

수중방파제 형상에 따른 규칙파의 반사실험 Laboratory Experiments on Reflection of Regular Waves due to Submerged Breakwaters

이종인* · 김영택** · 조용식***

Jong-In Lee*, Young-Taek Kim**, and Yong-Sik Cho***

요 旨 : 본 연구에서는 규칙파를 적용한 수중방파제의 반사특성을 수리모형실험으로 조사하였다. 다양한 형상의 수중방파제에 의한 반사특성을 수리실험 및 수치적으로 검토하였으며, 실험에 사용된 수중방파제의 형상은 사각형, 삼각형, 사다리꼴 및 반원형이다. 수리모형실험 결과는 고유함수전개법을 이용하여 해석한 결과와 비교하였으며, 수리실험에 의한 반사계수가 해석에 의한 결과보다 약간 작게 나타났지만, 두 결과는 비교적 잘 일치하였다. 본 연구결과는 실제 설계에 있어 수중방파제의 형상을 결정하는데 있어 유용한 자료가 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 반사, 수중방파제, 고유함수전개법, 규칙파

Abstract □ In this study, reflection of regular waves over a train of submerged breakwaters is experimentally investigated. Wave reflection from various-shaped submerged breakwaters is examined by using laboratory experiment and eigenfunction expansion method. Shapes of submerged breakwaters are rectangular, triangular, trapezoidal and semi-circular. Laboratory measurements are compared with predicted coefficients obtained from the eigenfunction expansion method. Although measured coefficients are slightly smaller than predicted ones, the overall agreement is very good. The present study can provide a criterion for the proper choice of a shape of submerged breakwaters in practical situation.

Keywords : reflection, submerged breakwater, eigenfunction expansion method, regular wave

1. 서 론

심해에서 발생된 파랑은 해안으로 전파해 오면서 해저 지형 및 구조물 등의 영향으로 변형을 겪게 되며, 해안선의 침식과 퇴적 등에 영향을 미친다. 해안선의 변화는 일반적으로 태풍 등과 같은 이상조건에서 침식이 발생한 후 평상시 다시 회복되는 양상을 가진다. 해안선의 변화를 저감시키기 위해 건설되는 일반적인 구조물은 이안제, 인공 리프(reef), 부방파제 및 수중방파제 등을 들 수 있으며, 이러한 구조물의 주요 기능은 내습파를 쇄파시키거나 반사시켜 해안선으로 입사하는 파랑에너지를 저감시키는 것이다. 과거에 많은 연구자들에 의해 사면과 같은 해저지

형에 의한 입사파의 반사에 대한 연구가 이론적, 실험적 및 수치적으로 연구되어 왔으며, 최근에는 수중에 인공적인 구조물을 설치하여 내습파의 에너지를 차단하고 연안 침식을 방지하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

Rey 등(1992)은 사각형 형상의 수중방파제를 대상으로 반사특성을 검토하였으며, Beji와 Battjes(1993)은 사다리꼴형상의 잠체에 의한 고차성분의 파랑발생에 대해 실험적으로 검토하였다. Mallayachari와 Sundar(1996)은 사각형, 반원형 및 사다리꼴형상의 수중방파제를 대상으로 반사능을 수치적으로 검토하였으며, Ertekin과 Becker(1996)은 사다리꼴형상의 수중방파제에 의한 파랑의 회절현상을 수치적으로 검토하였다.

* 한국건설기술연구원 수자원연구부(Water Resources Research Department, KICT, 2311 Daewha-dong, Ilsan-Gu, Goyang-Si, Geonggi-Do 411-712, Korea. jilee@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부(한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정)(Water Resources Research Department, KICT)

*** 한양대학교 공과대학 토목공학과(Corresponding author, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University)

수중방파제를 이용하여 해안의 침식현상 등을 저감시키기 위해서는 수중방파제의 형상 및 배열에 따른 반사 성능의 검토가 필요하며, 본 연구에서는 수중방파제의 형상 및 배열에 따른 파랑의 반사특성을 수리모형실험을 이용하여 검토하였다. 그리고 수리모형실험과 고유함수 전개법에 의한 반사율을 계산하여 비교하였으며, 입사파는 규칙파를 대상으로 하였다.

2. 실험장비 및 반사율측정

본 실험에서 사용한 장비는 폭 1.0 m, 높이 2.0 m, 길이 56 m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기로 구성된 단면 조파장치로서 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있으며, 주기와 파고를 연속적으로 변화시킬 수 있게 설치되어 있고, 전면 30 m 구간을 강화유리로 처리하여 실험장면의 관찰이 용이하도록 되어 있다(Fig. 1참조). 그리고 조파판 전면에 파고계가 부착되어 있어 파고계에서 독취된 자료를 바탕으로 반사파 흡수식 제어가 가능하고,수로 양단(조파기 후면 및 수로 끝)에는 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다.

실험에 사용된 단면수로는 파고계와 파압계, 유속계 등을 연결하여 동시에 32채널의 자료를 얻을 수 있으며, 규칙파를 기준으로 최대파고 0.8 m의 파랑을 조파할 수 있고, 재현 가능한 파랑의 주기는 0.5 sec~7 sec이다. 그리고 반사율 측정은 2대의 용량식파고계로 구성된 장치를 이용하였으며, 반사율 측정을 위한 파고계의 최대 이격간격은 1.2 m이다. 본 실험에서는 입사파의 주기에 따라 파고계의 간격을 조정하며 반사율을 계속하였다.

반사율의 산정은 임의의 간격으로 설치된 두 개의 파고계로부터 독취된 자료를 바탕으로 Goda와 Suzuki(1976)의 방법으로 계산하였다. Goda와 Suzuki의 입반사 분리

기법은 주어진 거리 내에서 중복파의 각 성분과 위상차가 일정하다는 점에서 동시파형을 이용하여 성분파 에너지 사이의 비를 산출하는 방법이다. 이 방법은 수심과 주기에 따라 2개 파고계의 간격을 조정하여 각각의 위치에서 파형을 독취한 후 파형자료로부터 반사율을 계산하는 것이다.

유효주파수 범위내에서 반사율 산정을 위한 자료계측에 필요한 파고계 간격(Δl)은 다음 식을 이용하여 구한다(Goda와 Suzuki, 1976).

$$\begin{aligned} \text{Upper limit}(f_{max}): \Delta l/\lambda_{min} &\approx 0.45, \\ \text{Lower limit}(f_{min}): \Delta l/\lambda_{max} &\approx 0.05 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 λ_{min} 과 λ_{max} 는 각각 유효주파수 범위내의 상한 값 f_{max} 와 하한값 f_{min} 에 대응하는 파장이다. 본 실험에서는 $f_{max}=2f_t$ 와 $f_{min}=0.6f_t$ 를 적용하였으며, 여기서 f_t 는 재현하고자 하는 주기에 해당하는 주파수이다.

3. 실험파 및 실험조건

수중방파제의 Bragg반사에 대한 수리모형실험은 규칙파를 대상으로 수행하였으며, 실험파는 300 sec를 조파한 후 90 sec~300 sec 사이의 205 sec 동안의 자료를 zero-upcrossing 방법으로 분석하여 설정하였다. 실험에 사용된 파고계의 독취율은 20 Hz로서 6,000개의 자료를 독취하고, 이 중 후반부 4,096개의 자료를 분석하였다. 그리고 본 실험에서는 구조물 설치로 인한 입사파의 증폭을 방지하기 위해 실험파 설정시와 실험시에 실험장비의 흡수식 기능을 이용하여 조파판에서의 재반사를 억제하였으며, 매 실험시 입반사분리기법을 이용하여 실험파를 생성하고 조파하여 반사율을 분석하였다.

Fig. 2에 도시된 바와 같이 실험에 사용된 수중방파제

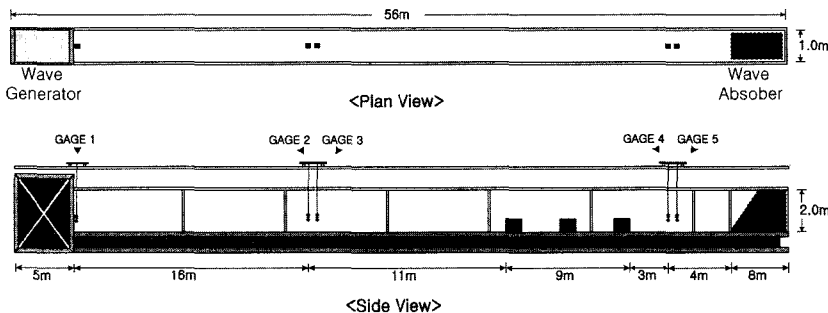
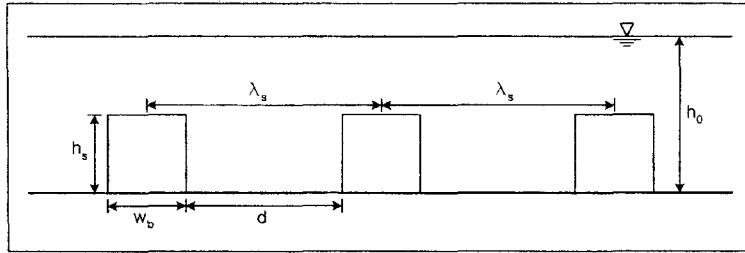
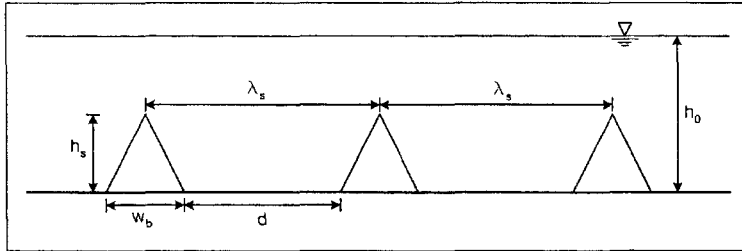


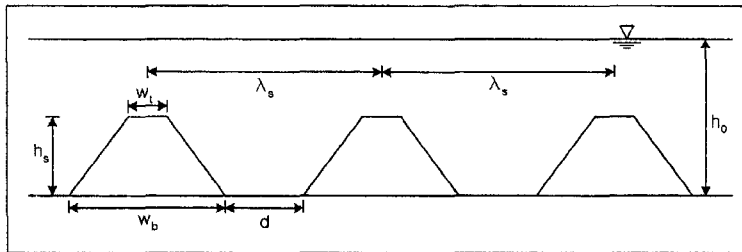
Fig. 1. A schematic sketch of wave flume.



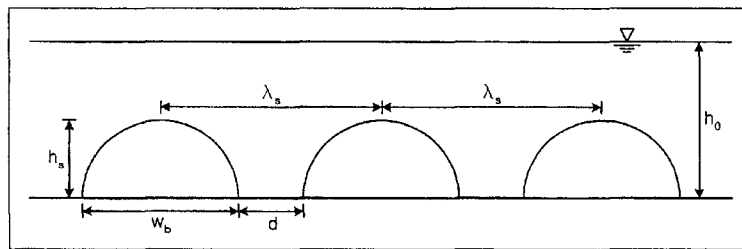
(a) rectangular



(b) triangular



(c) trapezoidal



(d) semi-circular

Fig. 2. Shapes of submerged breakwater.

의 형상은 사각형, 삼각형, 사다리꼴 및 반원형으로서 불투과성 재질로 제작하였다. 실험에 적용된 수심(h_0)은 0.8 m, 수중방파제의 높이(h_s)는 $0.5 h_0$ 에 해당하는 0.4 m, 수중방파제의 간격(d)은 2 m로서 전체 실험에서 동일하게 적용하였다. 사각형과 삼각형의 경우에 저면폭(w_b)은 0.4 m이고, 구조물의 파장(λ_s)은 2.4 m이다. 사다리꼴에 대해서는

2개의 모형을 적용하여 실험을 수행하였으며, 사다리꼴(I)은 $w_b=0.4$ m, $w_t=0.2$ m이고, 사다리꼴(II)는 $w_b=1.6$ m, $w_t=0.4$ m이다. 그리고 사다리꼴의 λ_s 는 모형(I)의 경우에 2.4 m, 모형(II)의 경우에 3.6 m이다. 반원형의 경우에는 $w_b=0.8$ m로서 반경이 0.4 m이고, $\lambda_s=2.8$ m이다.

본 실험에서는 각각의 형상별로 수중방파제가 2개 설

치된 경우($m=2$)와 3개 설치된 경우($m=3$)에 대해 반사율의 변화를 검토하였으며, 입사파의 파고는 4 cm와 8 cm 이고, 입사파의 상대수심은 $k_0h_0=0.5\sim 3.0$ 의 범위에서 설정하였다. 여기서, k_0 는 수심 h_0 조건에 해당하는 파수이며, 입사파는 h_0 조건에서 설정된다.

그리고 본 연구에서는 조용식 등(1999)이 사용한 고유함수전개법을 이용하여 수중방파제에 의한 규칙파의 반사율을 계산하여 수리모형실험결과와 비교하였다. 고유함수전개법에 관한 보다 상세한 설명은 조와 이(1998)를 참조할 수 있다.

4. 실험결과

Fig. 3~Fig. 7은 수중방파제의 형상별 반사계수(K_r)를 수리실험결과와 고유함수전개법으로 계산된 결과를 비교 도시한 것으로서, 그림상에서 $\delta=(2k_0h_0)/(k_s k_0)$ 이며, k_s 는 수중방파제의 파장(λ_s)에 대응하는 파수이다.

Fig. 3은 사각형의 수중방파제가 2열($m=2$) 및 3열($m=3$)로 배치된 경우에 대한 결과로서 $m=3$ 인 경우에 반사계수가 더 크게 나타남을 알 수 있으며, 고유함수전개법에 의한 최대 반사계수는 $m=2$ 인 경우에 $K_r=0.48$, $m=3$ 인 경우에 $K_r=0.65$ 의 값을 보인다. 수리실험에 의한 반사계수는 해

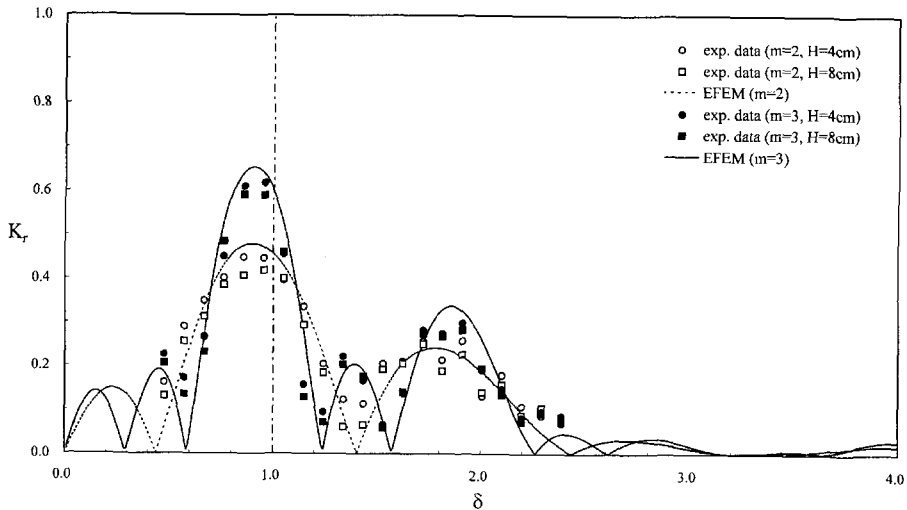


Fig. 3. Reflection coefficients of rectangular shape with δ .

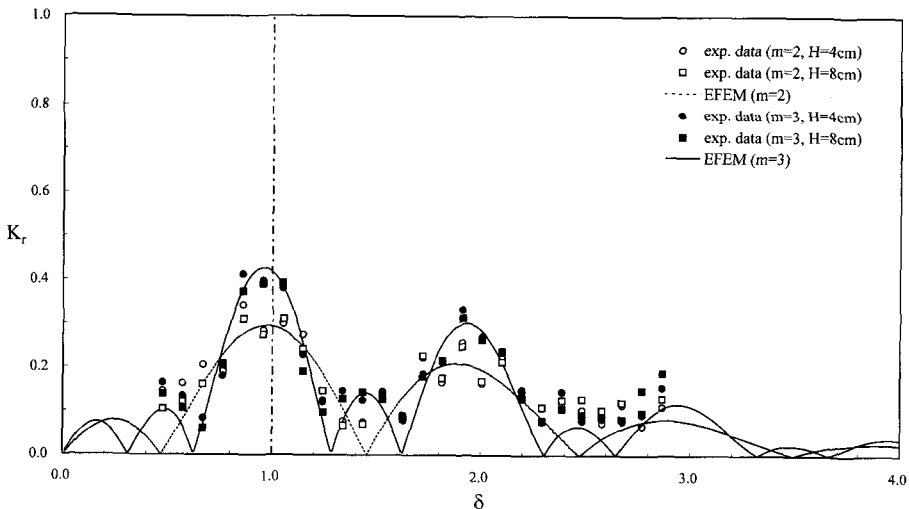


Fig. 4. Reflection coefficients of triangular shape with δ .

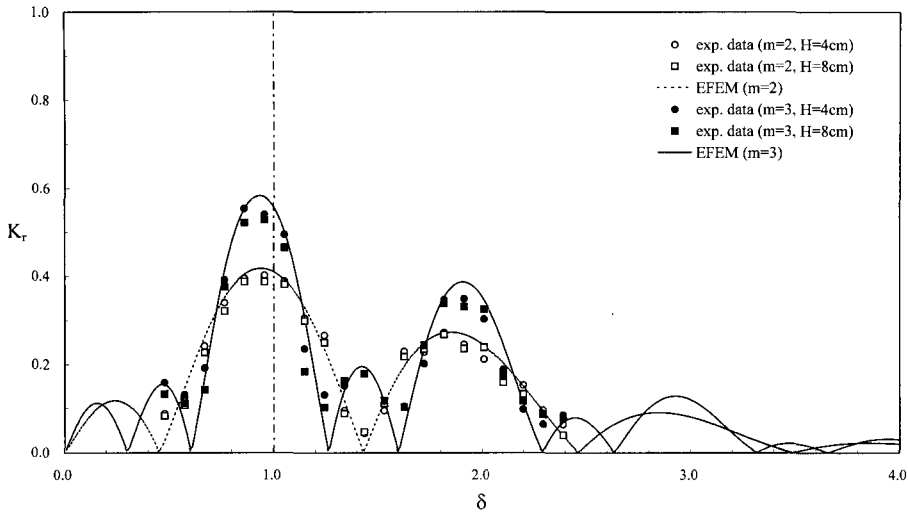


Fig. 5. Reflection coefficients of trapezoidal (I) shape with δ .

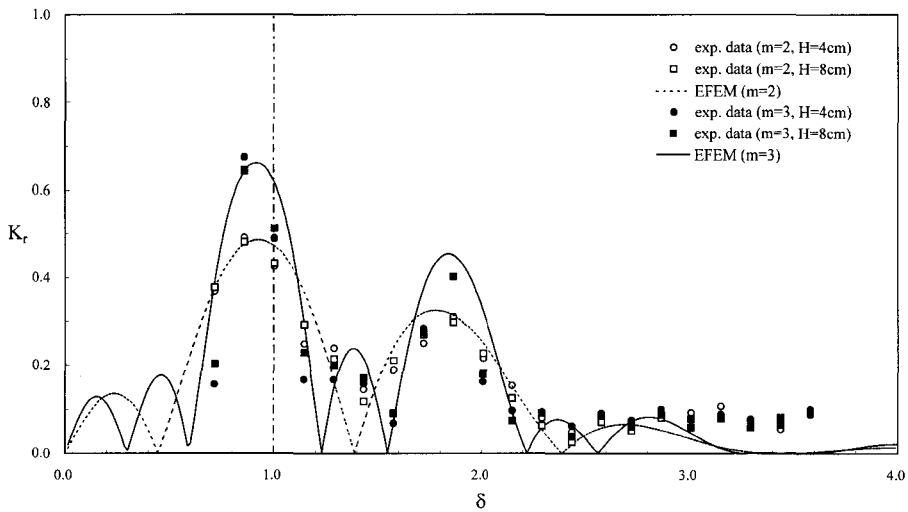


Fig. 6. Reflection coefficients of trapezoidal (II) shape with δ .

석결과보다 약간 작은 값을 보이지만, 두 결과는 비교적 잘 일치하고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 삼각형과 사다리꼴(I)에 대한 결과를 비교 도시한 것으로서 반사계수의 분포는 사각형인 경우와 동일하다. 또한, $m=3$ 인 조건에서 고유함수 전개법에 의한 최대 반사율은 삼각형인 경우에 $K_r=0.43$, 사다리꼴(I)인 경우에 $K_r=0.58$ 의 값을 보인다.

사각형, 삼각형 및 사다리꼴(I)은 수중방파제 모형의 저면폭이 동일한 경우로서 각각의 단면적은 0.16 m^2 , 0.08 m^2 및 0.12 m^2 이다. 따라서, 사각형형상에 대한 각각의 단면적의 비는 삼각형인 경우에 $A_{tri}/A_{rec}=0.5$, 사다리꼴(I)인 경우에

$A_{tra(I)}/A_{rec}=0.75$ 이고, 반사계수의 비는 $(K_r)_{tri}/(K_r)_{rec}=0.66$, $(K_r)_{tra(I)}/(K_r)_{rec}=0.91$ 로 나타난다. 반사계수는 사각형의 경우가 가장 크게 나타났지만, 모형의 단면적을 고려할 경우에는 사다리꼴(I)이 보다 경제적인 것으로 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 사다리꼴(II)와 반원형에 대한 반사계수를 도시한 것으로 해석결과와 실험결과가 전반적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 수중방파제 3열, 즉 $m=3$ 조건에서 사다리꼴(II)의 경우에 최대 반사계수는 0.66, 반원형의 경우에는 0.63의 반사계수가 산정되었다.

Fig. 8은 $m=3$, $H=4\text{ cm}$ 인 조건에서 사각형, 삼각형 및 사다리꼴(I)에 대한 반사계수를 비교 도시한 것으로서 사

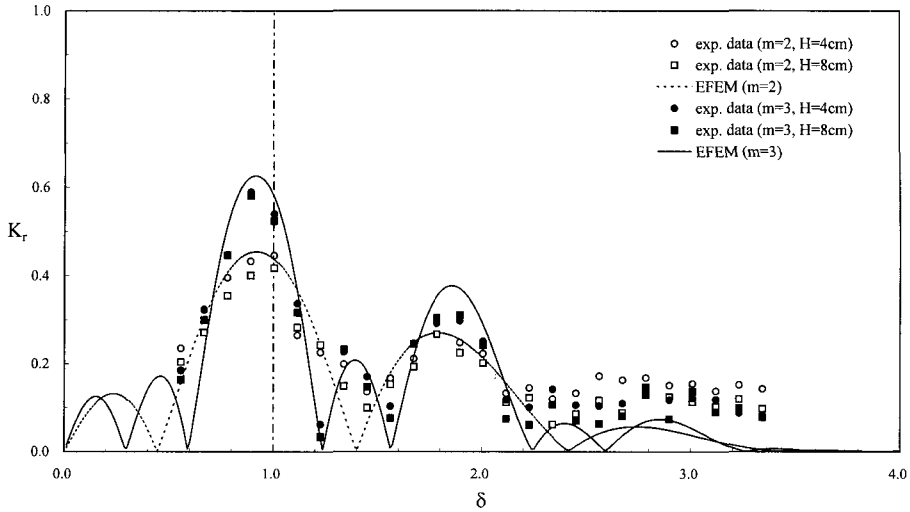


Fig. 7. Reflection coefficients of semi-circular shape with δ .

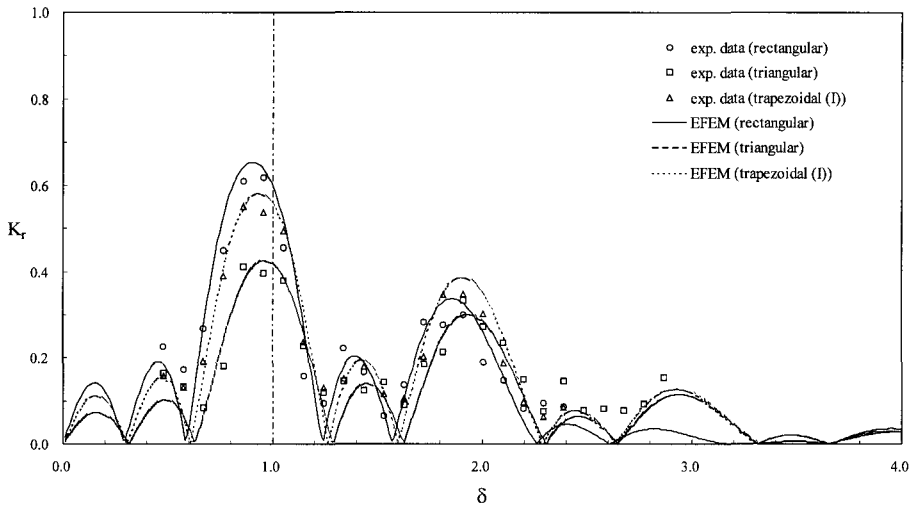


Fig. 8. Reflection coefficients of rectangular, triangular and trapezoidal (I) shapes with δ ; $m=3$, $H=4$ cm.

각형, 사다리꼴, 삼각형 순으로 반사계수가 크게 나타났다. 전반적으로 수리실험에 의한 반사계수가 고유함수전개법에 의한 결과보다 작게 나타났으며, 이는 고유함수전개법에서 파랑의 비선형성을 고려하지 않았고, 바닥마찰의 영향이 포함되지 않았기 때문으로 생각된다. 그리고 정현파형 지형(sinusoidal sea bed)에서 Bragg반사는 $\delta \approx 1$ 인 경우에 발생하는 것으로 알려져 있지만, 본 수리실험과 해석결과에서는 1보다 작은 경우에 최대의 반사계수가 나타나고 있다. 사각형의 경우에는 $\delta=0.91$, 사다리꼴(I)의 경우에는 $\delta=0.94$, 삼각형의 경우에는 $\delta=0.95$ 에서 최대반사가 발생하였다.

Fig. 9는 사다리꼴 수중방파제의 크기에 따른 반사계수의 변화를 비교한 것으로서 수중방파제의 단면이 큰 경우에 반사계수가 약간 크게 나타났으나, 그 차이는 크지 않았다. Fig. 10은 사다리꼴(II)와 반원형 수중방파제에 대한 반사계수를 비교한 것으로서 단면적이 큰 사다리꼴(II)의 경우에 반사율이 약간 크게 산정되었다.

전술한 바와 같이 정현파형 지형에서는 $\delta \approx 1$ 인 조건에서 최대의 반사율이 발생하는 것으로 알려져 있지만, 본 실험과 같은 조건에서는 $\delta < 1$ 에서 최대 반사가 발생하였다. 이러한 원인으로는 구조물 설치영역에서의 수심변화가 주된 요인인 것으로 생각된다. 즉, 일정수심 h_0 인 곳

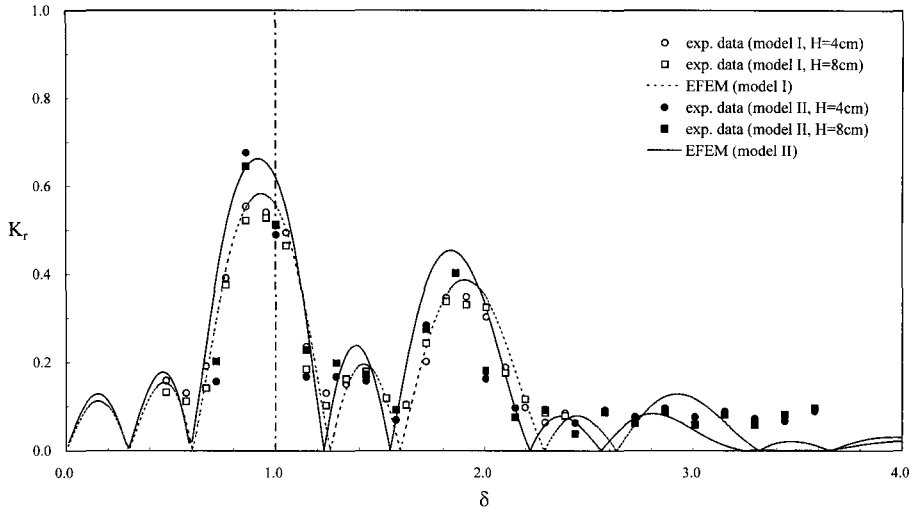


Fig. 9. Reflection coefficients of trapezoidal (I) and (II) shapes with δ ; $m=3$.

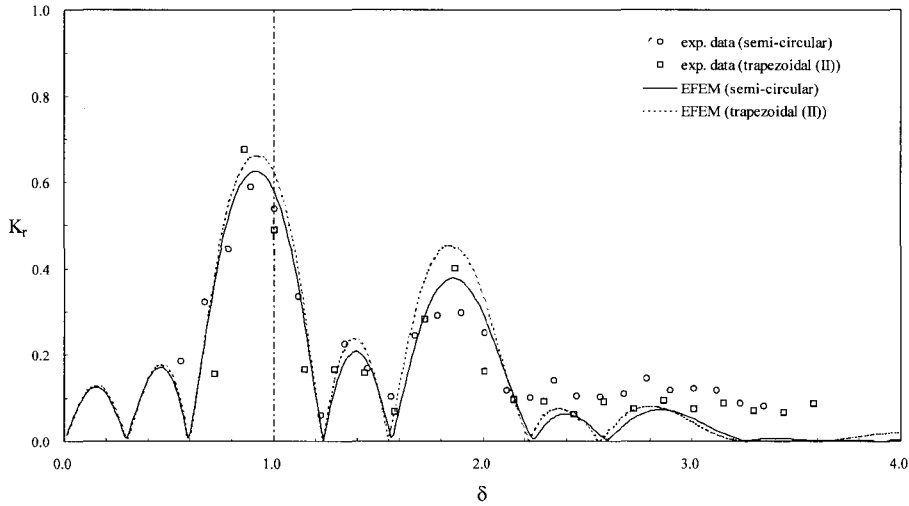


Fig. 10. Reflection coefficients of trapezoidal (II) and semi-circular shapes with δ ; $m=3$, $H=4$ cm.

에 진폭이 ρ 인 정현파형 지형이 설치되었다고 가정할 때, 정현파형 지형의 평균수심은 일정수심 h_0 와 동일하기 때문에 $\delta \approx 1$ 에서 최대 반사가 발생하는 것이다. 그러나 Fig. 2와 같이 일정수심 h_0 상에 높이 h_s 인 수중방파제가 설치된 경우에는 구조물 설치영역의 평균수심(h_0')은 h_0 보다 작아지게 된다.

본 연구에서는 각각의 수중방파제 형상에 대해 Fourier 해석을 실시하여 평균수심 h_0' 을 산정한 후, 수리실험결과 및 해석결과를 $\delta' = (2k_0 h_0)/(k_s h_0')$ 에 대해 비교 도시한 것이 Fig. 11과 Fig. 12이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수중방파제의 형상 및 크기에 관계없이 $\delta' \approx 1$ 에서 최

대 반사가 발생함을 알 수 있다(윤성범, 2003).

또한, 수리모형실험에서는 입사파의 파고가 큰 경우에 전반적으로 반사계수가 작게 나타났다. 이는 입사파의 파고가 클수록 비선형성이 증가하여 서로 다른 성분간의 상호작용이 활발해 짐으로서 에너지가 고차 성분으로 이동하기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수중방파제의 형상에 따른 반사특성을 검토하기 위해 수리모형실험과 고유함수전개법에 의한 해

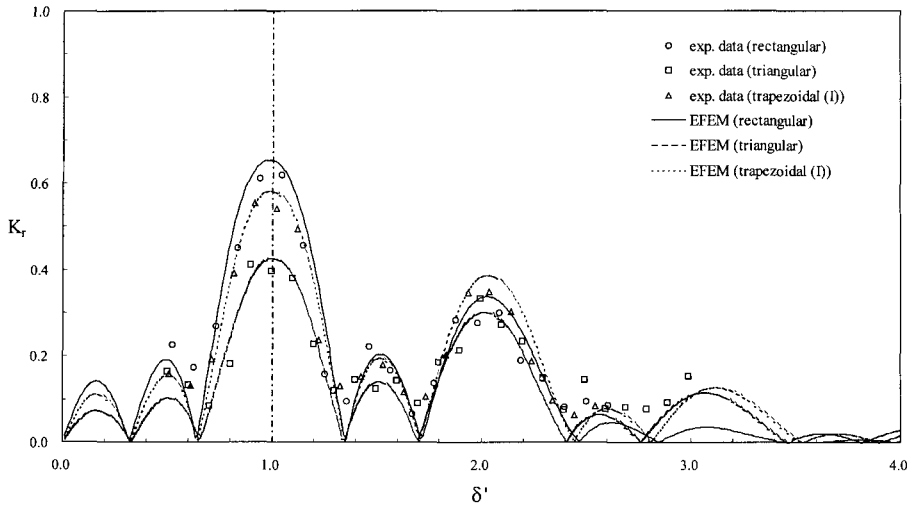


Fig. 11. Reflection coefficients of rectangular, triangular and trapezoidal (I) shapes with δ' ; $m=3$, $H=4$ cm.

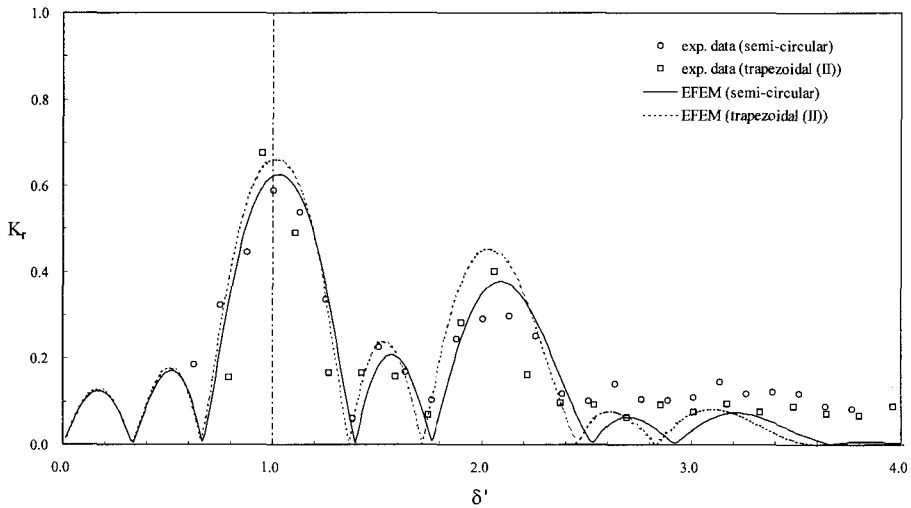


Fig. 12. Reflection coefficients of trapezoidal (II) and semi-circular shapes with δ' ; $m=3$, $H=4$ cm.

석을 수행하였으며, 두 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 수리모형실험에 의하면 입사파의 파고가 큰 경우가 작은 경우에 비해 반사계수가 약간 작게 산정되었으며, 이는 비선형성의 증가로 인해 파랑에너지가 고차성분으로 이동되었기 때문으로 생각된다. 그리고 전반적으로 수리모형실험에 의한 반사계수가 고유함수전개법에 의한 해석결과보다 작게 나타난 것은 바닥마찰과 수중방파제에 의한 에너지손실 등에 기인하는 것으로 생각된다. 아울러, 정현파형 지형과는 달리 일정수심상에 수중방파제를 설치하였을 경우에는 Bragg반사가 발생하는 주기가 정현파형 지형의 경우와 약간 다르게 나타남을 알 수 있었으며, 이는

구조물에 의한 평균수심의 영향임을 확인하였다. 그리고 수중방파제의 형상에 따라서는 사각형, 사다리꼴, 반원형 및 삼각형 순으로 반사율이 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

- 윤성범, 2003. 구두자문.
 조용식, 이종인, 김영택, 이정규, 1999. 선반지형의 크기에 따른 반사율의 변화, 한국수자원학회논문집, 32(6): 675-683.
 조용식, 이창훈, 1998. 수심이 변하는 지형을 통과하는 파랑의 반사율과 통과율 산정, 대한토목학회논문집, 18(2-4):

- 351-358.
- Beji, S. and Battjes, J.A., 1993. Experimental investigation of wave propagation over a bar, *Coastal Engineering*, **19**, pp. 151-162.
- Ertekin, R.C. and Becker, J.M., 1996. Non-linear diffraction of waves by a submerged shelf in shallow water, *Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference*, Vol. I, Part B, ASME, pp. 31-39.
- Goda, Y. and Suzuki, Y., 1976. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, *Proc. of the 15th Coastal Eng. Conf.*, pp. 828-845.
- Mallayachari, V. and Sundar, V., 1996. Wave transmission over submerged obstacles in finite fluid depth, *J. of Coastal Research*, **12**, pp. 477-483.
- Rey, V., Belzons, M. and Guazzelli, E., 1992. Propagation of surface gravity waves over a rectangular submerged bar, *J. of Fluid Mechanics.*, **235**, pp. 453-479.
-
- Received February 13, 2003
Accepted August 25, 2003