

Bragg 반사를 이용한 수중방파제

조용식·이정규 / 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

서 론

해안지역에서 간척과 매립을 통한 농업 및 공업단지 조성, 화력 및 원자력발전소 건설, 항만개발, 해수욕장과 같은 위락시설보존 등과 같은 연안개발사업은 엄청난 경비가 소요될 뿐만 아니라 공사규모도 대형이므로 사업수행 후 기존의 주변환경에 미치는 영향도 지대하며, 이로 인해 주변해역의 물리적 특성, 예를 들면 파랑과 조석의 방향과 크기, 주변 흐름 등이 변하게 된다. 따라서 공학적인 측면에서 효율적이고 경제적인 연안개발사업을 위해서는 사업의 계획단계에서 기초이론의 응용과 정확한 현장관측자료를 기초로 수리모형실험 또는 수치모형실험을 수행하여 최적의 설계가 이루어 지도록 해야 한다.

심해에서 발달한 파랑은 수심이 상대적으로 얕은 해안으로 전파해오면서 해저지형의 변화, 해안구조물과의 상호간섭 및 파랑상호간의 작

용에 의해 회절, 굴절, 반사 및 쇄파 등과 같은 여러 물리적 변화를 경험하게 된다. 여러 물리적 변화 중에서 연구할 충분한 가치가 있고 또한 실제문제에 쉽게 적용이 가능한 현상 중의 하나는 결정학(crystallography)으로부터 그 개념이 도입된 Bragg 반사(Bragg resonant reflection)를 들 수 있다. Bragg 반사는 해저지형이 정현파형을 갖는 사면형상(sinusoidally varying bottom topography)일 경우, 입사파의 파장이 사면 파장의 두 배일 때 공명현상으로 입사파 에너지의 상당량이 반사되는 현상을 말한다.

Bragg를 반사를 이용하여 수중방파제를 설계 및 시공할 경우, 항만내 수면교란현상과 해빈의 불필요한 침식 및 퇴적현상을 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 해안구조물을 보호할 수 있다. Bragg 반사는 또한 항만의 정온도 유지 방안에 효과적으로 이용할 수 있다. 우리나라의 경우, 수출 및 수입물량 수송의 80% 이상

이 항만을 통해 이루어지고 있으며, 기존 항만의 시설용량 부족과 항내정온도의 미확보로 인해 경제적 손실이 크게 증가하고 있어 이에 대한 대책으로 항만의 정온도 유지방안, 기존 항만의 확장 및 시설의 현대화, 그리고 신항만의 건설이 시급히 요청되고 있는 실정이다. 특히, 항만의 정온도 유지는 항만의 본 기능을 발휘하는데 필요한 기본적인 요소로서 이에 대한 대책으로 항만입구의 바닥 또는 항만입구의 측벽에 Bragg 반사가 발생할 수 있는 시설을 적절히 설치할 경우 항만내로 진입하는 파랑을 보다 근원적으로 감소시킴으로서 매우 효율적인 수면교란 저감방안이 될 수 있다(James, 1970).

Mei와 Liu(1993)에 따르면 Bragg 반사는 미국의 오대호, 일본 근해 및 여러 나라의 해안가에 존재하는 수중 사련군(submerged multiple offshore sandbars)의 형성과 관련이 있으며, 이와 같은 사련군은 해안경사가 0.005보다 작은 지형에서 주로 발견되고 있으며, 하나의 사련군은 3~17개의 사련으로 구성되어 있으며, 개개 사련간의 간격은 10~480m인 것으로 보고되었다. 수중 사련군은 해저지형의 변화에 중요한 역할을 하므로 이에 관한 연구는 매우 중요하다.

Bragg 반사에 관한 기존의 연구는 수리실험을 이용한 연구(Davies와 Heathershaw, 1984; Devillard 등, 1988; Guazzelli 등, 1992), 해석적인 방법 (Hara와 Mei, 1987; Liu와 Cho, 1993; 조와 이, 1998; Cho와 Lee, 2000)을 이용한 연구 및 수치기법을 이용한 연구(Kirby와 Vengayil, 1983; Dalrymple과 Kirby, 1986; O'Hare와 Davies, 1992; 조 등, 1995; Lee 등, 1998) 등으로 구분할 수 있다.

특히, 최근에는 Bragg 반사를 이용하여 불필요한 침식을 방지하는 수중방파제 또는 수중 트런치를 건설하여 해저지형을 보호하고자 하는 연구가 시도되고 있다(Kirby와 Anton, 1990; Bailard 등, 1992; Lamberti와 Mancinelli, 1997; Tomasicchio, 1997). 이와 같은 Bragg 반사를 수중방파제에 이용할 경우 상당한 양의 입사파 에너지를 외해로 반사할 수 있어 매우 효율적으로 해안지형 또는 해안구조물을 보호할 수 있다.

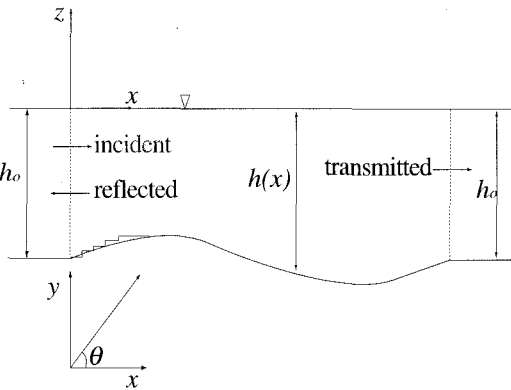
최근, 조와 이(1998)는 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)을 이용하여 임의로 변하는 수심을 지나는 파랑의 반사율을 계산하였다. 조와 이의 연구에서는 수심이 정현파형으로 변하는 지형을 일련의 매우 작은 계단으로 단순화하여 이를 통과하는 파랑의 반사율을 해석적으로 산정하였다. 보고된 반사율에는 소멸파(evanescent modes)의 효과를 고려하였으며, 해저지형에 평행으로 입사하는 파랑뿐만 아니라 비스듬히 입사하는 파랑의 반사율도 계산하였다. 계산 결과는 Davies와 Heathershaw(1984)의 수리실험 관측자료와 비교하였으며, 계산결과와 수리실험 관측자료는 잘 일치하는 것으로 보고되었다.

본 기사에서는 조와 이의 연구를 근거로 하여 계단형 및 정현파형의 형태를 갖는 해저지형에 입사하는 파랑의 반사에 대하여 기술하며, Bragg 반사의 발생에 대해서도 논의한다. 반사율에는 진행파뿐만 아니라 소멸파의 영향을 고려한다. 다음 장에서는 지배방정식과 경계조건에 대하여 서술한다. 아울러, 정현파형 지형을 일련의 계단형 지형으로 간략화하는 과정을 기술한다. 그리고 고유함수전개법에 대하여 기술하며, 고유함수전개법을 이용하여 계단형 지형과 정현파형 지형을 지나는 파랑의 반사율을 계

산하여 기존의 수리모형실험 관측결과와 비교하고 마지막으로, 결론을 기술한다. 아울러 Bragg 반사를 이용한 수중방파제의 건설에 대하여 간략히 기술한다.

지배방정식

본 연구에서 유체는 비점성(inviscid fluid)으로 가정되며, 흐름은 비압축성(incompressible) 및 비회전(irrotational) 흐름으로 가정된다. 따라서, 유체의 속도벡터 u 와 속도 포텐셜(velocity potential) ϕ 는 $u = \nabla\phi$ (여기서 ∇ 는 3차원 공간 미분연산자)의 관계로 정의되며, 유체의 거동은 Laplace 방정식에 의해 지배된다. 또한, 본 연구의 해저지형은 <Fig.1>에 도시된 것과 같이 x 축 방향으로 변하지만 y 축 방향으로서는 일정하며, 파랑은 x 축 방향에 대하여 입사각 θ 로 비스듬히 입사하는 것으로 가정하였다. 따라서, 수평성분의 파수는 각각 $k_x = k \cos\theta = l$ 및 $k_y = k \sin\theta$ 로 주어지며, y 축 방향으로서는 수심 변화가 없으므로 Snell의 법칙에 따라 k_y 는 전체 영역에서 일정하다. 또한,



<Fig.1> Schematic sketch of a representation of a sinusoidally varying topography with a finite number of small steps

해저지형의 양측은 수심이 h_0 인 지형과 연결되어 있다.

먼저, 임의의 지형을 <Fig.1>과 같이 여러 개의 작은 계단으로 나눈 다음, 미소진폭파 이론으로부터 각각의 계단에서의 속도 포텐셜을 구할 수 있다. 각 계단에서 오른쪽방향의 진행파와 소멸파를 모두 포함하는 속도 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있으며

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

왼쪽방향의 진행파와 소멸파의 속도 포텐셜은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

속도 포텐셜 (1)과 (2)에서 위 첨자 r 과 l 은 각각 오른쪽 및 왼쪽방향을 의미하며, 아래 첨자 $m=1, 2, 3, \dots$ 은 서로 다른 수심을 갖는 각각의 영역을 나타내며, $n=1, 2, 3, \dots$ 은 소멸파의 수를 나타낸다. 식 (1)과 (2)에서 첫째 항과 둘째 항은 각각 진행파와 소멸파를 나타내며, 진폭 A_m^l , B_m^l 및 A_m^r , B_m^r 은 모두 복소수이다. 또, 진행파와 소멸파의 파수 k_m 와 $k_{m,n}$ 은 모두 실수이며, 각각 다음의 분산관계식 (3)과 (4)로부터 계산할 수 있다.

$$\omega^2 = g k_m \tanh k_m h_m \quad (3)$$

$$\omega^2 = -g k_{m,n} \tanh k_{m,n} h_m \quad (4)$$

식 (1)과 (2)에 사용된 $\lambda_{m,n}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_{m,n} = (K_{m,n}^2 + k_y^2)^{1/2} \quad (5)$$

식 (1)과 (2)를 해석하기 위해서는 수심이 변하는 지점, 즉 서로 다른 수심을 갖는 지형이 만나는 지점에서 각각 두 개의 접합조건 (matching condition)이 필요하다. 첫째 접합조건은 x 축 방향의 흐름율은 연속, 즉 질량 보존을 나타내는 것으로 임의의 지점 $x=x_i$ 에서 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial x} = \frac{\partial \phi_{i+1}}{\partial x}, \quad x=x_i, \quad -h_i \leq z \leq 0 \quad (6)$$

둘째 접합조건은 다음과 같이 주어지며

$$\phi_i = \phi_{i+1}, \quad x=x_i, \quad -h_i \leq z \leq 0 \quad (7)$$

이는 자유수면에서의 압력이 연속임을 의미한다. 접합조건 (6)과 (7)에 식 (1)과 (2)로 주어진 속도 포텐셜을 대입하여 해석하면 모든 미지수를 A_i , 즉 입사파의 진폭으로 표시할 수 있으며, A_i 는 입사파의 조건으로 주어진다.

고유함수전개법

일반적으로 소멸파를 포함한 반사율과 통과율을 계산할 때 식 (1)과 (2)를 식 (6)과 (7)에 대입하면 매우 복잡한 관계식이 유도되므로 본 연구에서는 삼각함수와 쌍곡선함수의 직교성(orthogonality)을 이용하였다(Evans, 1975; Kirby와 Dalrymple, 1983; Liu 등, 1992). 다소 복잡한 계산과정을 거치면 두 접합조건으로부터 미지수가 $2(m-1) \times (n+1)$ 개인 선형행렬식을 구할 수 있으며, 행렬식을 해석하여 반사율과 통과율을 결정할 수 있다.

입사파의 진폭함수가 1, 즉 $A_i=1$ 이면 반사율 R 과 통과율 T 는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$R = |A_i|, \quad T = \frac{\cosh k_j h_j}{\cosh k_i h_i} |A_i| \quad (8)$$

위 식에서 j 는 통과율을 계산하는 영역을 나타낸다. 일반적으로, 계단의 수가 증가하면 좀더 실제 지형에 근사해지나, 계단의 수가 증가함에 따라 미지수의 수와 계산시간 또한 증가한다.

계산된 반사율과 통과율의 정확성을 검사하기 위해 다음과 같은 에너지 보존식을 사용하였다.

$$R^2 + \frac{n k_1 \cos \theta_j}{m k_j \cos \theta_1} T^2 = 1 \quad (9)$$

위 식에서 n_j 는 다음과 같이 주어진다.

$$n_j = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2k_j h_j}{\sinh 2k_j h_j} \right] \quad (10)$$

만일, 해저지형이 대칭이면, 식 (9)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

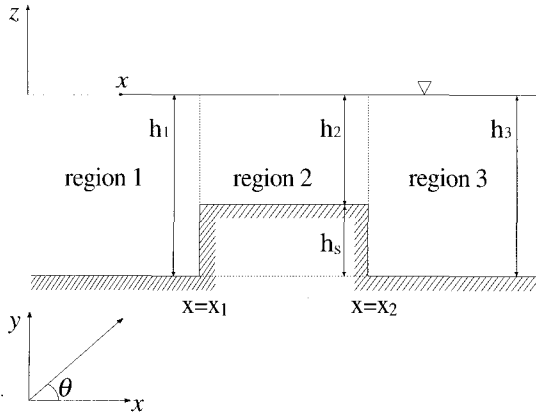
$$R^2 + T^2 = 1 \quad (11)$$

수치계산

선반형 지형

먼저, <Fig. 2>와 같이 도시된 선반지형을 통과하는 파랑의 반사율과 통과율을 계산하였다. 본 연구에서 문제를 보다 간단하게 하기 위하여 $h_1=h_3$, 입사각 θ 는 0° 의 경우에 대하여 반사율을 계산하였으며, 선반지형의 높이 h_s 는 $0.1h_1$ 부터 $0.9h_1$ 까지 변화한다. 아울러, 파랑은 심해지역부터 천해지역까지 이동하는 것으로 고려하였으며, 선반의 폭은 $w=x_2-x_1=0.5h_1$ 으로 고정하였다.

<표-1>과 <표-2>는 kh/π 가 0.01부터 1.5까지 변할 때 소멸파의 수와 선반지형의 높이에 따른 최대반사율과 이에 대응하는 통과율도도 표화한 것이다. 표에 나타난 것과 같이 소멸파



<Fig.2> Schematic sketch of a shelf

그러나, 선반지형의 높이가 증가하면 통과율의 변화 또한 커진다. 따라서, 수심이 급변하는 지형에서는 반사율뿐만 아니라 통과율의 산정에도 소멸파를 반드시 포함시키는 것이 바람직하다.

Kirby와 Dalrymple (1983)이 제안한 것과 같이 소멸파의 수가 16이면 매우 만족할만한 계산 결과를 제공하며, 소멸파의 수가 32인 경우와 비교하여 반사율과 통과율의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 전체적으로 소멸파는 2개만 포함시켜도 전혀 고려하지 않은 경우와 많은 차이가 있는 반면에 소멸파의 수가 증가하면서 반사율과 통과율의 변화폭도 작아짐을 알 수 있다.

의 유무에 따라 반사율의 변화는 매우 큰 반면에 통과율의 변화는 다소 작음을 알 수 있다.

<표-1> 소멸파의 수에 따른 반사율의 변화($\theta=0^\circ$, $\omega=0.5h_1$)

h_s/h_1	$n=0$	$n=2$	$n=4$	$n=8$	$n=16$	$n=32$
0.1	0.01786316	0.02200911	0.02396331	0.02549077	0.02556179	0.02564391
0.3	0.06152423	0.11127562	0.11335407	0.11495336	0.11555813	0.11570959
0.5	0.13227241	0.24895388	0.25483731	0.25699915	0.25779768	0.25809906
0.7	0.28205367	0.45978622	0.46345784	0.46636752	0.46724434	0.46771652
0.9	0.69813928	0.76672242	0.77986820	0.78306105	0.78418476	0.78454542

<표-2> 소멸파의 수에 따른 통과율의 변화($\theta=0^\circ$, $\omega=0.5h_1$)

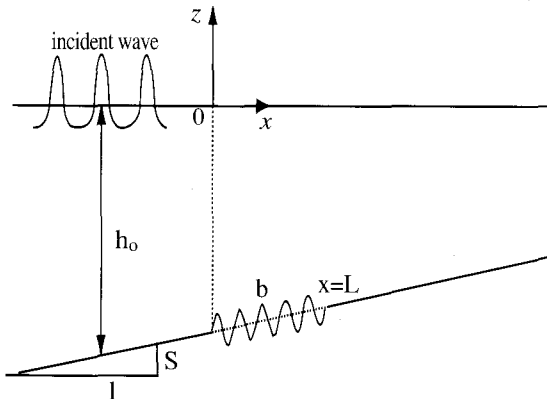
h_s/h_1	$n=0$	$n=2$	$n=4$	$n=8$	$n=16$	$n=32$
0.1	0.99984044	1.00000106	0.99999943	0.99997496	0.99997409	0.99997165
0.3	0.99810559	0.99570838	0.99530357	0.99593332	0.99491339	0.99488290
0.5	0.98121340	0.97102229	0.96923107	0.96850006	0.96821048	0.96809587
0.7	0.95939863	0.89011508	0.88768590	0.88600554	0.88546082	0.88516116
0.9	0.71591322	0.64205363	0.62615706	0.62228830	0.62078058	0.62029735

〈표-1〉과 〈표-2〉에 나타난 것과 같이 소멸파의 수가 4개 이상이면 대략 소수점 이하 2자리까지는 거의 일정한 반사율과 통과율을 제공하므로 수중방파제를 설계할 경우에는 소멸파를 4개 정도 포함시키면 무난하리라 판단된다. 참고로 〈표-1〉과 〈표-2〉의 반사율과 통과율은 모두 식 (9)로 표시된 에너지보존식을 소수점 이하 4자리까지 정확하게 만족한다.

정현파형 지형

다음은 고유함수전개법을 이용하여 정현파형의 해저지형을 통과하는 파랑의 반사율을 계산하여 수리실험결과와 비교한다. 〈Fig.3〉은 경사진 해저지형에 사런이 존재할 때 파랑이 입사하는 것을 개략적으로 도시한 것이다. 본 기사에서는 Davies와 Heathershaw(1984)의 수리모형실험에 의한 반사율과 고유함수전개법에 의한 반사율을 비교하기 위하여 해저지형의 경사는 무시 즉, $S=0$ 으로 가정한다.

Davies와 Heathershaw는 수리모형실험에서 정현파형의 해저지형을 통과하는 파랑의 반사율을 측정하였으며, 파랑의 파수(k) 대 해



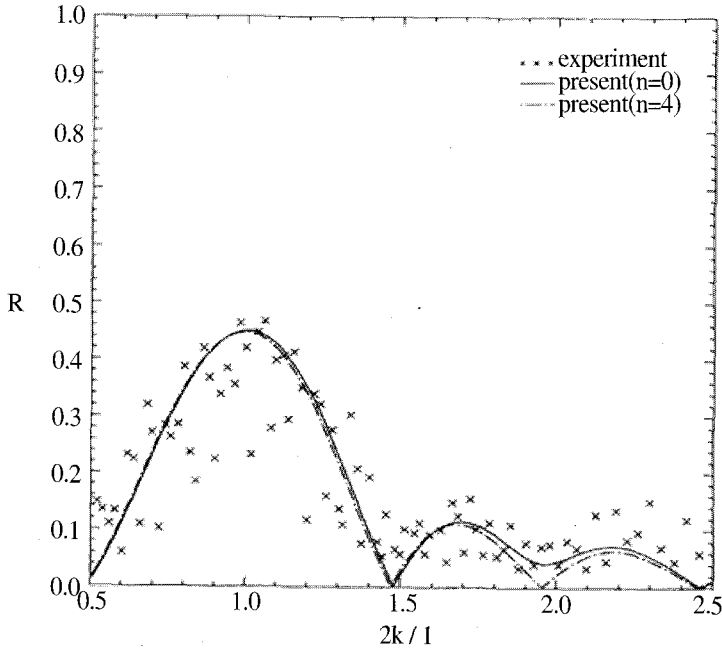
<Fig.3> Definition sketch of a sinusoidal seabed on a sloping beach

저지형의 파수(l)의 비가 $k/l=1/2$ 인 경우 반사율이 급격히 커지는 소위 Bragg 반사가 발생함을 발견하였다. 수리모형실험에 사용된 수심은 다음과 같이 정의된다.

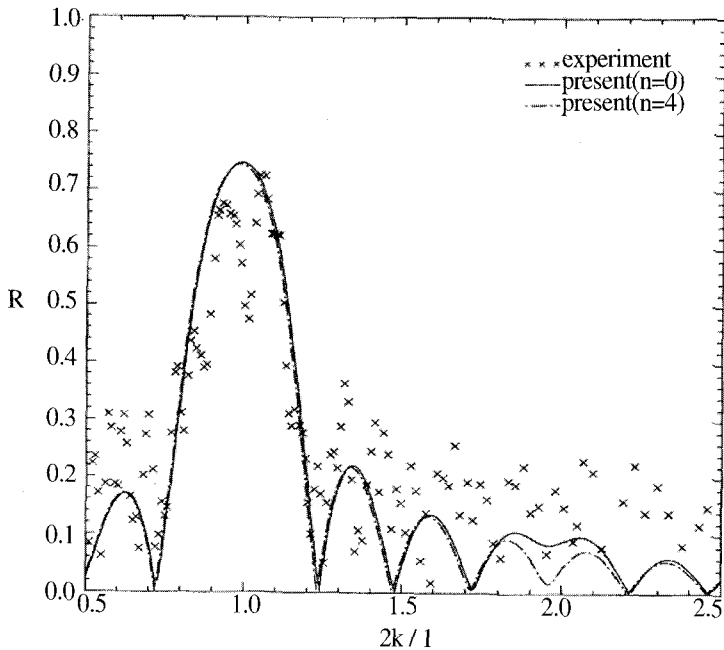
$$\begin{aligned} h(x) &= h_0, & x < 0 \\ h(x) &= h_0 - b \sin(lx), & 0 < x < 2\pi p/l \\ h(x) &= h_0, & x > 2\pi p/l \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 h_0 는 정현파형 지형의 양쪽 끝에 연결된 수심이 일정한 지역에서의 수심이며, b 와 l 은 각각 해저지형의 진폭과 파수를 나타내며, p 는 사런의 수를 의미한다. 본 연구의 고유함수전개법에 의해 계산된 반사율과 Davies와 Heathershaw의 수리실험결과에 의한 반사율과 비교하기 위해 $p=2$ 와 $b/h_0=0.32$, $p=4$ 와 $b/h_0=0.32$ 및 $p=10$ 와 $b/h_0=0.16$ 인 세 경우에 대하여 반사율을 계산하였다. 해저지형에 관한 보다 상세한 설명은 Davies와 Heathershaw를 참조할 수 있다.

〈Fig.4〉는 $p=2$, $b/h_0=0.32$ 를 이용하여 계산한 반사율을 수리실험의 결과와 비교한 것으로 본 연구의 모형을 적용하기 위하여 해저지형에서 각각의 사런은 200개의 작은 계단으로 나누었으며 소멸파의 영향을 무시한 경우, 즉 $n=0$ 인 경우와 4개의 소멸파의 성분을 고려한 경우, 즉 $n=4$ 에 대하여 계산 결과를 비교하였다. 두 경우 모두 대체적으로 실험결과와 일치하고, 특히 Bragg 반사 현상을 잘 재현하였다. 최대 반사율은 정확하게 Bragg 반사의 조건, 즉 $2k/l=1$ 에서 발생하지 않고 약간 왼쪽으로 치우쳐 발생하고 있음을 알 수 있다. 파수의 비가 2 근처, 즉 $2k/l \approx 1$ 일 경우 소멸파를 고려하지 않을 경우에 반사율이 극부적으로 증가하는 반면에 소멸파를 고려하게 되면 증가하지 않음을 알 수 있다.



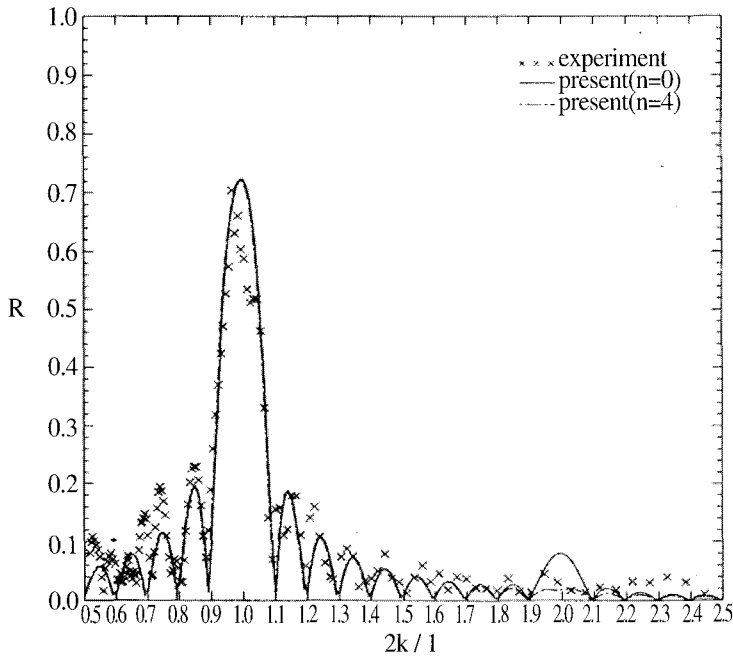
<Fig.4> Variations of the reflection coefficients over a sinusoidally varying topography($p=2, \theta=0^\circ, b/h_0=0.32$)



<Fig.5> Variations of the reflection coefficients over a sinusoidally varying topography($p=4, \theta=0^\circ, b/h_0=0.32$)

다음으로, <Fig.5>는 $p=4$, $b/h_0=0.32$ 인 경우에 고유함수 전개법으로 계산한 반사율을 역시 Davies와 Heathershaw의 수리실험의 결과와 비교한 것으로 수리실험 관측자료는 분산되어 분포하고 있다. 고유함수전개법의 결과는 관측자료보다 다소 작게 계산되었음을 알 수 있으나, Bragg 반사는 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 최대 반사율, 즉 Bragg 반사율은 70% 정도 증가했는데 이는 사런의 수가 증가하면 반사율 또한 증가하기 때문이다(조 등, 1995). 파수의 비 $2k/l$ 의 값이 증가하면서 반사율은 매우 작아지고 있음을 알 수 있는데 이는 대상영역이 깊은 수심으로 접근함에 따라 파랑이 수심의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문이다.

마지막으로, $p=10, b/h_0=0.16$ 인 경우, 즉 사런의 수는 10개, 사런의 진폭이 0.16인 경우 반사율의 변화율을 <Fig.6>에 도시하였다. 소멸파의 영향을 무시한 경우, 즉 $n=0$ 인 경우와 4개의 소멸파의 성분을 고려한 경우, 즉 $n=4$ 에 대하여 계산 결과를 Davies와 Heathershaw의 수리실험 관측자료와 비교하였다. 두 경우 모두 대체적으로 실험결과와 일치하며, 특히 Bragg 반사 현상을 잘 재



<Fig.6> Variations of the reflection coefficients over a sinusoidally varying topography($p=10, \theta=0^\circ, b/h_0=0.16$)

현하였다. 반사율은 거의 1.0에 가까운 값을 갖는데 Carter 등(1973)의 실험에 의하면 반사율이 대략 0.414보다 크게 되면 해저지형을 구성하는 입자의 운동이 시작된다고 한다. 따라서, Bragg 반사가 발생할 경우 반사율이 0.414보다 크기 때문에 입자의 운동이 시작될 수 있으며, 이는 불필요한 해저지형의 침식과 퇴적을 초래할 수 있다. 사련의 수의 10개로 증가했음에도 불구하고 <Fig.6>의 Bragg 반사율이 <Fig.5>의 최대반사율과 비슷한 것은 해저지형의 상대적인 진폭, 즉 b/h_0 이 작아졌기 때문이다. 일반적으로, 사련의 수가 증가할수록 또 사련의 진폭이 커질수록 Bragg 반사율은 증가한다.

결 론

본 연구에서는 선반형과 정현파형의 해저지

형을 통과하는 파랑의 반사율을 고유함수전개법을 이용하여 해석적으로 계산하였다. 정현파형 지형은 먼저 여러 개의 계단으로 단순화하여 각 계단에서 파랑의 회절에 의한 반사율을 계산하였다.

먼저, 고유함수전개법의 정확성을 검증하기 위해 선반형 지형을 통과하는 파랑의 반사율과 통과율을 계산하였다. 특히, 선반의 높이를 변화시키면서 다양한 조합에 따른 반사율을 계산하여 소멸파의 역할을 연구하였다. 계산된 반사율과 통과율은 파랑에너지 보존법칙을 잘 만족시킨다.

또한, 정현파형 해저지형을 통과하는 파랑의 반사율을 계산한 후 결과를 수리실험 관측자료와 비교하였다. 계산 결과는 수리실험자료와 매우 잘 일치하고, 또한 파랑의 파수(k) 대 해저지형의 파수(l)의 비가 $k/l=1/2$ 인 경우에 반사율이 커지는 소위 Bragg 반사가 발생하는 현상을 정확히 모의함을 확인하였다.

해저에 수중방파제를 건설할 경우 방파제의 높이와 폭을 적절하게 조합하여 Bragg 반사를 인위적으로 발생시킬 경우 더욱 경제적인 방파제를 건설할 수 있을 것이다. 즉, Bragg 반사 개념을 이용하여 수중에 방파제를 건설할 경우 상당한 양의 입사파 에너지를 외해로 반사할 수 있기 때문에 불필요한 해안침식과 퇴적을 효율적으로 제어할 수 있을 뿐만 아니라 해안 구조물을 보다 경제적으로 보호할 수 있을 것이다. 