

입사각의 변화에 따른 파랑의 반사율 해석

김영택¹⁾ · 이종인²⁾ · 조용식³⁾

1. 서 론

외해에서 전파되어온 파랑은 굴절, 회절, 천수, 반사, 쇄파 등과 같은 변형을 겪는다. 본 연구에서는 바닥지형을 따라 경사지게 입사하는 파랑의 반사율에 관한 문제를 해석하였다. 특히, 일정경사를 갖고 진행되는 입사파는 바닥지형의 영향으로 논문에서 언급할 Bragg반사의 특성을 변형시키는 동시에 해저지형의 형태와 길이에 따라 파랑에너지의 상당량을 반사시킬 수 있기 때문에 해안구조물의 설계 및 항만 시설물 보호 등에 효과적으로 이용될 수 있다. 즉, 방파제와 같은 항만 구조물은 물론 해수욕장 등과 같은 편의시설의 설계를 위한 해안선 보호 및 불필요한 표사의 퇴적과 침식 등을 고려한 연안개발계획의 효율적인 수립을 위해서는 파랑의 반사 현상을 연구할 필요가 있다.

현재 국내외에서는 수중방파제를 이용한 파랑의 반사 및 통과 해석을 위한 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구에서는 경계요소법을 적용하여 바닥지형에 수직으로 입사하는 파랑에 경계요소법을 적용하여 반사율을 계산하였으나, 본 연구에서는 일정각도를 갖고 입사하는 파랑에 대한 반사율을 계산하였다. 또한 원호형 지형을 통과할 때 바닥 지형의 깊이 및 형태에 따른 파랑의 반사율을 경계요소법을 통하여 해석하였다. 또한 해석결과는 고유함수 전개법에 의한 결과와 비교하였다.

2. 수치해석

파랑의 반사를 해석하기 위하여 본 연구에서는 경계요소법이 적용되었다. 경계요소법은 파랑해석, 지하수해석 등 적용할 수 있는 지배방정식이 일부 한정되어 있다. 이는 free space green 함수가 존재하는 지배방정식만 적용할 수 있기 때문이다(Liggett and Liu, 1983). 경계요소법은 임의 경계를 갖는 영역에 쉽게 적용할 수 있으며, 다른 수치기법에 비하여 계산시간이 짧다는 장점이 있다. 그러나 시간의존성(time dependent) 문제 해석에 있어서는 다소 문제점이 있다.

우선, 본 연구에 있어 지배방정식과 경계조건을 나타내면 다음과 같다(Mei 1978, Bolton and Ursell 1973)

1) 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 해안항만그룹 연구원, ytkim@kict.re.kr
(한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정)

2) 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 해안항만그룹 선임연구원, jilee@kict.re.kr

3) 정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수, ysc59@hanyang.ac.kr

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} - \beta^2 \Phi = 0 \quad -h < z < 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad z = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad z = -h \quad (3)$$

식(1)~(3)에서 식(1)은 지배방정식이며, 식(2)와 식(3)은 수면과 바닥에서의 경계조건이다. 그리고 미소진폭파이론에 의하여 외해로부터 입사하는 파랑의 속도포텐셜은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\Phi_I = -\frac{igA}{\omega} \frac{\cosh k_0^-(z+h)}{\cosh k_0^- h^-} e^{i\alpha_0^- x} \quad (4)$$

여기서, 식(1)~(4)의 i 는 허수, g 는 중력가속도, ω 각주파수, \vec{n} 단위 연직벡터이며, α 와 β 는 분산방정식(식 5)으로부터 구한 k_0 의 x 방향 성분과 y 방향 성분을 의미한다(식 6).

$$\omega^2 = gk_0^- \tanh k_0^- h^- \quad (5)$$

$$\alpha_0 = k_0^- \cos \theta, \quad \beta = k_0^- \sin \theta \quad (6)$$

식(6)에서 θ 는 입사파의 입사각이다.

본 문제의 해석에 있어서는 좌우 경계면에서 식(7)의 Sommerfeld 경계조건(식 7)을 적용한다.

$$\lim_{k_0 x \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial}{\partial x} \mp i\alpha_0 \right) (\Phi - \Phi_I) = 0 \quad (7)$$

그림 1과 같은 영역 내에서 식(1)~(7)을 만족하는 속도포텐셜은 식(8)과 같다(Liu and Abbaspour, 1982).

$$\Phi = A_0 \frac{\cosh k_0^-(z+h^-)}{\cosh k_0^- h^-} + \left(\begin{array}{c} 0 \\ \Phi_I \end{array} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \pm \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad x > x^+ \text{ and } x < x^-$$

윗 식에서 위첨자 +, - 는 통과파 성분과 반사파 성분을 의미하여, 아래첨자 0는 입사파 전파시 수심에서의 초기조건, Φ_I 는 입사파의 속도포텐셜을 의미한다.

경계요소법에 의한 수치적분(김영택, 2001)을 통하여 반사율(R)과 통과율(T)을 계산하며, 그 때 식(9)로 나타내어진다.

$$T = \frac{|A_0^+|}{|A|}, \quad R = \frac{|A_0^-|}{|A|} \quad (9)$$

3. 적 용

3.1 정현파형 지형(sinusoidally varying topography)

입사파가 정현파형지형을 일정각도를 갖고 입사할 때의 반사율을 기존의 고유함수전개법(Cho and Lee, 2000)에 의한 해석결과와 비교하였다. 정현파형 지형은 식(10)으로 주어지며, 정현파형 지형은 그림 1과 같다.

$$\begin{aligned}
 h(x) &= h_1 & x < x_1 \\
 h(x) &= h_1 - b \sin(lx) & x_1 < x < x_2 \\
 h(x) &= h_1 & x > x_2
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

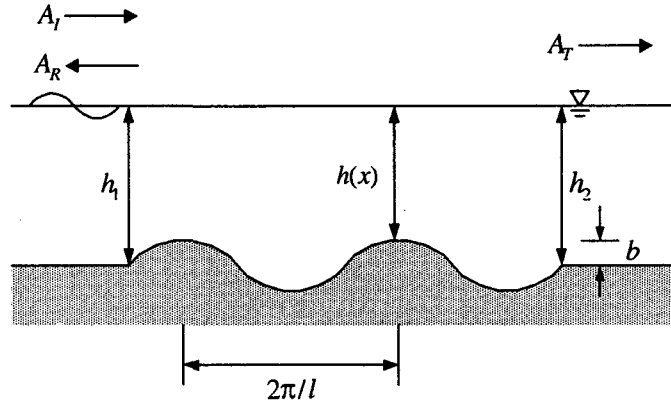


그림 1. 정현파형 지형(m=2)

식(10)과 그림 1에서 b 와 l 은 바닥 지형의 진폭과 파수이다. $h_1 = h_2$ 이며, $m=2$ 는 정현파형지형의 개수이다. A_I , A_R , A_T 는 입사파, 반사파, 통과파의 진폭을 의미한다.

해석결과는 다음 그림 2와 3에 도시되어 있다.

그림 2는 $m=2$ 에 대한 결과이며, 그림 3은 $m=4$ 인 경우이며, 경계요소법(BIEM)과 고유함수전개법(eigenfunction expansion method, EFEM)에 의한 결과가 비교되어 있다.

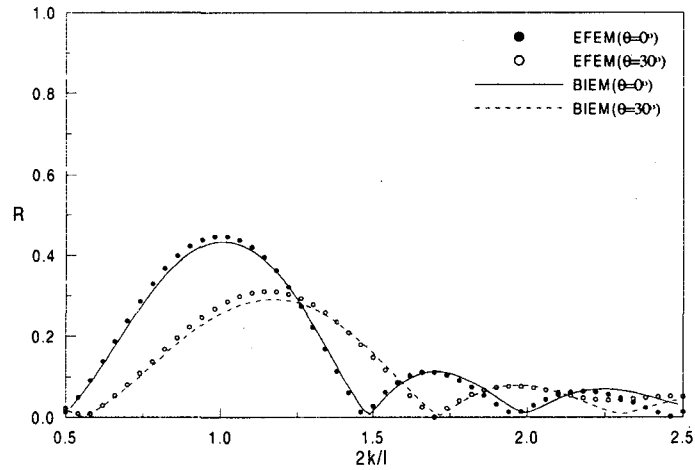


그림 2. $m=2$ 인 경우의 반사율

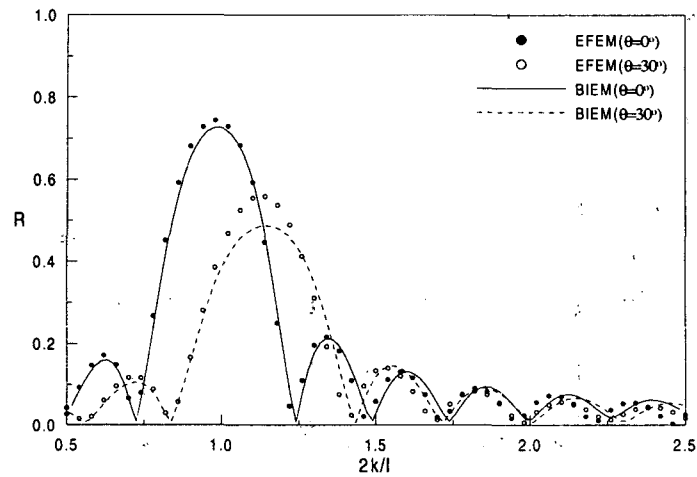


그림 3. $m=4$ 인 경우의 반사율

그림 2와 3에서 보듯이 입사파가 일정각도를 갖고 입사할 경우 수직으로 입사할 때와 비교하여 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 $\theta=0^\circ$ 에서 bragg반사에 의하여 $2k/l=1.0$ 즉, 입사파의 파장이 바닥지형 파장의 2배가 되는 조건에서 최대반사율이 발생하나 $\theta=30^\circ$ 인 경우 오른쪽으로 이동하여 $2k/l\cos 30^\circ$ 에서 최대 반사율이 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 입사파의 각도가 커짐에 따라 실제적으로 바닥지형을 통과하는 입사파의 파장이 커지기 때문이다.

아래 표 1에는 입사파랑의 입사각의 변화에 따른 최대 반사율이 발생하는 조건($2k/l\cos \theta$)이 Kirby and Darlymple(1983)과 고유함수전개법에 의한 결과와 비교되어 있다.

표 1. 입사파의 입사각에 따른 $2k/l\cos \theta$ 의 비교

	$2k/l\cos \theta$				
	Kirby and Darlymple	BIEM(m=2)	BIEM(m=4)	EFEM(m=2)	EFEM(m=4)
$\theta=0^\circ$	1.000	1.012	0.993	1.000	0.980
$\theta=10^\circ$	1.015	1.027	1.008	1.012	1.009
$\theta=20^\circ$	1.064	1.077	1.056	1.062	1.060
$\theta=30^\circ$	1.154	1.168	1.146	1.150	1.130

3.2 원호형 지형에서의 반사율 계산

원호형 지형을 파랑이 통과할 때의 반사율을 경계요소법을 적용하여 계산하였으며 고유함수전개법(Cho and Lee, 2000)에 의한 해석결과와 비교하였다.

원호형 지형의 바닥 지형은 식(11)과 같이 나타낼 수 있으며, 그림 4와 같이 도시된다. 해석결과는 그림 5와 같다.

$$\begin{aligned}
 h(x) &= h_c + \frac{r}{\tan \theta_a} - \left[\left(\frac{r}{\sin \theta_a} \right)^2 - (x - x_0)^2 \right]^{1/2}, & |x - x_0| < r \\
 h(x) &= h_c, & |x - x_0| \geq r
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

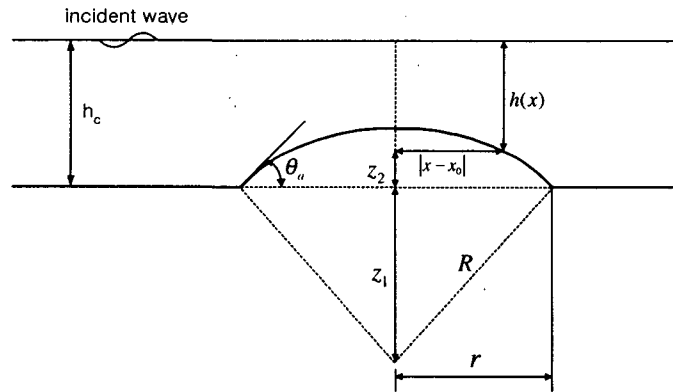


그림 4. 원호형 지형

식(11)에서 입사파 수심 $h_c=0.85$, $r=0.8$, 입사파의 주기는 1.716sec이다. x_0 는 원호형 지형의 중심이며, 기하학적으로 $h(x)=h_c - z_2$ 이며, $z_1 + z_2 = [R^2 - (x - x_0)^2]^{1/2}$ 이 됨을 알 수 있다. 원호형 지형 경사(θ_a)의 변화범위는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 이다. 즉, 원호형지형 위에서의 수심은 0.85에서 0.05까지 변한다.

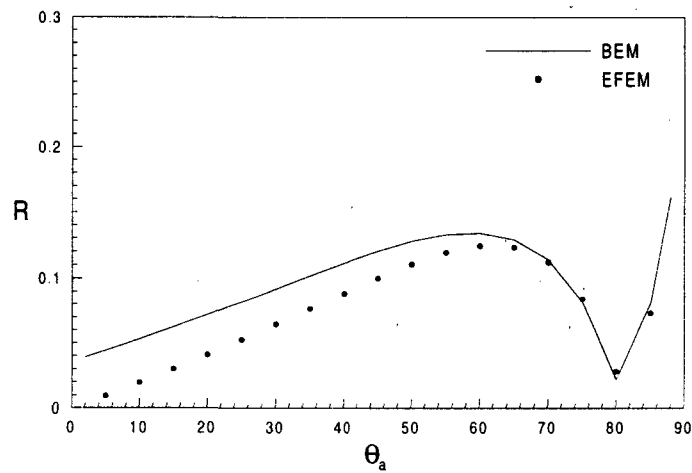


그림 5. 원호형지형에서의 반사율

그림 5에서 보듯이 원호형지형의 바닥수심이 변함에 따라 반사율이 변함을 알 수 있다. 그리고 원호형지형의 각도 $\theta \approx 80^\circ$ 에서 반사율이 0에 가깝게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 입사파성분이 바닥지형의 경사각도가 커지면서 반사파성분과 상쇄되기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

경계요소법을 이용하여 정현파형지형을 비스듬히 입사하는 파랑이 통과할 때 파랑의 반사율과 원호형 지형을 통과할 때 바닥지형의 변화에 의한 파랑의 반사율을 기존의 고유함수전개법에 의한 결과와 비교하여 해석하였다. 기존의 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있었다.

정확한 반사율의 계산은 해안침식 및 퇴적의 방지, 수중방파제 등과 같은 해저구조물의 설치에 있어 반듯이 필요할 것이므로 앞으로도 많은 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2001년 과학기술부 국가지정연구실사업(한양대학교 해안공학연구실)으로 수행되었기에 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김영택, 2001, 경계요소법을 이용한 Bragg반사 해석, 한양대학교 대학원 토목공학과 석사학위논문
- Bolton, W.E. and Ursell, F., 1973. The wave force on an infinitely long circular cylinder in an oblique sea. *Journal of Fluid Mechanics*, 75, pp. 241-256
- 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.
- 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.
- Liggett, J.A. and Liu, P.L.-F., 1983. Boundary Integral Equation Method for Porous Media Flow, George Allen and Unwin, U.K.
- Liu, P.L.-F. and Abbaspour, M., 1982. An integral equation method for the diffraction of oblique wave by an infinite cylinder. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 18, pp. 1497-1504
- Mei, C.C., 1978. Numerical methods in water-wave diffraction and radiation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 10, pp. 393-416