

사각형형상 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사

Reflection of Random Waves Propagating over Rectangular Submerged Non-Porous Breakwaters

정 제 상* / 조 대 희** / 황 종 길*** / 조 용 식****

Jung, Jae-Sang / Cho, Dae-Hee / Hwang, Jong-Kil / Cho, Yong-Sik

Abstract

Analysis of reflection of random waves propagating over rectangular submerged non-porous breakwaters was performed by using the eigenfunction expansion method. In this study, random waves were generated by superposition of several monochromatic waves. Reflection coefficients were calculated by summing each numerical results of regular waves. Predicted results from the eigenfunction expansion method were in a good agreement with the results of laboratory measurements. Reflection coefficients of random waves were also resonated at the Bragg reflection condition.

Keywords: rectangular submerged non-porous breakwaters, random waves, Bragg reflection, eigenfunction expansion method

요 지

본 연구에서는 사각형 형상 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사를 고유함수전개법을 이용하여 해석하였으며, 수리모형실험 결과와 비교 하였다. 불규칙파는 다수의 규칙파의 중첩으로 구성하였으며, 각각의 규칙파의 해석결과를 합성하여 반사율을 산정하였다. 고유함수전개법에 의한 해석결과는 수리모형실험에 의한 결과와 잘 일치하였으며, 불규칙파 역시 Bragg 반사 조건에서 공명현상에 의해 반사율이 크게 증폭되었다.

핵심용어: 사각형형상 불투과성 수중방파제, 불규칙파, 고유함수전개법, Bragg 반사

1. 서 론

심해에서 발생한 파랑은 해저지형의 영향으로 많은 변형을 겪으면서, 해안으로 전파해온다. 해안으로 전파

해 온 파랑은 해안선의 침식과 퇴적, 해안구조물의 설계 및 안전에 영향을 미친다. 특히, 해안선의 침식은 현재 우리나라에서도 상당한 관심을 받고 있는 연구주제이다. 해안선의 침식을 방지하기 위해 이안제나 돌제

* 현대산업개발 토목사업본부
Hyundai Development Company Engineering & Construction Co., Ltd., 679-4 Yok-Sam 1-Dong, GangNam-gu, Seoul, 135-977, Korea.
(e-mail: fington@hyundai-dvp.com)

** 극동건설 토목기술2팀
Kukdong Engineering & Construction Co., Ltd., Chungmuro 3-Ga, Chung-Gu, Seoul, 100-705, Korea.
(e-mail: alakong@kukdong.co.kr)

*** 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.
(e-mail: hjk7707@ihanyang.ac.kr)

**** 교신저자, 한양대학교 공과대학 토목공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University
(e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

등의 구조물이 건설되고 있으나, 보다 친 환경적인 측면에서 볼 때, 수중방파제(submerged breakwater)의 사용이 더욱 바람직할 것이다. 일반적으로 수중방파제는 방파제 선단에서 강제로 쇄파(wave breaking)를 일으켜 입사하는 파랑의 에너지를 감소시키거나, Bragg 반사 개념을 이용해 반사파를 증폭시켜 입사파의 에너지를 감소시킨다.

Bragg 반사는 입사하는 파랑의 파장이 해저지형의 파장의 두 배가 될 때, 공명현상(resonance)에 의해 상당량의 에너지를 외해로 반사시키는 현상을 말한다. Bragg 반사는 Heathershaw(1982)에 의해 처음 연구가 시작되었다. 이 후, Kirby(1986), Yoon과 Liu(1987), Liu와 Cho(1993), Cho와 Lee(2000)에 의해 이론적 연구가 수행되었으며, Hara와 Mei(1986), Guazzeli 등(1992)에 의해 실험적 연구가 수행되었다. 최근 이와 같은 Bragg 반사 개념을 다양한 구조물에 적용한 연구도 수행되고 있다(Bailard 등, 1992; Greenwold 등, 1997; Tomasi-cchi, 1997; 조용식 등, 2002).

기존의 연구에서는 주로 규칙파를 이용하여 수중방파제의 특성을 해석하였다. 그러나, 실제 해역에서 파랑 조건은 매우 불규칙하므로, 수중방파제의 현장 적용성을 검토하기 위해 불규칙파에 대한 반사특성을 해석할 필요가 있을 것이다. 본 연구에서는 고유함수전개법(eigenfunction expansion method)을 이용하여 다열 사각형형상 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 반사율을 계산하였으며, 계산결과를 수리모형실험 결과와 비교하였다. 입사하는 파랑은 Bretschneider(1968)에 의해 제안되었고, Mitsuyasu(1970)에 의해 계수가 결정된 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하여 재현하였다. 고유함수전개법은 규칙파의 해석 모델이기 때문에, 에너지 스펙트럼을 다수의 규칙파로 분해하였으며, 각각의 해석 결과를 합성하여 불규칙파의 반사율을 산정하였다. 해석 결과는 조용식 등(2002)의 수리모형실험 결과와 잘 일치 하였으며, 불규칙파 역시 Bragg 반사 조건에서 반사율이 크게 증폭되었다. 일반적으로 효율적인 해안침식 방지를 위해서는 입사파랑 에너지의 최소 25% 이상을 반사시켜야 한다(Bailard 등, 1992). 본 연구에서는 25% 이상의 에너지를 반사하는 수중방파제의 조건을 수치해석을 통해 제시하였다.

2. 고유함수전개법

본 연구에서는 Cho와 Lee(2000)가 사용한 고유함수전개법을 이용하여 불투과성 수중방파제를 통과하는 파랑의 반사율을 산정하였다. 임의의 해저지형으로 입사

하는 입사파와 반사파, 그리고 해저지형을 통과하는 통과파를 지배하는 방정식은 미소진폭파이론에 의해 다음과 같이 주어진다. 식 (1)은 통과파와 소멸파(evanescent wave)의 속도포텐셜이며, 식 (2)는 반사파와 소멸파의 속도포텐셜을 나타낸다.

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

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

식 (1)과 (2)에서 아래 첨자 m 은 서로 다른 수심을 갖는 영역을 나타내며, n 은 고려된 소멸파의 수를 나타낸다. 진폭 A_m^+ , A_m^- , $B_{m,n}^+$, $B_{m,n}^-$ 는 모두 복소수함수이며, 진행파와 소멸파의 파수 k_m 과 $K_{m,n}$ 는 모두 실수이며, 식 (3)의 분산식으로 부터 계산할 수 있다.

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

또한, 식 (1)과 (2)에 사용된 진행파와 소멸파의 x 축 방향의 파수인 l_m 과 $\lambda_{m,n}$ 은 다음과 같이 계산된다.

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

식 (1)와 식 (2)를 해석하기 위하여 2가지의 접합조건이 필요하다. 첫째조건은 x 축 방향의 흐름율은 연속이라는 조건이다. 임의의 지점 $x = x_m$ 에서 식 (5)와 같다.

$$\int_{-h_m}^0 \frac{\partial \Phi_m}{\partial x} f_{m',n} dz = \int_{-h_{m+1}}^0 \frac{\partial \Phi_{m+1}}{\partial x} f_{m',n} dz, \quad x = x_m \quad (5)$$

둘째 조건은 압력이 연속임을 나타내며 식 (6)과 같다.

$$\int_{-h_m}^0 \Phi_m f_{m',n} dz = \int_{-h_m}^0 \Phi_{m+1} f_{m',n} dz, \quad x = x_m$$

$$f_{m',n} = \cosh k_{m'} (h_{m'} + z), \quad n = 0$$

$$f_{m',n} = \cos K_{m',n} (h_{m'} + z), \quad n > 0 \quad (6)$$

식 (6)에서 $h_m = \max(h_m, h_{m+1})$ 가 적용된다. 앞의 속도 퍼텐셜 함수인 식 (1)과 식 (2)를 식 (5)와 식 (6)에 대입하면 미지수가 $2(m-1) \times (n+1)$ 인 선형행렬식이 유도되며, 선형행렬식을 해석하여 미지수인 진폭의 값을 알 수 있다(Cho와 Lee, 2000). 그리고, 반사율은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{|A_1^-|}{|A_1^+|} \quad (7)$$

3. 수리모형실험

본 연구에서 수행된 수리모형실험은 폭 0.6m, 높이 1.1m, 길이 32.5m의 수로와 피스톤식 조파기로 구성된 단면조파장치를 이용하였다. 수리모형실험에 사용된 시설이 그림 1에 개략적으로 도시되었다.

수리모형실험에서 수심은 0.8m으로 고정하였으며, 입사하는 불규칙파의 유효파고는 4cm와 8cm를 사용하였다. 사각형형상 수중방파제의 제원은 폭과 높이가 각각 0.4m이며, 배열은 2열 및 3열을 대상으로 하였으며,

방파제는 2m간격으로 배치되었다. 방파제의 간격은 $kh = 1.0$ 인 파랑이 Bragg 반사 조건에 들어갈 수 있도록 결정하였다. 그림 2는 사각형형상 수중방파제의 제원과 배열을 나타낸 개념도이다.

수리모형실험에서 입사파와 반사파가 중첩된 다중 반사계로부터 입사파와 반사파를 분리하기 위하여 Goda와 Suzuki(1976)에 의해 제안된 2점법을 사용하였다. Goda와 Suzuki(1976)의 분리기법은 주어진 거리 내에서 중복파의 각 성분파 위상차가 일정하다는 점에서 동시파형을 이용하여 성분파 에너지 사이의 비를 산출하는 방법이다. 수심과 주기에 따라 2개의 파고계를 주기에 따라 간격을 조정하여 각각의 위치에서 파형을 측정 후 파형자료로부터 반사율을 계산하는 것이다.

이 기법을 적용할 경우 주의해야 할 점은 분리할 주파수대는 침두주파수 f_p 의 $0.6 f_p \sim 3.0 f_p$ 로 해야 한다는 것이며, 유효주파수 범위 내에서 반사율 산정을 위한 자료계측에 필요한 파고계 간격(Δl)은 다음 식 (8)을 이용하여 설정하였다.

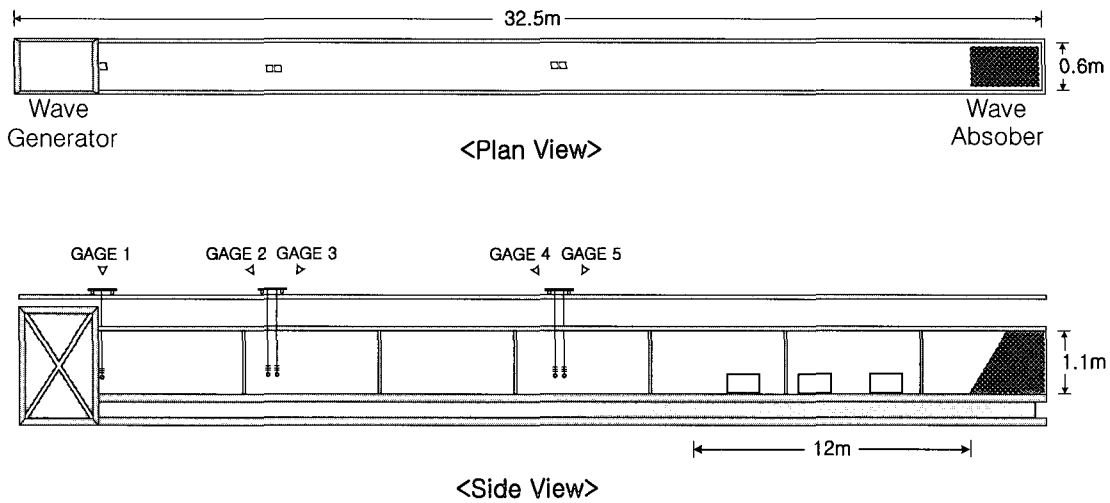


그림 1. 실험수로 개념도

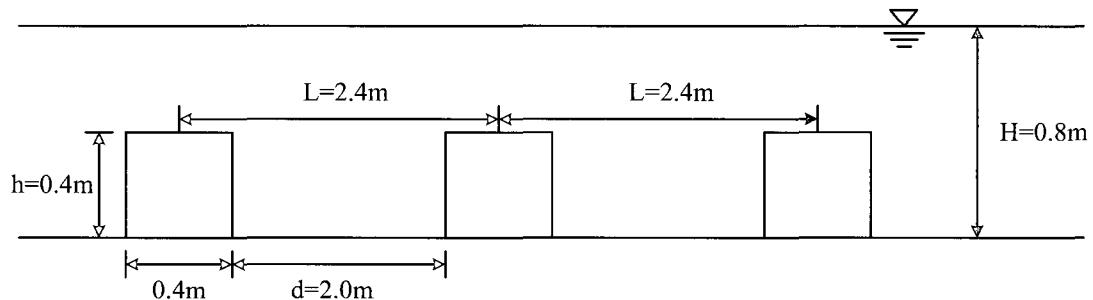


그림 2. 사각형형상 수중방파제의 제원 및 배열

$$\begin{aligned} \text{Upper lim } (f_{\max}) &: \Delta l / \lambda_{\min} \cong 0.45 \\ \text{Lower lim } (f_{\min}) &: \Delta l / \lambda_{\max} \cong 0.05 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, λ_{\min} 과 λ_{\max} 는 각각 유효주파수 범위내의 상한 값 f_{\max} 와 하한 값 f_{\min} 에 대응하는 파장이다.

4. 수치해석 및 결과분석

불규칙파의 Bragg 반사 실험에 사용된 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼식은 다음과 같다(Goda, 2000).

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp\{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}\} \quad (9)$$

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의주기, f 는 파랑의 진동수를 의미한다.

Bragg 반사 해석은 실험에서와 같이 각 유의주기에 서 파랑의 반사율을 산정하며, 본 연구에서 불규칙파의 반사계수는 다음 식으로 정의된다.

$$K_r = \frac{H_{1/3}^r}{H_{1/3}^i} \quad (10)$$

여기서, $H_{1/3}^i$ 은 입사하는 불규칙파의 유의파고, $H_{1/3}^r$ 은 반사된 파랑의 유의파고를 나타낸다. 입사파의 유의 파고는 실험조건에서 주어졌으며, 반사파의 유의파고는 다음 식으로 정의된다.

$$H_{1/3}^r \equiv H_s = \sqrt{8 \times \sum_{i=1}^{imax} b_i^2} \quad (11)$$

식 (11)에서, b_i 는 에너지밀도 스펙트럼에서 분해된 각 파랑 성분의 반사파의 진폭을 나타낸다. 각각의 반사파의 진폭은 규칙파를 고유함수전개법으로 해석한 결과로부터 구할 수 있다. 본 연구에서 $imax = 100$, $\Delta f = 0.03$ 이 사용되었다. 즉, 입사하는 불규칙파의 스펙트럼을 100개의 규칙파로 분해하였다. 반사파의 진폭 b_i 는 식 (12)을 이용하여 계산된다.

$$b_i = R_i \times a_i \quad (12)$$

여기서, a_i 는 i 번째 입사파의 진폭이며, R_i 는 각 입사파의 주기에 해당하는 반사율을 나타내며, 고유함수 전개법을 이용하여 규칙파에 대해 해석한 결과를 이용하여 구할 수 있다.

고유함수전개법을 이용한 2열 및 3열 직사각형상 수중방파제에서 불규칙파의 Bragg 반사의 해석결과와 수리모형실험 결과를 각각 그림 3과 그림 4에 비교 도시하였다. 수치해석결과는 수리모형실험에 의한 결과와 대체로 일치하였으나, 단파로 접근할수록 실험결과보다 다소 작게 계산되었다. 그림 3에서 수중방파제가 2열인 경우 유의파고가 4cm인 경우 kh 가 커지면 수리모형실험 결과가 수치해석 결과와 다소 상이한 값을 보인다. 이는 입사하는 유의파고가 매우 작음으로 인해 생기는 계측오차일 것으로 추정된다. 전반적으로 반사율이 큰 3열인 경우와 입사하는 유의파고가 8cm인 경우에 수치해석결과와 더욱 잘 일치함을 볼 수 있다. 파고가 8cm인 경우 전체 수심의 10%, 방파제를 제외한 수심의 20%에 달한다. 따라서, 파랑의 비선형성이 반사에 어느

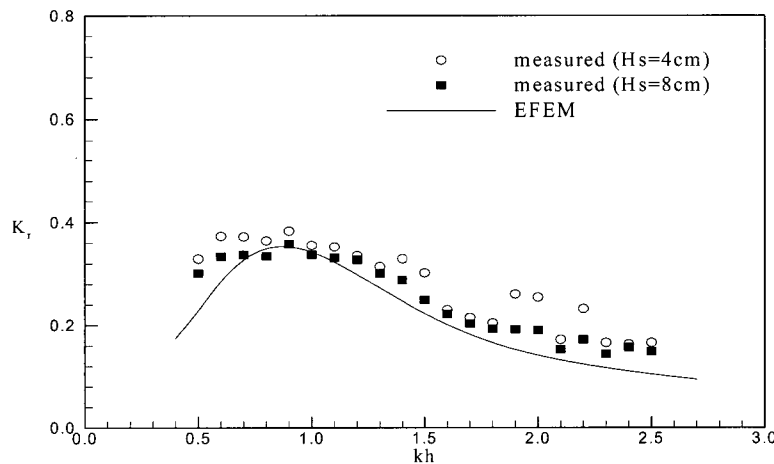


그림 3. 2열 직사각형상 수중방파제에서 불규칙파의 Bragg 반사

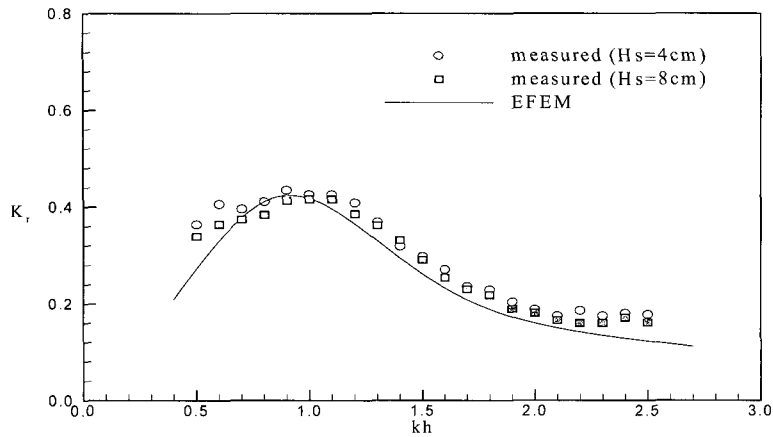


그림 4. 3열 직사각형형상 수중방파제에서 불규칙파의 Bragg 반사

정도 영향을 줄 것으로 사료된다. kh 가 작은 일부 장파 영역과 단파 영역에서 수치해석결과가 수리모형실험 결과보다 다소 작게 계산된 것도 본 모형이 비선형을 포함하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 수치해석 및 수리모형실험 결과 Bragg 반사 조건인 $kh = 1$ 부근에서 공명현상에 의해 반사율이 증폭되었다.

그림 5는 수중방파제 사이 거리의 변화에 따른 반사율의 변화를 도시한 것이다. 최대 반사율은 수중방파제 사이의 거리가 2m인 경우 0.42로 계산되었다. 방파제 사이의 간격의 변화에 따른 반사율의 크기는 조용식 등 (2002)이 규칙파에 대해서 해석한 결과와 마찬가지로 2m에서 가장 크게 나타났다.

그림 6은 수중방파제 거리 변화에 따른 에너지 반사율의 변화를 도시한 것이다. 파랑에 의한 해안침식을 방지하기 위해서는 보다 많은 양의 파랑에너지를 외해로 반사해야 한다. 불규칙파의 에너지 반사율은 식 (13)

과 같이 입사하는 모든 파랑 성분의 에너지 합과 반사된 모든 파랑 성분 에너지 합의 비로 표현된다. 그림 6에서, 에너지 반사율의 최대값은 수중방파제 사이의 거리가 2m인 경우 18.9%로 계산되었다.

$$E_r = \frac{\sum_{i=0}^{imax} b_i^2}{\sum_{i=0}^{imax} a_i^2} \quad (13)$$

그림 7과 그림 8은 수심에 대한 불투과성 수중방파제의 상대높이비(h/H)의 변화에 따른 반사율 및 에너지 반사율의 크기를 도시한 그림이다. 그림 7 및 그림 8에서 수중방파제는 4열로 구성되었다. 계산 결과, h/H 의 값이 0.5일 때, 22.1%의 에너지가 반사되었으며, h/H 가 0.7인 경우는 에너지 반사율이 52.3%에 이르렀다.

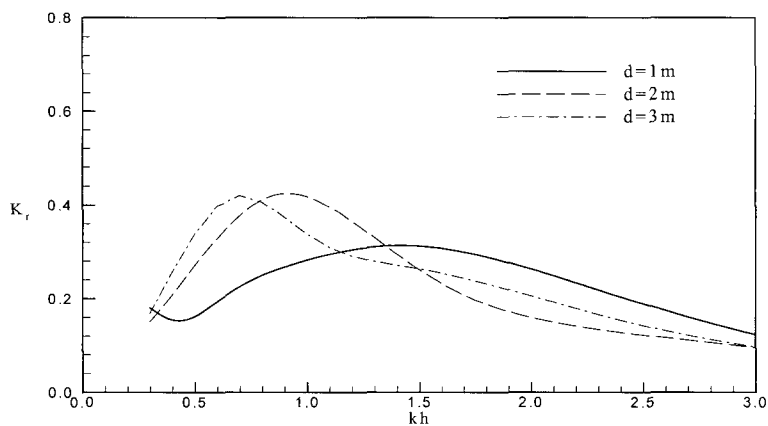


그림 5. 3열 수중방파제 사이의 거리 변화에 따른 반사율

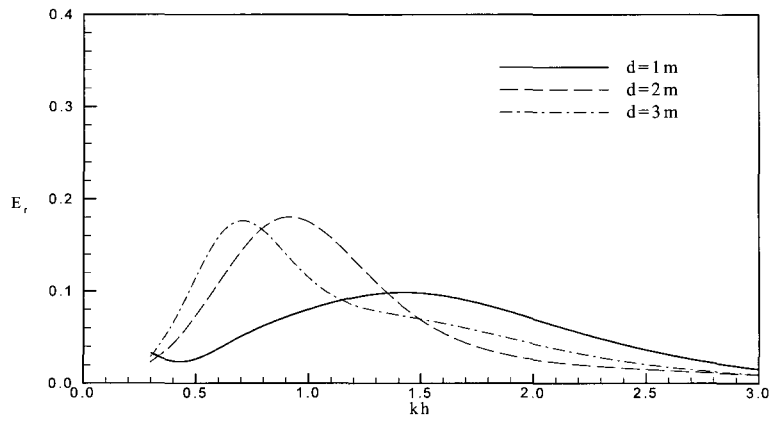


그림 6. 3열 수중방파제 사이의 거리 변화에 따른 에너지 반사율

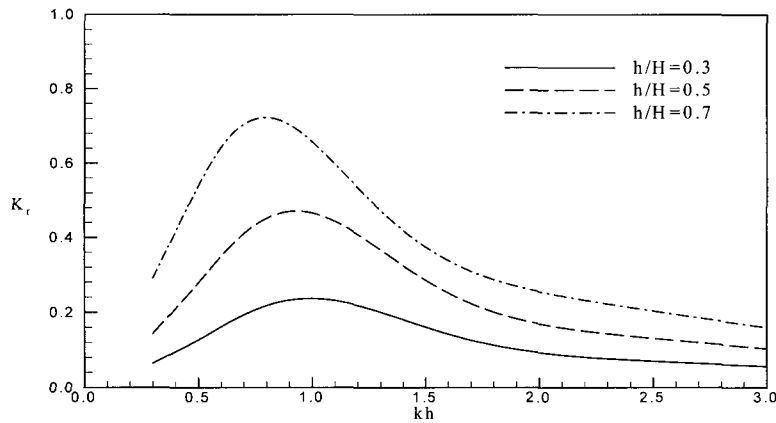


그림 7. 4열 수중방파제의 상대높이비(h/H) 변화에 따른 반사율

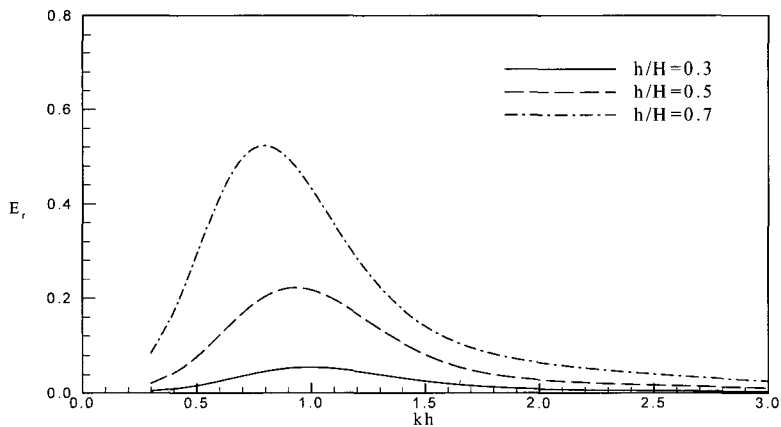


그림 8. 4열 수중방파제의 상대높이비(h/H) 변화에 따른 에너지 반사율

그림 9와 그림 10은 수중방파제의 열수(m)의 변화에 따른 반사율을 도시한 그림이다. 불투과성 수중방파제의 열수가 증가할수록 반사율은 증가하였다. 하지만, 불투과성 수중방파제의 높이 변화에 따른 반사율의 변화량보다 열수에 따른 변화량이 더 적었다. 따라서, 수

중방파제의 열수보다 높이가 파랑의 반사에 더욱 큰 영향을 끼침을 알 수 있다. 일반적으로 효율적인 해안침식 방지를 위해서는 입사한 파랑 에너지의 25% 이상을 반사시켜야 한다(Bailard 등, 1992). 그러므로, 실제 해안지역에 불투과성 수중방파제를 건설 할 경우, 2열 이

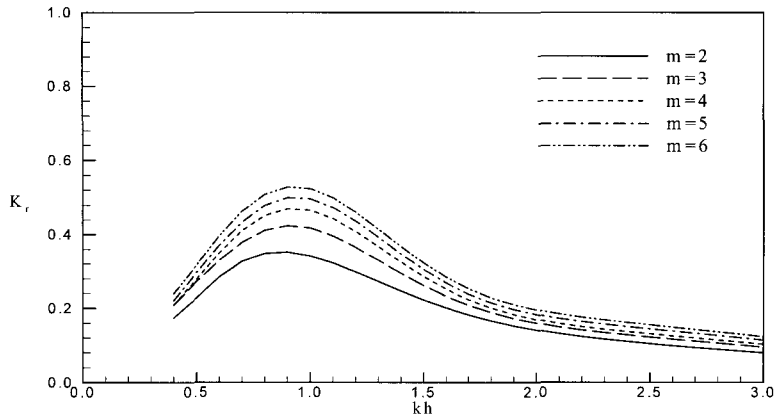


그림 9. 다열 수중방파제에서 반사율의 변화

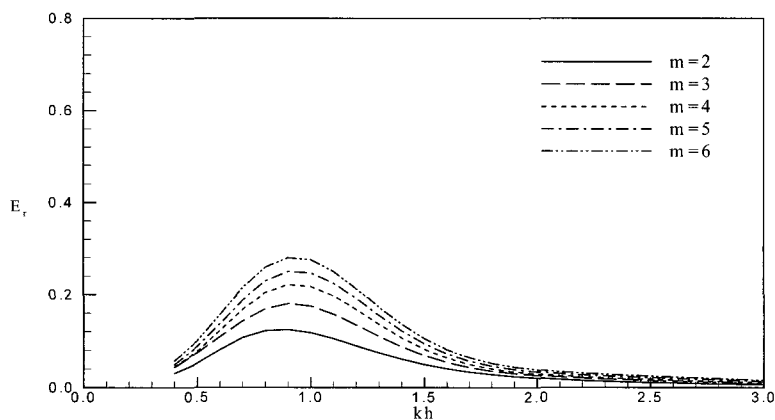


그림 10. 다열 수중방파제에서 에너지 반사율의 변화

상이면 어느 정도 Bragg 반사효과를 기대할 수 있으며, h/H 가 0.5 이상이 되면 수중방파제의 건설이 매우 효과적이라 볼 수 있다.

5. 결 론

사각형형상 불투과성 수중방파제를 통과하는 불규칙파의 Bragg 반사를 고유함수전개법을 이용하여 해석하였다. 해석 결과, 수리모형실험 결과와 잘 일치하였다. 불규칙파 역시 Bragg 반사 조건에서 규칙파와 마찬가지로 공명현상에 의해 반사율이 증폭되었다. 불투과성 수중방파제의 높이와 열수가 증가할수록 반사율은 증가하였으며, 불투과성 수중방파제 높이의 변화가 반사율의 변화에 더욱 큰 영향을 주었다.

불투과성 수중방파제의 적용성을 검토하기 위해 Bailard 등(1992)이 제시한 에너지 반사율 25% 이상을 만족하는 조건을 수치해석을 통해 계산하였다. 계산 결과, 2열 이상이며, h/H 가 0.5 이상이 되어야 불투과성 수중방파제의 건설이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 수중방파제의 적절한 제원을 찾는 연구의 기초단계로 불투과성 사각형형상 방파제만 다루었으나, 보다 다양한 형상에 대한 수리모형실험 및 이론적 연구가 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 파고가 큰 경우는 비선형성이 파랑의 반사에 어느 정도 영향을 미친다. 따라서, 비선형을 고려한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한양대학교 건설연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

조용식, 이종인, 김영택. (2002).X 사각형형상 수중방파제의 반사에 관한 수리실험. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회.X 제35권, 제5호, pp. 563-573.
Bailard, J.A., DeVries, J.W. and Kirby, J.T. (1992). "Consideration in using Bragg reflection for

- storm erosion protection." *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 118, pp. 62-74.
- Bretschneider, C.L. (1968). "Significant waves and wave spectrum." *Ocean Industry*, Feb., pp. 40-46.
- Cho, Y.-S. and Lee, C. (2000). "Resonant reflection of waves over sinusoidally varying topographies." *J. Coastal Res.*, Vol. 16, No. 3, pp. 870-876.
- Goda, Y. and Suzuki, Y., 1976. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Proc. 15th Int Coastal Eng. Conf., American Society of Civil Engineers, Reston VA, USA, pp. 828-845.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures. World Scientific, Singapore.
- Greenwold, M.D., Graff, J., Claessen, E.W.M. and Biezen, S.C. (1997). "Effect of submerged breakwater on profile development." *Proc. of the 25th Inter. Conf. on Coastal Eng.*, pp.2429-2441.
- Guazzelli, E., Rey, V. and Belzons, M. (1992). "Higher-order Bragg reflection of gravity surface waves by periodic beds." *J. Fluid Mech.*, Vol. 245, pp. 301-317.
- Hara, T. and Mei, C.C. (1987). "Bragg scattering of surface waves by periodic bars: Theory and experiment." *J. Fluid Mech.*, Vol. 178, pp. 221-241.
- Heathershaw, A.D. (1982). "Seabed-wave resonance and sand bar growth." *Nature*, Vol. 296, pp. 343-345.
- Kirby, J.T. (1986). "A general wave equation for waves over rippled bed." *J. Fluid Mech.*, Vol. 162, pp. 171-186.
- Liu, P.L.-F. and Cho, Y.-S. (1993). "Bragg reflection of infragravity waves by sandbars." *J. Geophys. Res.*, Vol. 98, pp. 22733- 22741.
- Mitsuyasu, H. (1970). "On the growth of spectrum of wind-generated waves (2)-spectral shape of wind waves at finite fetch." *Proc. Japanese Conf. Coastal Eng.*, pp. 1-7 (in Japanese).
- Tomasicchio, U. (1997). "Submerged breakwaters for the defence of the shoreline at ostia field experiences, comparison." *Proc. of the 25th Inter. Conf. on Coastal Eng.*, pp. 2404-2417
- Yoon, S.B. and Liu, P.L.-F. (1987). "Resonant reflection of shallow-water waves due to corrugated boundaries." *J. Fluid Mech.*, Vol. 180, pp. 451-469

(논문번호:04-54/접수:2004.05.24/심사완료:2004.08.11)