연구했다. 그러나 기존의 연구는 대부분 단일방향, 일정한 세기의 외부흐름이 트렌치 또는 평탄한 지형에 작용하는 경우로 국한되어 있었다. 본 연구에서는 정현형 지형에 작용할 수 있는 다양한 외부흐름에 의한 파랑 변형을 고유함수 전개법을 이용하여 해석하였다.

다음 절에서는 고유함수전개법을 이용한 파랑 해석법을 간략히 기술했으며, 제3절에서는 다양한 수심과 외부흐름으로 구성된 모형을 검증하며 해석에 필요한 구간 수를 제안했다. 제4절에서는 다양한 외부흐름의 변화에 따른 특징을 제시하였으며, 제5절에 결론을 기술하였다.

2. 고유함수전개법

비점성 유체, 비압축, 비회전 흐름으로부터 정의된 속도 포텐셜(velocity potential)은 질량 보존법칙으로부터 유도된 Laplace 방정식, 운동방정식으로부터 유도된 자유수면 및 바닥 경계조건을 만족한다(Cho and Lee, 2000).

수심은 x 축 방향으로만 변화하며 외부흐름은 y 축 방향으로만 작용하는 경우, 수심과 외부흐름이 일정한 부분을 경계로 구간을 나눌 수 있다. 한 구간에서 좌우 진행방향의 속도 포텐셜은 Eqs. (1) and (2)로 표현할 수 있다.

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

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

여기서 A_m^l , $B_{m,n}^l$, A_m^r 과 $B_{m,n}^r$ 은 모두 복소수로 표현되는 진폭함수이며 미지수이다. 아래첨자 m 과 n 은 각각 구간과 고려하는 소멸과 성분의 수를 의미하며, 위첨자 l 과 r 은 각각 좌우로 진행하는 성분을 의미한다. x , y 는 수평 방향 좌표, z 는 연직 방향 좌표, t 는 시간, h_m 은 m 영역의 수심을 나타낸다.

수심이 일정하지 않은 경우, 진행과 성분만으로 Laplace 방정식을 만족하지 못하므로 소멸과 성분을 고려해야한다. l_m 과 $\lambda_{m,n}$ 은 각각 진행파와 소멸파 x 축 성분의 파수를 나타내며, Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 k_y 는 y 축 방향의 파수이며, 파수 k_m 과 $K_{m,n}$ 은 분산방정식 Eq. (4)로부터 계산할 수 있다.

$$\sigma_m^2 = g k_m \tanh k_m h_m = -g K_{m,n} \tan K_{m,n} h_m \quad (4)$$

여기서 g 는 중력가속도이다. 외부흐름의 속도는 무차원 수인

프루드(Froude) 수로 나타냈으며, 외부흐름에 의해 변형된 각진동수를 고유각진동수(intrinsic angular frequency)로 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_m = \omega - V_m k_y \quad (5)$$

여기서 ω 는 각진동수, V_m 은 m 영역에서의 외부흐름 속도를 나타낸다.

진폭함수를 구하기 위해서는 구간별 접합조건(matching conditions)이 필요하다. 접합조건은 연속적인 구간 경계의 흐름을(운동학적 경계조건)과 압력(동역학적 경계조건)에 관한 식으로 Eqs. (6) and (7)과 같다.

$$\frac{1}{\sigma_m} \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{1}{\sigma_{m+1}} \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} \quad (6)$$

$$\sigma_m \Phi_m = \sigma_{m+1} \Phi_{m+1} \quad (7)$$

Eqs. (1) and (2)로 표현한 속도 포텐셜을 접합조건에 대입한 후, 고유함수의 직교성을 이용하여 수심방향으로 적분하면 미지수를 획기적으로 줄인 $2(m-1)(n+1)$ 개로 구성된 선형행렬식을 얻을 수 있다. 이 식으로부터 구한 진폭함수를 자유수면 경계조건에 대입하면 Eq. (8)과 같이 파랑의 진폭을 구할 수 있다.

$$a_l = g^{-1} |A_1^l| \sigma_1 \cosh k_1 h_1, \quad a_r = g^{-1} |A_1^r| \sigma_j \cosh k_j h_j \quad (8)$$

여기서 a_l 과 a_r 은 각각 첫 구간에서 반사한 진폭의 절대값과 마지막 구간인 j 번째 구간의 통과한 진폭의 절대값을 나타낸다. 초기 우측 방향 진행 진폭함수를 $|A_1^r| = 1$ 로 하면 반사율(R)과 통과율(T)을 다음과 같이 간략하게 결정할 수 있다.

$$R = |A_1^l|, \quad T = \frac{\sigma_j \cosh k_j h_j}{\sigma_1 \cosh k_1 h_1} |A_1^r| \quad (9)$$

본 연구에서는 Eq. (9)로 구한 반사율과 통과율의 정확도를 검증하기 위하여 에너지 보존식을 이용했다(Kirby *et al.*, 1987).

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

본 연구에서는 Kirby *et al.* (1987)과 동일하게 고유각진동수와 파수가 $\sigma_m > 0$, $k_m > k_y$ 를 만족하는 경우로 제한했으며, Liu *et al.* (1992)과 동일하게 외부흐름에 의한 와류 효과의 가능성이 무시할 정도로 충분히 작은 경우로 한정하여 파랑의 변형을 해석했다.

3. 모형 구성 및 검증

3.1 수심 및 외부흐름의 구성

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 정현형 지형에 의한 Bragg 반사에 외부흐름 효과를 고려하였다.

먼저 Case 1은 Cho and Lee (2000)의 정현형 지형에 일정한 크기의 외부흐름이 해안선에 평행하게 작용하는 경우이

Fig. 1. Definition Sketch of Four Cases of Computational Domain

Table 1. Topography and Shear Currents of Four Cases

No.	Topography	Shear currents
Case 1.	$h(x) = h - h_0 \sin(l_c x)$	$Fr(x) = Fr_{\max}$
Case 2.	$h(x) = h - h_0 \sin(l_c x)$	$Fr(x) = \begin{cases} \frac{4Fr_{\max}}{b}x, & 0 \leq x \leq \frac{b}{4} \\ \frac{4Fr_{\max}}{3b}(x-b), & \frac{b}{4} < x \leq b \end{cases}$
Case 3.	$h(x) = h$	$Fr(x) = Fr_{\max} \sin(l_c x)$
Case 4.	$h(x) = h - h_0 \sin(l_c x)$	$Fr(x) = Fr_{\max} \sin(l_c x)$

다. 현실적인 외부흐름은 흐름이 유입되는 부분에서 속도가 빠르며 주변으로 점점 느려지는 분포이다. 특히, 연안류(longshore current)는 쇄파대(surf zone) 부근에서 유속이 급증하여 해안선 방향으로 감소하는 특징이 있다. Case 2는 이러한 특성을 반영한 이상적인 양상으로써 정현형 지형에 삼각형 분포의 외부흐름이 작용하는 경우이다. 이안류(rip current)가 주기적으로 발생하거나 여러 방향에서 유입되는 하천수와 조류 등의 조합으로 인한 실제 해역의 외부흐름을 단일방향의 외부흐름으로 해석하는 것은 한계가 있다. Case 3은 주기적인 다방향 외부흐름을 정현형으로 이상화한 경우로 외부흐름에 의한 특성을 파악하기 위하여 일정한 수심의 지형을 이용했다. Case 4에서는 앞서 살펴본 정현형 지형과 파

수가 다른 정현형 외부흐름에 의한 복합 특성을 알아보았다.

Table 1은 각 경우에 대하여 $0 \leq x \leq b$ 구간의 지형과 외부흐름을 수식으로 나타낸 것으로 이 밖의 구간에서는 $h(x)=h$, $Fr(x)=0$ 이다. 여기서 l_b , l_c 는 각각 지형과 외부흐름의 파수를 나타낸다.

3.2 구간 수와 소멸파 수 선정

고유함수전개법을 이용한 파랑 해석 방법은 수심과 외부흐름이 변하는 지점을 경계로 구간을 나누어 해저 지형의 경사와 다양한 양상의 외부흐름을 표현한다. 따라서 구간의 수가 증가할수록 해는 정확해지나 계산하는 선형행렬식의 크기가 기하급수적으로 커지므로 적절한 구간의 수를 선정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 4개의 파장으로 구성된 정현형 지형($h_0/h=0.32$, $b/h=80$, $l_c=0.341$)의 단위 파장 당 구간 수(m)를 10, 50, 100으로 변경하며 수렴성을 검토하였다. Fig. 2를 통해 단위 파장 당 구간 수가 50 이상일 경우 충분히 수렴함을 알 수 있다. 그러므로 초기파 구간과 마지막 통과 구간을 포함한 총 구간($4m+2$)을 202구간으로 구성하였다.

Fig. 3은 동일한 정현형 지형에 대해 소멸파를 고려하지 않는 평면파 근사(plane-wave approximation)와 4개의 소멸파를 고려한 경우를 비교한 것이다. Kirby and Dalrymple (1983)은 지형이 급변하는 함몰지형(trench)의 경우 소멸파를

Fig. 2. Convergence Test for Number of Steps

Fig. 3. Reflection Coefficients with Different Number of Evanescent Modes

16개 고려해야 한다고 제시하였다. 그러나 정현형 지형의 경우 지형의 경사가 완만하여 소멸파의 영향이 적어, 본 연구에서는 Cho and Lee (2000)의 정현형 지형 해석에 사용된 소멸파 4개를 고려하여 해석하였다.

3.3 모형 검증

앞 절에서 선정한 구간 수와 소멸파 수를 이용하여 계산한 반사율과 통과율의 정확도를 검증하기 위하여 Eq. (10)으로 표현되는 에너지 보존식을 사용하였다. Figs. 4-7에 나타난 각 경우의 최대 반사율과 그에 해당하는 상대파수 ($2k_1/l$)와 통과율 그리고 에너지보존식 계산 결과를 Table 2에 나타냈

다. 이 밖의 반사율과 통과율 또한 에너지 보존식을 잘 만족한다.

4. 결과 분석

4.1 일정 또는 삼각형 형상의 외부흐름이 작용하는 정현형 지형

Fig. 4는 정현형 지형($h_0/h=0.32$, $b/h=80$, $l_f=0.314$)에 외부 흐름이 작용하지 않는 경우($Fr_{max}=0.0$), 일정한 세기의 외부 흐름이 작용하는 경우($Fr_{max}=0.1$, $Fr_{max}=0.2$) 그리고 삼각형 분포의 외부흐름이 작용하는 경우($Fr_{max}=0.2$)의 상대파수에 따른 반사율을 비교한 것이다. 여기서 입사각(θ)은 모두 30° 로 동일하다.

Dalrymple and Kirby (1986)는 정현형 지형을 통과한 비스듬히 입사하는 파랑에 대하여 Bragg 반사 조건을 유도하였다.

$$\frac{2k_1 \cos \theta}{l_f} = n', n' = 1, 2, 3 \dots \quad (11)$$

여기서 n' 은 차수(order)이며, 입사각($\theta=30^\circ$)에 대하여 1차 Bragg 반사조건은 $2k_1/l_f \approx 1.15$ 이다.

외부흐름이 없는 정현형 지형의 경우, Bragg 반사가

Fig. 4. Reflection Coefficients for Various Shear Currents

Table 2. Maximum Reflection Coefficients with $2k_1/l$, T and Values of Energy Conservation

No.	Condition	$2k_1/l$	R_{max}	T	$R_{max}^2 + \frac{n_j k_1 \cos \theta_j}{n_1 k_j \cos \theta_1} T^2$
Fig. 4	$Fr_{max}=0.0$	1.121019	0.605120881474	0.796133606126	1.000000000000
	$Fr_{max}=0.1(\text{rec})$	1.216560	0.593980413963	0.804479501186	1.000000000000
	$Fr_{max}=0.2(\text{tri})$	1.216560	0.592384542124	0.805655356994	1.000000000000
	$Fr_{max}=0.2(\text{rec})$	1.312102	0.571166627777	0.820834138736	1.000000000000
Fig. 5	$N=2$	0.579618	0.203738919500	0.979025256406	1.000000000000
	$N=4$	1.152866	0.385609933775	0.922661898516	1.000000000000
	$N=8$	2.299363	0.645707132656	0.763585161483	1.000000000000
Fig. 6	$Fr_{max}=0.1$	1.152866	0.202742904244	0.979232002530	1.000000000000
	$Fr_{max}=0.2$	1.152866	0.385609933775	0.922661898516	1.000000000000
	$Fr_{max}=0.3$	1.152866	0.535866149141	0.844302949305	1.000000000000
Fig. 7	$b/h=40$	2.299363	0.367234572253	0.930128361541	1.000000000000
	$b/h=80$	1.152866	0.385609933775	0.922661898516	1.000000000000
	$b/h=160$	0.579618	0.390099737835	0.920772607402	1.000000000000

Dalrymple and Kirby (1986)의 조건을 만족한다. 그리고 정현형 지형에 외부흐름이 작용하는 경우, Eq. (12)와 같이 외부흐름을 폭에 대하여 적분한 값(A)에 비례하여 반사율의 위상이동이 나타난다.

$$A = \frac{1}{h} \int_0^b Fr(x) dx \quad (12)$$

적분 값이 동일한, 일정한 세기의 외부흐름($Fr_{max}=0.1$)과 삼각형 형상의 외부흐름($Fr_{max}=0.2$)에서 비슷한 정도의 위상이 이동한다. 그러나 Bragg 반사 지점 주변으로 반사율이 외부흐름 양상에 따라 다르다.

4.2 정현형 외부흐름이 작용하는 평탄한 지형

외부흐름 진행방향이 연속적으로 변화하는 정현형 외부흐름의 반사율을 분석하였다. 모든 경우 입사각(θ)은 30° 이며, x 축은 $l_c=0.314$ 을 기준으로 표기했다.

Fig. 5는 평탄한 지형($b/h=80$)에 정현형 외부흐름($Fr_{max}=0.2$)이 2, 4, 8개의 파장으로 구성되어 있을 때의 반사율을 나타낸 것이다. 정현형 지형과 마찬가지로 정현형 외부흐름 또한 Dalrymple and Kirby (1986)의 Bragg 반사 조건을 만족한다. 파장 수가 증가함에 따라 최대 반사율이 증가하며 2차 Bragg 반사(2nd-order Bragg reflection)가 발현됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 평탄한 지형($b/h=80$)에 정현형 외부흐름($N=4$)이 0.1, 0.2, 0.3의 세기(Fr_{max})로 작용하는 경우의 반사율을 나타낸 것이다. 외부흐름의 속도에 비례하여 최대 반사율과 2차 Bragg 반사 효과가 증가한다.

Fig. 7은 평탄한 지형에 정현형 외부흐름($Fr_{max}=0.2$, $N=4$)이 40, 80, 160의 상대폭(b/h)으로 작용하는 경우의 반사율

Fig. 5. Reflection Coefficients for Different Number of Wave Length

Fig. 6. Reflection Coefficients for Different Froude Number

Fig. 7. Reflection Coefficients for Different Relative Width

을 나타낸 것이다. 모든 경우, Bragg 반사 조건을 만족하며 최대반사율은 거의 일정하다. 그리고 상대폭이 증가함에 따라 반사율 변화 기울기가 증가한다.

이를 통해 정현형 외부흐름의 파장 수가 일정한 경우 외부흐름의 세기가 최대 반사율을 결정하며, 정현형 외부흐름이 작용하는 상대폭이 반사율 기울기를 결정함을 알 수 있다.

4.3 정현형 외부흐름이 작용하는 정현형 지형

정현형 지형과 정현형 외부흐름의 상호작용을 알아보기 위하여 외부흐름의 파장 수가 정현형 지형의 파장 수($N=4$)의 2배인 경우를 분석하였다.

Fig. 8은 (a) 정현형 지형($h_0/h=0.32$, $b/h=80$)을 통과하는 경우, (b) 정현형 외부흐름($Fr_{max}=0.2$)을 통과하는 경우 그리고 (c) 정현형 외부흐름이 작용하는 정현형 지형을 통과하는 경우의 입사각에 따른 반사율을 나타낸 것이다. 여기서 3개의 실선은 Eq. (11)로 계산되는 $l_c=0.314$ 에서의 1, 2, 3차 Bragg 반사 조건이다.

정현형 지형을 통과하는 파랑의 경우 Bragg 반사 조건을 만족한다. 그리고 입사각이 커질수록 최대 반사율이 작아지다가 입사각 45° 이상부터 반사율이 급증하며 2차, 3차 Bragg 조건의 반사가 명확히 나타난다.

정현형 외부흐름을 통과하는 파랑의 경우에도 Bragg 반사 조건을 잘 만족한다. 본 연구의 외부흐름 조건에서는 입사각이 작은 경우 반사가 거의 발생하지 않으며 입사각 27° , $2k_1/l_c=2.235669$ 에서 반사율이 0.659760067으로 국부 최대값을 나타낸다. 그리고 입사각 45° 이상부터 반사율이 급증하여 정현형 지형의 결과와 동일하게 대부분의 파랑을 반사시킨다.

정현형 외부흐름이 작용하는 정현형 지형을 통과하는 파랑의 경우에는 앞서 살펴본 각 경우의 특징이 모두 나타난다. 그리고 Bragg 조건에 의한 반사뿐만 아니라 Eq. (13)으로 계산되는 지형과 흐름의 상호작용에 의한 조화 Bragg 반사(harmonic Bragg reflection)가 나타난다.

$$\frac{2k_1 \cos \theta}{l_1 + l_c} = n', n' = 1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

여기서 $n'=1$ 인 경우, 3차 Bragg 반사 조건과 동일하며 이는 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에서 나타나지 않았던 반사가 Fig. 8(c)에서 나타남으로써 확인할 수 있다. 또한 4.1절, 4.2절에서 살펴본 바와 같이 정현형 외부흐름만 존재하는 경우 발생

Fig. 8. Reflection Coefficients for Sinusoidally Varying Topography and Sinusoidally Varying Shear Currents

하지 않았던 위상이동이 정현형 지형과 함께 작용하는 경우 나타난다.

5. 결 론

본 연구에서는 고유함수전개법을 이용하여 정현형 지형과 다양한 외부흐름에 의한 반사율을 계산하였다. 수렴성 검토를 통하여 한 파장의 정현형을 표현하는데 최소 50구간이 필요함을 보였으며, 지형이 급변하지 않아 4개의 소멸과 성분을 고려하였다.

정현형 지형에 외부흐름이 작용하는 경우 외부흐름을 폭에 대하여 적분한 값에 비례하여 위상이동이 발생하며, 외부흐름 형태에 따라 반사율 양상이 변함을 확인했다. 또한 Bragg 반사는 정현형 지형뿐만 아니라 평탄한 지형의 정현형 외부흐름에 의해서도 발생할 수 있으며, 최대반사율 및 반사율의 변화율은 외부흐름의 세기 및 상대폭에 의해 결정됨을 발견하였다. 그리고 정현형 지형과 정현형 외부흐름의 상호작용에 의하여 조화 Bragg 반사가 발생됨을 확인했다.

원자력 발전소의 취수구와 배수구 등과 같이 외부흐름의 영향이 중요한 지역에 정현형 수중구조물을 설계하는 경우, 외부흐름의 양상, 세기, 폭, 방향 등을 고려해야 한다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0022337).

References

- Bender, C.J. and Dean, R.G. (2003) Wave Transformation by Two-Dimensional Bathymetric Anomalies with Sloped Transitions. *Coastal Engineering*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 61-84.
- Cho, Y.-S. and Lee, C. (1998) Calculation of reflection and transmission coefficients of waves over a varying topography. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 18, No. 4B, pp. 351-358.

- Cho, Y.-S. and Lee, C. (2000) Resonant Reflection of Waves over Sinusoidally Varying Topographies. *Journal of Coastal Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 870-876.
- Dalrymple, R. and Kirby, J. (1986) Water waves over ripples. *Journal of Waterway, Port Coast, Ocean Engineering*, Vol. 112, pp. 309-319.
- Evans, D.V. (1975) The Transmission of Deep-Water Waves across a Vortex Sheet. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 68, pp. 389-401.
- Jung, J.-S., Cho, D.-H., Hwang, J.-K., and Cho, Y.-S. (2004) Reflection of Random Waves Propagating over Rectangular Submerged Non-Porous Breakwaters. *Journal of Hydro-environment Research*, Vol. 37, No. 9, pp. 729-736.
- 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 Hydro-environment Research*, 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(AUG), pp. 47-63.
- Kirby, J.T., Dalrymple, R.A., and Seo, S.N. (1987) Propagation of Obliquely Incident Water-Waves over a Trench .2. Currents Flowing along the Trench. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 176, pp. 95-116.
- 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, pp. 201-213.
- Liu, P.L.-F. and Cho, Y.-S. (1993) Bragg Reflection of Infragravity Waves by Sandbars. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, pp. 22,733-22,741.
- MacIver, R.D., Simons, R.R., and Thomas, G.P. (2006) Gravity Waves Interacting with a Narrow Jet-Like Current. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, pp. 1-20.
- Mei, C.C. and Liu, P.L.-F. (1993) Surface Waves and Coastal Dynamics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 25, pp. 215-240.

© Received March 4, 2013

© Revised March 29, 2013

© Accepted May 22, 2013