

수중 구조물에 의한 경사식 방파제의 처오름 감소에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Reduction of Run-Up Height of Sloping Breakwater due to Submerged Structure

박 승 현* / 이 승 오** / 정 태 화*** / 조 용 식****
Park, Seung Hyun / Lee, Seung Oh / Jung, Tae Hwa / Cho, Yong-Sik

Abstract

Experimental study for a submerged structure was conducted to protect coastal structures and shorelines. The rectangular submerged structure known as the most efficient shape among various submerged structures in the literature was fabricated at the nose of a rubble mound breakwater. The reflection coefficients and the run-up heights along the slope of a breakwater were measured for different significant wave heights and periods. It is found in this study that the reflection coefficient is affected more relatively by the significant wave period than the significant wave height and the run-up heights are reduced approximately 28% in terms of $Ru_{2\%}$ and 26% in terms of $Ru_{33\%}$, respectively, by the installation of a submerged structure inducing the interception and breaking of waves.

key words : submerged structure, rubble mound breakwater, reflection coefficient, run-up

요 지

연안 구조물을 보호하기 위한 대책의 하나인 수중 구조물의 성능을 검토하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 기존의 연구에서 효율이 가장 좋은 것으로 알려진 직사각형 형태의 수중 구조물을 사석 경사식 방파제 전면에 설치한 후 다양한 유의파고, 유의주기 및 수중 구조물의 높이에 대하여 반사율과 사석 경사식 방파제 전면에서의 처오름 높이를 도출하였다. 본 연구결과, 반사계수는 유의파고보다 유의주기에 대해 상대적으로 더 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 수중 구조물로 인한 파의 차단 및 쇄파 발생으로 인하여 사석 경사식 방파제 전면에서의 처오름 높이는 $Ru_{2\%}$ 를 이용하여 계산하면 대략 28% 정도 감소하였고 $Ru_{33\%}$ 로 계산할 경우 약 26%정도 감소됨을 확인하였다. 전반적으로 반사율이 증가함에 따라 처오름 높이는 증가하는 경향을 보였고, 수중구조물의 높이가 높을수록 반사율은 증가하지만 방파제로 인한 반사파가 수중구조물에 의해 재반사 되므로 결과적으로 처오름 높이는 그다지 감소하지 않음을 보였다. 그러므로 수중 구조물을 설계 및 설치 시 다양한 측면에서 경제성이나 효율성을 충분히 고려할 필요가 있다.

핵심용어 : 수중 구조물, 경사식 방파제, 반사율, 처오름

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (E-mail : pshaq@hanyang.ac.kr)

** 홍익대학교 공과대학 건설·도시공학부 토목공학전공 전임강사

*** 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사후과정 연구원

**** 정희원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr)

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라의 여건상 연안을 따라 많은 인구밀집지역과 국가기간 시설물들이 건설되어 있다. 따라서 각종 재해로부터 연안지역을 보호하는 문제는 국가적으로 매우 중요한 문제이다. 더욱이 최근 이상기온 등으로 인한 폭풍 및 지진 해일의 발생횟수 증가 및 심해 설계파고의 상승 등으로 인하여 기존 구조물의 안정성이 위협받고 있는 현실을 고려하면 내습파의 에너지를 효율적으로 제어하여 연안 시설을 보호하는 방법에 관한 연구가 절실히 요구된다.

일반적으로 내습파를 차단하는 가장 효과적인 방법은 방파제를 이용하여 파를 차단하는 방법이나, 이 방법은 건설비용 및 수리 보수비용이 많이 든다는 단점이 있으며 연안 지역의 환경오염도 초래할 수 있다. 이에 대한 대안으로 수중에 구조물을 설치하여 투과파의 에너지를 감소시키는 방법에 관한 연구가 활발히 진행중이다. 방파제 전면에 수중 구조물을 설치할 경우 수심 변화에 의해 파가 산란되거나 쇄파 현상이 발생하게 되며 이로 인해 연안 구조물에 직접적으로 도달하는 파 에너지가 줄어들게 된다. 뿐만 아니라, 수중 구조물을 설치하게 되면 구조물이 수면위로 돌출되지 않아 자연 경관과 조화를 이루는 심미적 기능까지 고려할 수 있게 된다는 장점이 있다.

수중 구조물의 주된 목적은 입사파의 에너지를 감소시켜 전달파가 해안과 구조물에 미치는 영향을 최소화시키는 것으로 많은 연구들이 수치모형 및 수리실험을 이용하여 활발히 진행되어 왔다. 수치적인 연구는 크게 사다리꼴 형상과 직사각형 형상에 대해 수행되어 왔다. Huang 등(1999, 2003)은 비정상 상태의 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 직사각형 형태의 투과성 수중 구조물 위를 통과하는 고립파의 특성을 모의하였으며, Hsu 등(2004)은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) 모델을 개발하여 2열로 설치된 수중 구조물 주변에 발생하는 와류에 대해서 연구하였다. 불규칙파에 대한 연구로는 황종길 등(2004)이 고유함수전개법을 사용하여 불투과성 수중 구조물에 대하여 연구하였고, 김도삼 등(2004)은 VOF(Volume of Fluid) 기법을 사용하여 투과성과 불투과성 수중 구조물에 대하여 수치 모의를 수행하여 비교하였다. 사다리꼴 형태의 수중 구조물에 대한 연구는 여러 수치모델(Mizutani 등, 1998; 전찬후 등, 2003; Losada 등, 2003; Lara 등, 2006)과 더불어 해석 해를 이용한 연구가 Lin 과 Liu (2005)와 Chang 등(2007)에 의해 수행되었다.

수리 실험으로는 이종인 등(2003)이 수중 구조물의 형상에 따른 규칙파의 반사계수에 대해서 수리 실험을 하였으며, Cho 등(2004)은 정사각형 모양의 불투과성 수중 구조물을 다열로 배치한 후 배열에 따른 반사계수를 실험하였다. Pinto 등(2005)은 LDA(Laser Doppler anemometry)를 사용하여 수중 구조물로 인한 수중 구조물 주변의 유속변화를 관찰하였으며, Reedy와 Neelamani (2005), Neelamani와 Sumalatha (2006) 등은 수중 구조물을 지나는 파에 의해 구조물이 받는 처오름 높이, 반사계수 및 파압에 대하여 수리 실험을 수행하였다.

안정성에 대한 실험으로 Jeng 등(2005)은 수중 구조물로 인한 기초지반의 안정성 문제와 입사파와 반사파에 의한 수중 구조물의 안정성 문제에 대해서 연구하였고, Shirlal 등(2006)은 방파제 앞에 수중 구조물을 설치하여 폭풍파에 대해 방파제의 안정성에 대하여 연구하였다. van der Meer(2005)은 LCS(Low Crested Structure)에 대해 수행된 2,300여건의 실험을 조사하여 전달계수를 구할 수 있는 경험식을 산정하였으며 Johnson 등(2005, 2006)은 3차원 수리모형 실험을 통하여 수중 구조물의 영향으로 인한 쇄파, 해류 및 파랑 변형에 대하여 연구하였다.

수중 구조물에 관해 많은 연구 수행되었지만 대부분의 연구가 수중 구조물 자체에 초점이 맞추어져 수행되었으며 Reedy 와 Neelamani (2005) 그리고 Neelamani 와 Sumalatha (2006) 등은 우리나라에서 거의 사용하지 않는 직립벽 방파제에 대하여 실험을 수행하였기 때문에 그 결과를 우리나라 현장에서 사용하기에는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 우리나라에서 널리 사용되고 있는 사석 경사식 방파제의 전면에 수중 구조물을 설치하여 수중 구조물의 존재가 사석 경사식 방파제에 미치는 영향을 분석하였다. 수중 구조물의 형태는 기존의 여러 연구에서 반사율이 가장 높은 것으로 보고된 직사각형 형태의 수중 구조물을 사용하였으며, 수중 구조물의 높이에 변화를 주면서 수리실험을 수행하였다.

2. 수리실험

2.1 실험 장비

수리실험에 사용한 수조는 Fig. 1과 같다. 길이 32.5 m, 폭 0.6 m, 높이 1.1 m이며 한쪽 면이 유리로 되어 있어 수로 내에서 발생하는 변화를 관찰할 수 있게 되어 있다. 수조 한쪽 끝에는 피스톤 타입의 조파 장치가 설치되어 있고 반대편 끝 부분에는 파의 반

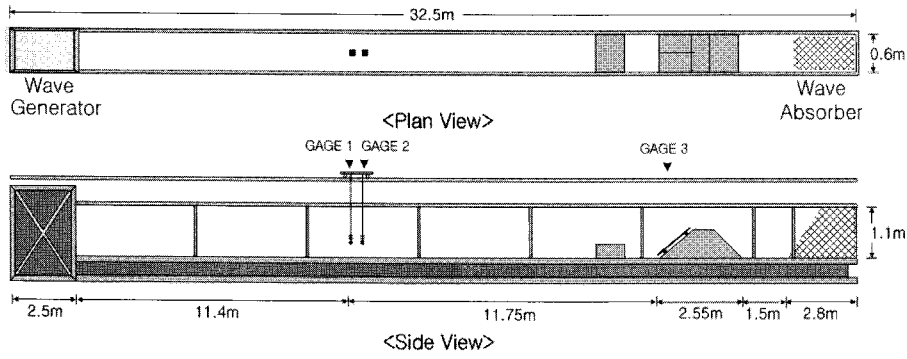


Fig. 1. Outline sketch of the wave flume

사를 최소화 시키기 위해서 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다. 이 소파장치로 인하여 수로 내에 어떠한 구조물도 없는 경우 평균 반사율은 약 8 % 정도가 된다.

콘테서 타입의 파고계 KENEK CHT6-50 2개를 조파관으로 부터 각각 11.4 m와 11.4 m + Δl 떨어진 곳에 설치하여 파고를 측정한다 다음 Goda and Suzuki (1976)가 제안한 2점법을 사용하여 입사파와 반사파를 분리하였다. 여기서, Δl 은 입사파의 유의주기에 의해 결정되는 값이다. 다른 한 개의 파고계는 KENEK CHT4-100 으로 Fig. 2와 같이 사석 경사식 방파제 구조물 전면에 경사지게 설치하여 처오름을 측정하였다.

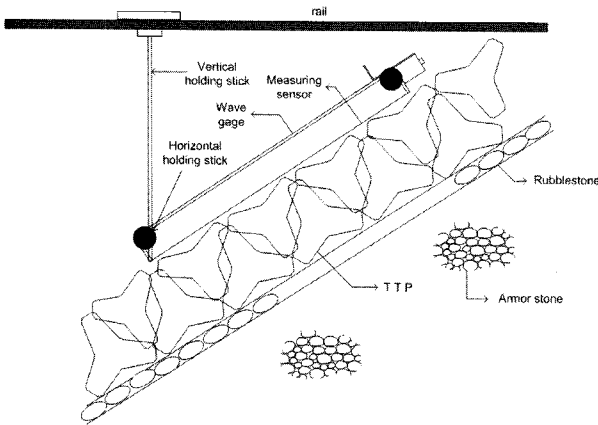


Fig. 2. Schematic of run-up measuring apparatus

수중 구조물은 불투과성 직사각형태의 구조물을 사용하였으며 방파제는 공극률 50% 인 투수성 사석을 사용하여 설치하였다. 사석 경사식 방파제의 높이는 수조 바닥에서부터 0.9 m 이고 제체는 중앙입경이 0.03 m이고 평균 무게가 21.8 g인 쇄석을 중간피복석 및 속채움 사석으로 사용하고 그 위에 평균 무게가 640 g인 테트라포트 모형을 사용하여 복층구조의 파

복층을 만들었다. Fig. 3 은 수중 구조물 및 경사식 방파제의 설치 모습이다.

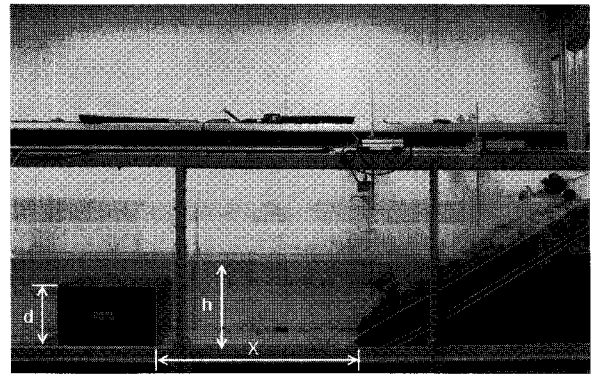


Fig. 3. Picture of submerged structure and rubble mound breakwater

2.2 실험 방법

불규칙파를 재현하기 위하여 식 1과같이 표현되는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼 (Goda, 2000) 을 사용하였다.

$$S(f) = 0.205 H_s^2 T_s^{-4} f^{-5} \exp[-0.75(T_s f)^4] \quad (1)$$

여기서, $S(f)$ 는 파 에너지 밀도이고, H_s 는 유의파고, T_s 는 유의주기, 그리고 f 는 주파수를 나타낸다. 입·반사파를 분리한 후 Goda and Suzuki (1976)가 제안한 방법을 사용하여 반사율을 다음과 같이 구하였다.

$$K_r = \sqrt{\frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_I(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_R(f) df}} \quad (2)$$

여기서, f_{\max} 및 f_{\min} 은 주파수의 최고값 및 최소값을 의미한다.

Table 1. Experimental Conditions

No.	Variable	Expression	Values
1	Significant Wave Height	H_s	0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14 m
2	Significant Wave Period	T_s	1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0 sec
3	Submerged Structure Width	B	0.5 m
4	Submerged Structure Height	h	0.25, 0.35 m
5	Structure Distance	X	1.0 m
6	Water Depth	d	0.5 m

수리 실험 조건은 Table 1에 나타난 것처럼 수심 (d)은 0.5 m, 수중 구조물의 폭(B)은 0.5 m, 수중 구조물과 방파제 사이의 거리(X)는 1.0 m, 수중 구조물의 높이(h)는 0.25 내지는 0.35 m로 고정시킨 후, 유의파고값과 유의주기값에 변화를 주면서 약 5분 동안 대략 6000개의 자료를 취득하였다. 측정된 자료의 신뢰성 확보 및 Fourier 급수를 이용한 자료 계산의 용이성을 위하여, 초기에 측정된 약 2000개 정도의 자료는 계산에서 제외시키고 나머지 자료 중 4096 ($=2^{12}$)개의 자료를 이용하여 반사율 및 처오름 값을 계산하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 반사율

파에 의한 수중 구조물과 방파제간의 상호작용을 알아보기 위하여 먼저 반사율을 계산하였다. 수중 구조물만 설치된 경우, 반사율은 다양한 유의 주기 및 유의 파고에 상관없이 거의 일정한 값을 보여주는

($h/d=0.5$ 인 경우, $K_r \approx 0.26$ 이고, $h/d=0.7$ 인 경우, $K_r \approx 0.40$) 반면, 사석 경사식 방파제만 있는 경우는 유의 주기에 대하여 반사율의 변동폭이 상대적으로 유의 파고에 대한 변동폭보다 크게 나타남을 보였다. 이러한 결과로부터 반사율 변화는 수중 구조물에 의한 영향보다는 방파제의 영향을 더 많이 받음을 알 수 있다. Fig. 4는 상대폭(B/d)이 1.0, 상대거리(X/d) 2.0인 조건에서 유의파고를 고정한 후 유의주기에 변화를 주면서 반사율을 계산하여 나타낸 것이다. 상대높이(h/d)가 0.5인 경우 대부분의 유의주기에서 유의파고가 증가함에 따라 반사율이 감소하는 경향이 나타났다. 상대높이(h/d)가 0.7인 경우, 유의주기가 긴 경우에는 유의파고가 증가함에 따라 반사율 값은 꾸준히 감소하는 경향을 보였으나 유의주기가 작은 경우에는 유의파고가 증가함에 따라 반사율 값은 감소하다가 증가하거나, 증가하다가 감소하는 불규칙적인 경향을 보였다. 이는 입사파가 상대높이가 높은 수중 구조물을 지나면서 생기는 쇄파의 영향으로 해석할 수 있다.

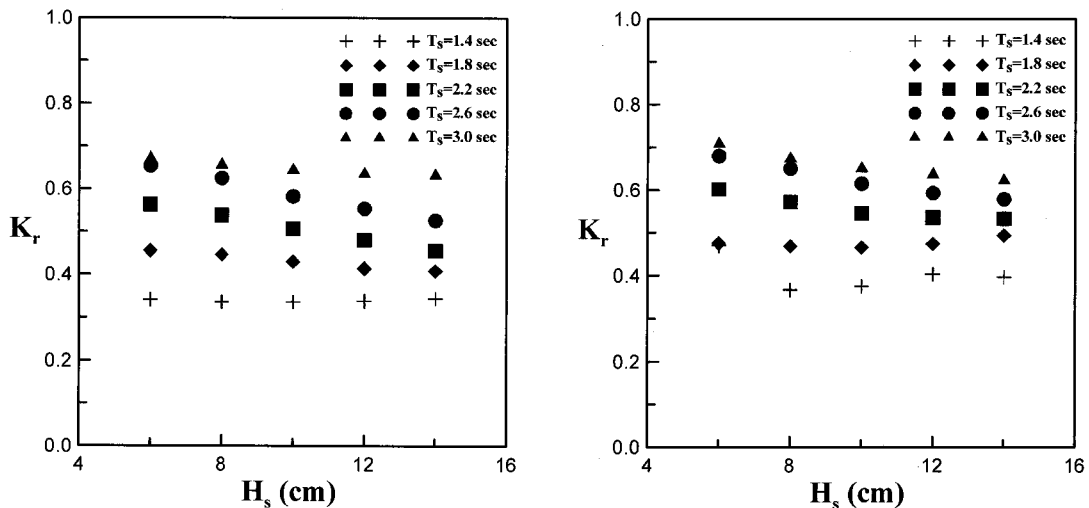


Fig. 4. Reflection coefficients for different significant wave periods:

(a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

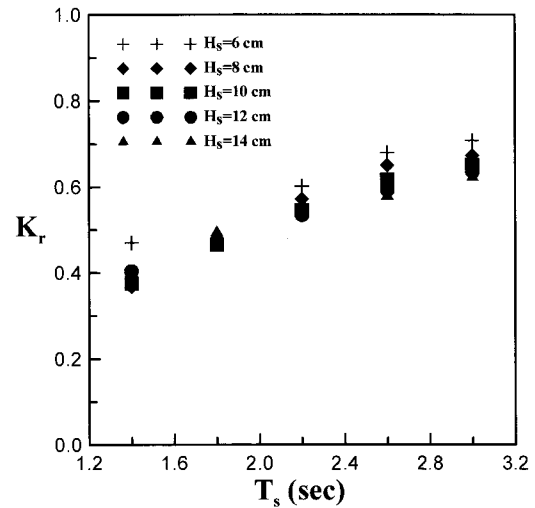
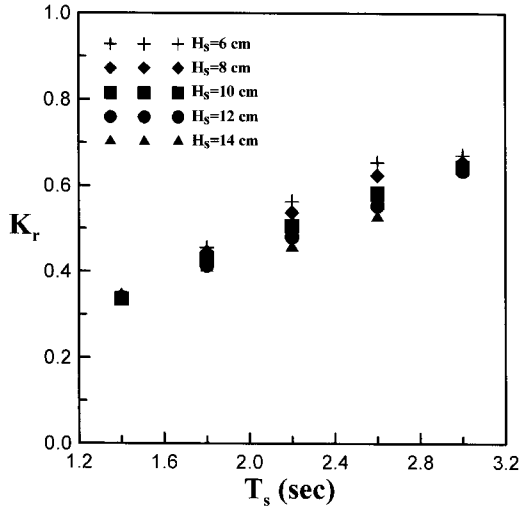


Fig. 5. Reflection coefficients for different significant wave heights:
(a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

Fig. 5는 상대폭(B/d)이 1.0, 상대거리(X/d) 2.0 인 조건에서 동일한 유의파고 값에 대해 입사파의 유의주기를 변화시키면서 주면서 반사율을 계산한 결과이다. Fig. 5의 결과와는 상이하게 상대높이(h/d)가 0.5 및 0.7인 두 경우 모두 유의파고 값에 상관없이 유의주기가 증가함에 따라 반사율이 증가하는 것을 알 수 있다. Figs. 4 및 5의 결과로부터 유의주기 값은 반사율에 크게 영향을 미치나 유의파고 값은 반사율에 그다지 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.2 처오름

수중 구조물이 사석 경사식 방파제에 미치는 영향을 알아보기 위해 방파제 전면에서의 처오름 값을 계산하였다. 처오름 값은 Fig. 6과 같이 방파제 전면에서 파고계를 경사지게 설치하여 수면 변위를 시간에 따라 측정 후 식 (3)의 관계식을 이용하여 계산하였다. 또한, zero-upcrossing 기법을 이용하여 방파제 설계의 기초 자료가 되는 $Ru_{2\%}$ 및 $Ru_{33\%}$ 를 계산하였다. 여기서, $Ru_{2\%}$ 는 취득한 자료(sampling data)의 상위 2%의 평균값을 의미하며 $Ru_{33\%}$ 는 상위 33%의 평균값을 의미한다. 본 연구에서는 각 실험 경우에 대하여 5분 동안 측정된 전체 자료 중 유효 자료 4096개에 대하여 상위 2%에 있는 82개의 자료 값을 평균한 것을 $Ru_{2\%}$ 로, 상위 33%인 1352개의 자료 값을 평균한 것을 $Ru_{33\%}$ 로 각각 계산하였다.

$$R_d = L_s \sin \theta \quad (3)$$

여기서, L_s 는 파고계에 기록된 수면변위 값이며 θ 는 파고계의 경사각이다.

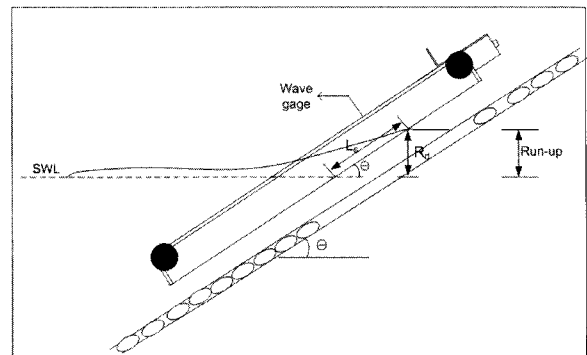


Fig. 6. Calculation of wave run-up height

수중구조물의 상대폭(B/d) 및 상대거리(X/d)를 Fig. 5의 조건과 동일하게 한 후, 입사파의 유의파고 값에 변화를 주면서 처오름 높이를 측정하였다. Fig. 7에서는 유의 파고 10.0 cm에 대해 유의주기값에 변화를 주면서 처오름 높이를 입사파의 유의파고 값을 이용하여 무차원화 시킨 값($Ru_{2\%}/H_s$, $Ru_{33\%}/H_s$)으로 나타내었다. 전체적으로 입사파의 유의주기가 증가함에 따라 처오름 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 일부 자료를 제외하곤 전체적으로 수중 구조물이 존재하는 경우, 처오름 높이가 감소함을 알 수 있고, 또한, 수중 구조물의 상대높이(h/d)가 증가할수록 처오름 높이는 감소함을 알 수 있다. 일부 구간에서는 수중 구조물이 설치된 경우의 방파제 전면에서의 처오름 높이가 수중 구조물이 설치되지 않은 경우의 처오름 높이보다 크게 발생하는데 그 이유로는 특정한 조건에서 방파제에 의해 반사된 파가 수중 구조물에 의

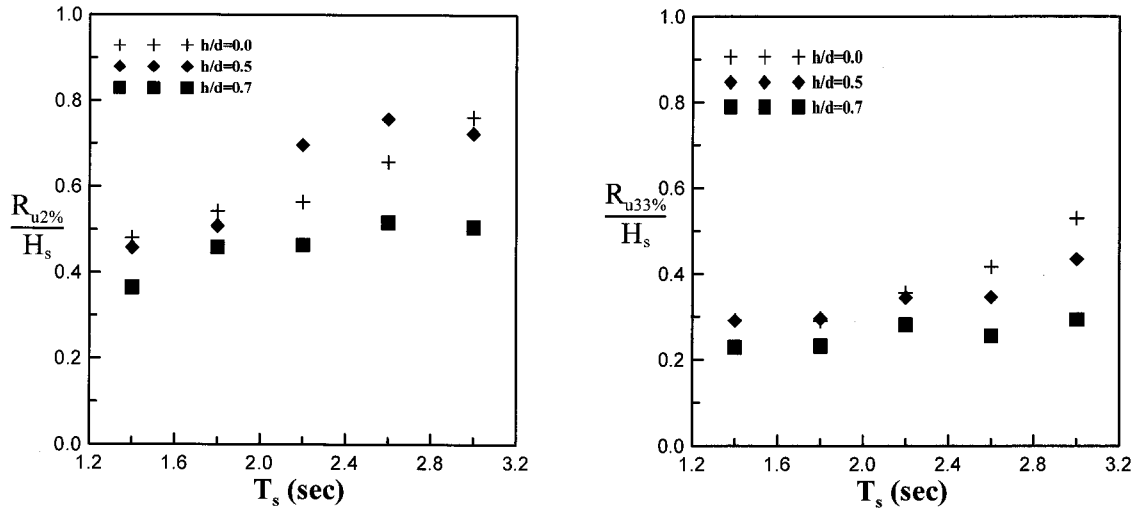


Fig. 7. Dimensionless wave run-up height versus significant wave period for different heights of submerged structure:(a) for $Ru_{2\%}$ (b) for $Ru_{33\%}$

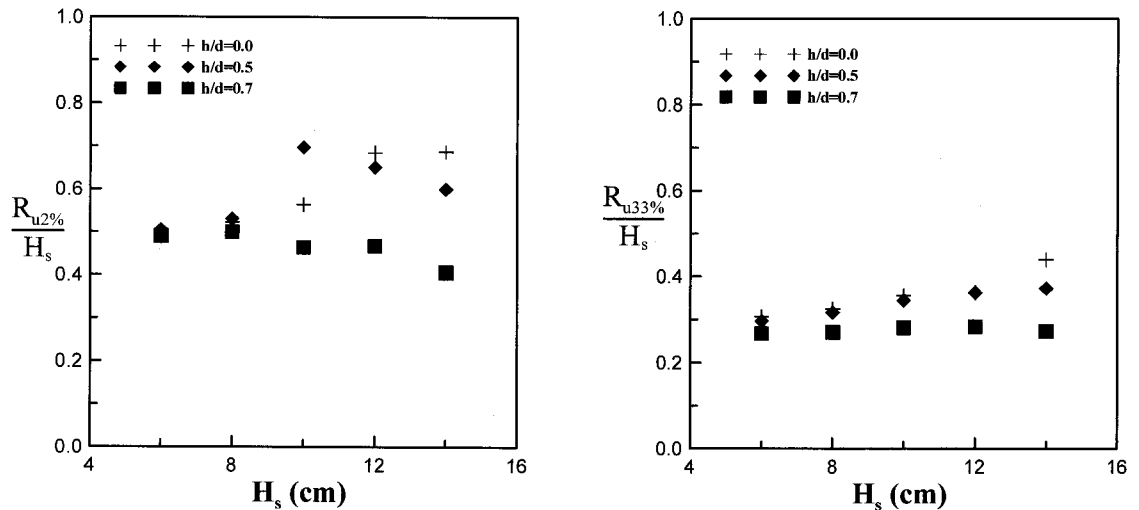


Fig. 8. Dimensionless wave run-up height versus significant wave height for different heights of submerged structure: (a) for $Ru_{2\%}$ (b) for $Ru_{33\%}$

해 재반사되어 생기는 영향 또는 수중 구조물과 방파제 사이의 거리에 의해 투과파와 방파제에 의한 반사파가 공명 현상을 일으켜 생기는 현상으로 추측할 수 있다. 보다 정확한 원인 분석을 위해서는 다양한 수리 실험과 수치 모의가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

Fig. 8 은 입사파의 유의 주기값을 2.2 sec로 고정하고 유의파고 값에 변화를 주면서 처오름 높이를 계산한 결과이다. 수중 구조물이 없는 경우 및 상대높이 (h/d)가 0.5인 경우에는 유의파고 값이 증가함에 따라 전체적으로 처오름 높이가 증가하는 경향을 보였지만 상대높이가 0.7인 경우에는 처오름 높이가 증가하다 감소하였다. 이는 수중 구조물의 상대높이(h/d)가 증가함에 따라 높은 파고의 입사파가 수중 구조물

위를 통과하면서 쇄파 현상을 일으켰기 때문이며 이러한 현상은 유의파고가 높아질수록 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

다음으로 쇄파 계수에 따른 처오름 높이의 변화를 알아보았다. 쇄파 계수는 입사파의 파고, 주기 그리고 구조물의 경사를 하나의 무차원화 된 계수로 사용하기 때문에 처오름 연구에 많이 사용되고 있는 변수이다.

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{S}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{g T_m}}} \quad (4)$$

여기서 α 는 구조물의 경사각, T_m 은 입사파의 평균주기를 의미한다.

Fig. 9는 상대폭(B/d)이 1.0, 상대거리(X/d)가 2.0인 조건에서 쇄파 계수에 따른 처오름 높이를 계산한 것이다. 그림에서 case 1은 수중 구조물이 설치되지 않은 상태에서 처오름 높이를 구한 것이고, case 2은 수중 구조물이 설치되어 있는 상태에서 처오름 높이를 구한 것이다. 전체적으로 수중 구조물이 존재함에 따라 처오름 높이가 감소하는 경향을 보였다. 상대높이(h/d)가 0.5인 경우에는 쇄파계수가 증가함에 따라 반사율의 변동이 크게 일어나는 반면 상대높이(h/d)가 0.7인 경우에는 쇄파계수가 증가함에 따라 처음에는 증가하다가 쇄파계수의 값이 5이상 되면서 쇄파계수에 따른 처오름의 변동폭이 작아져 거의 일정한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 Fig. 10에서도 비슷하게 나타나고 있다. $Ru_{33\%}$ 의 경우 $Ru_{2\%}$ 보다 전체적으로 낮은 값을 나타내며 변동폭도

작지만 상대높이가 0.5인 경우에는 쇄파계수에 따라 크게 영향을 받는 반면 상대높이(h/d)가 0.7인 경우에는 쇄파계수의 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 나타내는 것을 관측할 수 있다. 그 원인으로는 Fig. 7 및 8의 결과와 식 (4)로 설명할 수 있다. 식 (4)를 보면 유의파고와 평균주기가 서로 상쇄하는 역할을 한다. 즉, 유의파고가 크면 쇄파계수는 감소하는 반면에 평균주기가 크면 쇄파계수는 증가한다. Figs. 7 및 8의 결과를 보면 평균주기와 관련이 있는 유의주기가 증가하거나 유의파고가 증가함에 따라 처오름 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 상대높이(h/d)가 0.5인 경우에는 상대적으로 증가폭이 큰 반면 상대높이(h/d)가 0.7인 경우에는 곡선의 기울기가 상대적으로 완만해진 것을 알 수 있다. 따라서 유의주기가 증가하면서 생기는 처오름 높이의 증가와 유의파고가

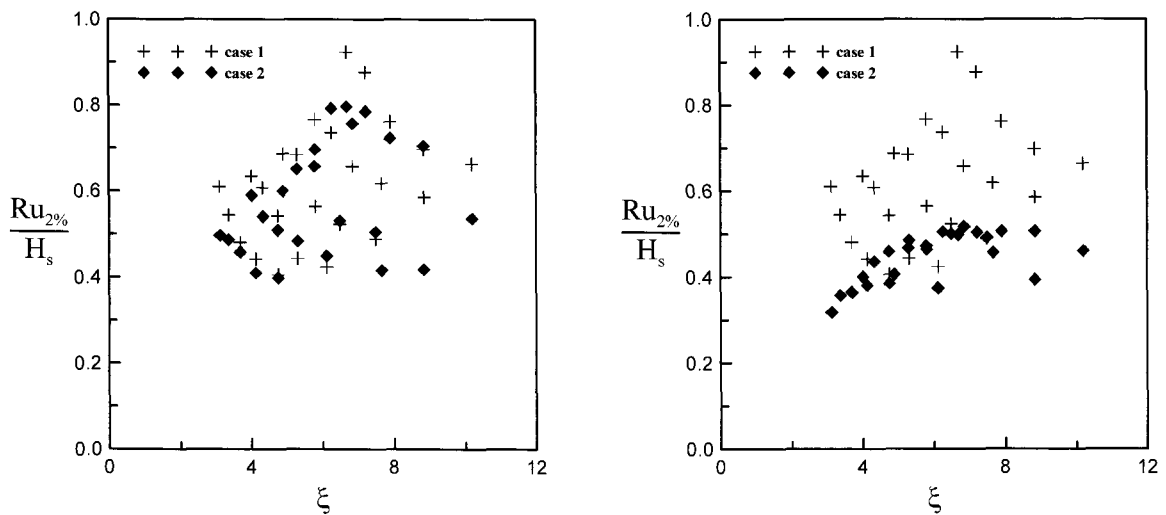


Fig. 9. Dimensionless wave run-up height for the absence of submerged structure(case1) and the presence of submerged structure (case2): (a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

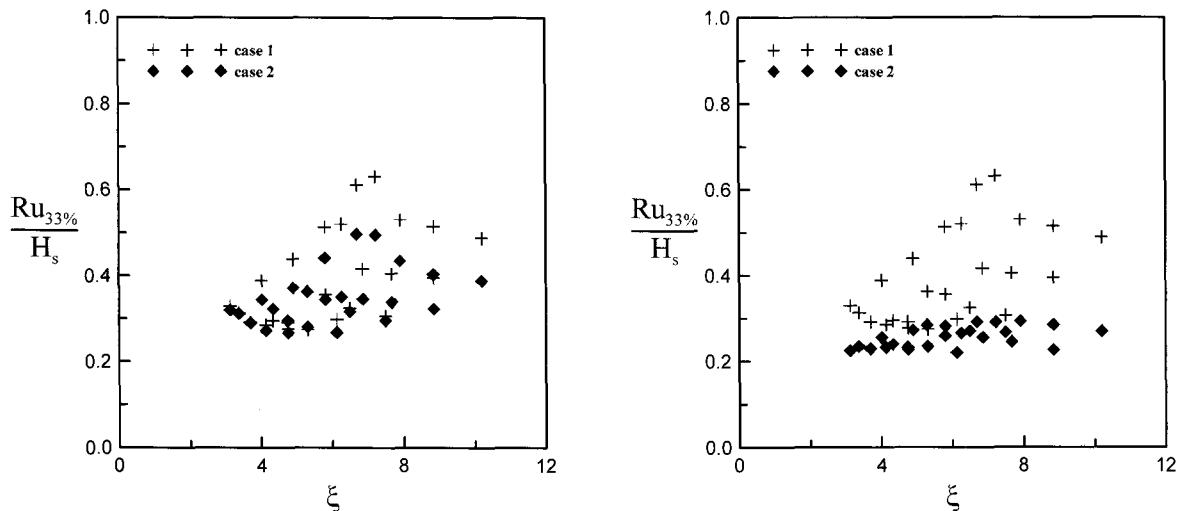


Fig. 10. Dimensionless wave run-up height for the absence of submerged structure (case 1) and the presence of submerged structure (case 2): (a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

감소하면서 생기는 처오름 높이의 감소가 복합적으로 작용하여 Fig. 9 및 10과 같은 복잡한 현상이 나타나는 것으로 사료되며 이와 같은 결과를 볼 때 수중 구조물의 설치시 쇄파계수의 증감만을 가지고선 처오름 높이의 변화를 예측하기에는 무리가 있다는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 반사율과 처오름 높이의 상관관계에 대해서 조사하였다. Figs 11 - 14에서 x 축은 수중 구조물 전면에서의 반사율을 나타내고, y 축은 무차원화된 처오름 높이를 나타낸다. Figs. 11 및 12는 서로 다른 유의주기를 가지는 파에 대하여 유의파고의 값에 변화를 주면서 반사율 및 처오름 높이를 계산한 그림이다. 상대높이(h/d)가 0.5인 경우 일부 구간을 제외하고 전체적으로 반사율이 증가함에 따라 처오름

높이는 감소하는 경향을 보였다. 상대높이(h/d)가 0.7인 경우도 0.5인 경우와 마찬가지로 전체적으로 반사율이 증가함에 따라 처오름 높이가 감소하는 경향을 보였으나 유의주기가 큰 경우에는 상대적으로 감소폭은 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 같은 결과는 상대높이가 높고 유의주기가 클수록 방파제에 의해 반사되어 나오는 파가 수중 구조물에 의해 재반사 되면서 처오름에 영향을 주기 때문인 것으로 해석 된다.

Figs. 13 및 14는 서로 다른 유의파고에 대하여 유의주기 값에 변화를 주면서 반사율과 처오름 높이를 계산하여 비교한 것이다. 앞의 결과와는 상반되게 반사율이 증가함에 따라 전체적으로 처오름 높이가 증가하는 것을 알 수 있으며 이러한 경향은 상대높이(h/d)

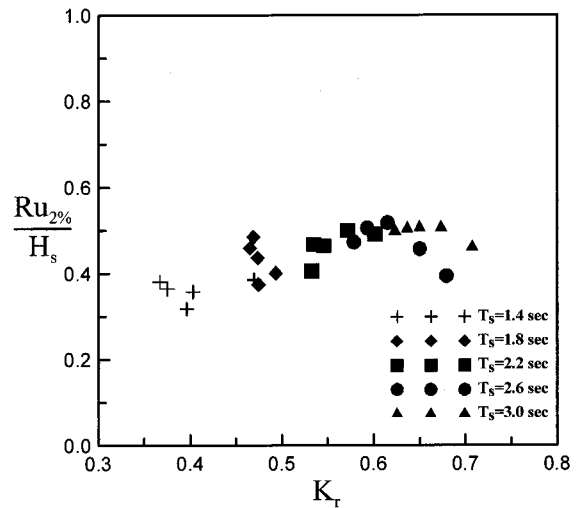
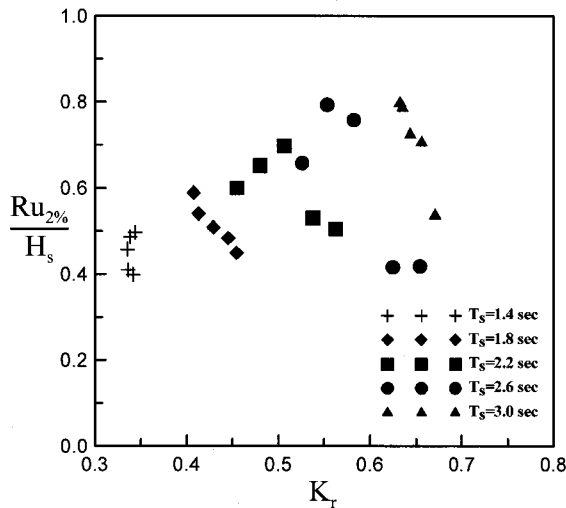


Fig. 11. Dimensionless wave run-up height with $Ru_{2\%}$ versus reflection coefficient for different significant wave periods: (a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

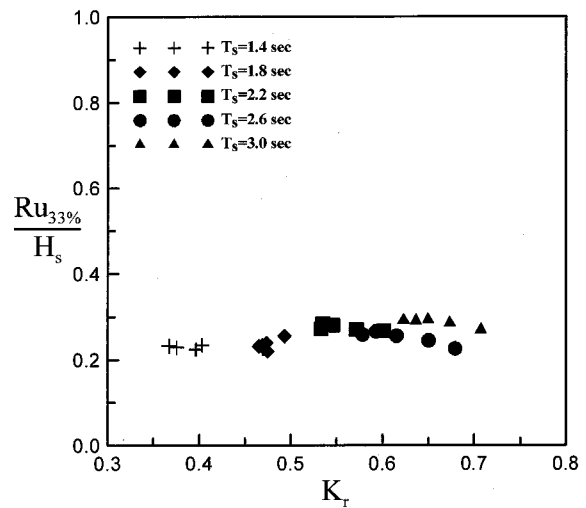
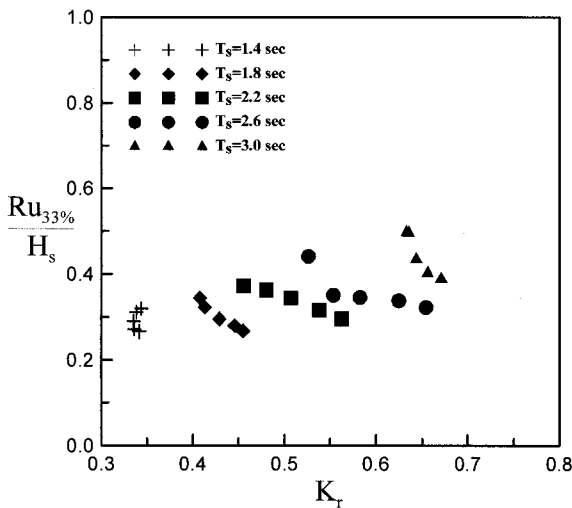


Fig. 12. Dimensionless wave run-up height with $Ru_{33\%}$ versus reflection coefficient for different significant wave periods: (a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

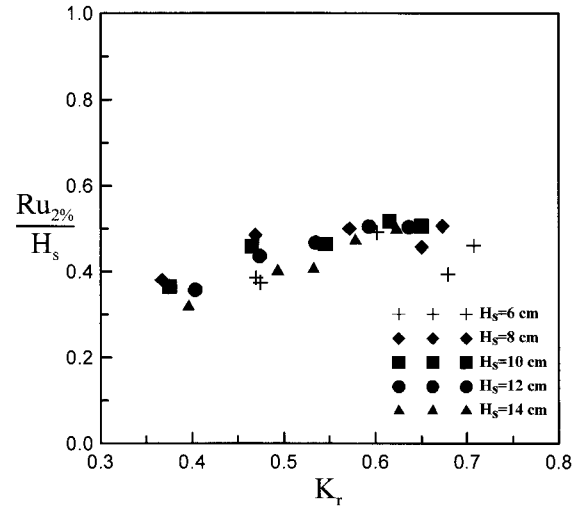
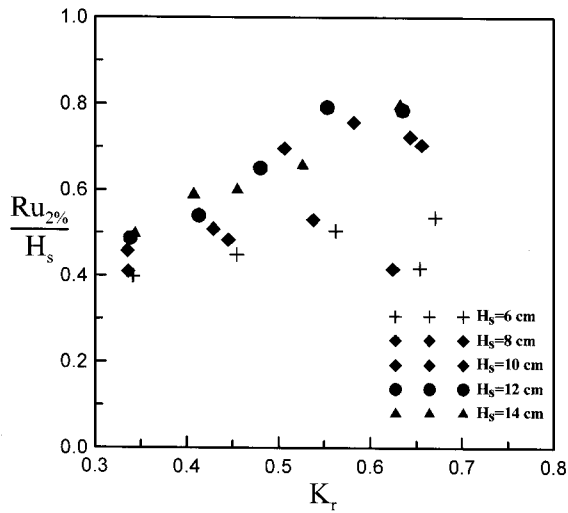


Fig. 13. Dimensionless wave run-up height with $Ru_{29\%}$ versus reflection coefficient for different significant wave heights: (a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

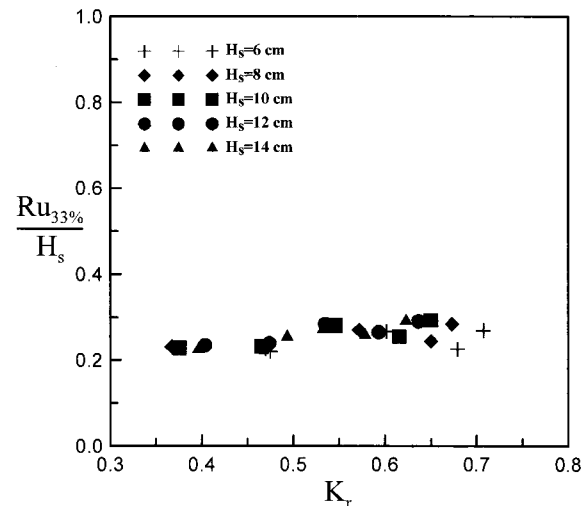
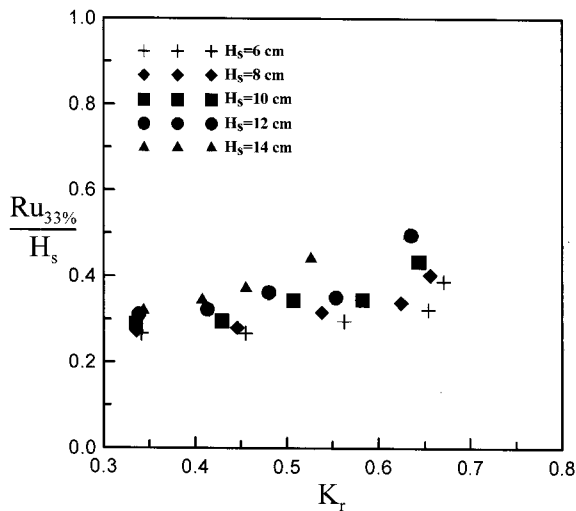


Fig. 14. Dimensionless wave run-up height with $Ru_{33\%}$ versus reflection coefficient for different significant wave heights: (a) $h/d = 0.5$ (b) $h/d = 0.7$

가 0.5인 경우가 0.7인 경우에 비해 더 크게 나타났다. 이는 반사율보다 파의 초오름에 직접적인 영향을 주는 파의 지속시간이 초오름에 더 큰 영향을 준다는 것을 의미한다.

4. 결론

경사식 방파제 전면에서 직사각형 수중 구조물을 설치하여 수중 구조물에 의한 경사식 방파제 전면에서의 초오름 감소에 대해 수리모형 실험을 수행하여 수중 구조물의 성능을 검토하였다. Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하여 불규칙파를 재현하였으며 Goda and Suzuki (1976)가 제안한 2점법을 사용하여 입·반사파를 분리하였다. 수중 구조물의 폭

및 경사식 방파제와 수중 구조물 사이의 거리를 일정하게 고정된 후 불규칙파의 유의파고, 유의주기 및 수중 구조물의 상대높이(h/d)에 변화를 주면서 수중 구조물 전면에서의 반사율 및 경사식 방파제 전면에서의 초오름 높이를 계산하였다.

실험결과, 반사율은 유의파고보다 유의주기에 상대적으로 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 초오름 높이의 경우, 수중 구조물을 설치하면 수중 구조물이 설치되지 않은 경우에 비해 방파제 전면에서의 초오름 높이는 $Ru_{29\%}$ 의 경우 평균적으로 28% 정도가 감소하였으며 $Ru_{33\%}$ 의 경우에는 평균적으로 26%정도 감소하였다. 이와 같은 결과는 수중 구조물이 존재할 경우 초오름 높이가 감소함을 알 수 있고, 수중 구조물의

높이가 상대적으로 높은 경우에는 유의파고가 증가함에 따라 쇄파가 발생하여 처오름 높이가 오히려 감소하는 것을 관측할 수 있었다. 쇄파계수에 따른 처오름 높이의 복잡한 변화 양상은 유의주기가 증가하면서 생기는 처오름 높이의 증가와 유의파고가 증가하면서 생기는 처오름 높이의 감소가 복합적으로 작용하여 나타나는 현상으로 사료되어 수중 구조물의 설치시 쇄파계수의 증감만을 가지고선 처오름 높이의 변화를 예측하기에는 무리가 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 유의주기에 대한 반사율과 처오름 높이의 상관관계에서는 전체적으로 반사율이 증가함에 따라 처오름 높이는 감소하는 경향을 보였으며 수중 구조물의 상대 높이가 높을수록 감소폭이 작게 나타났고, 유의파고에 대한 반사율과 처오름 높이의 상관관계에서는 반사율이 증가함에 따라 처오름 높이가 증가하는 결과가 나왔다. 실험결과 수중 구조물의 높이가 높을수록 반사율은 증가하지만 방파제에 의해 반사되는 파가 수중 구조물에 의해 재반사 또한 커지기 때문에 실제 처오름 높이는 크게 감소하지 않는 것으로 확인되었다. 따라서 수중 구조물을 설치함에 있어서 수중 구조물의 높이는 경제적인 면이나 효율성 등을 고려하여 적절하게 계산되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서 도출된 결과는 향후 수중 구조물 설치시 수중 구조물의 설치에 따른 방파제 전면에서의 처오름 높이 예측 및 방파제 천단 마루높이를 산정하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 향후 연구로는 수중 구조물과 방파제 간의 상대거리를 변화시키면서 다양한 수리실험을 수행한 후 수중 구조물 제작 및 설치시 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다. 그리고 본 연구에서는 수중 구조물의 상대 높이가 0.5 이상인 경우에 대하여 수리 실험을 수행하였는데, 이는 상대 높이가 작을 경우 그 영향 또한 작을 것으로 사료되어 특성의 가시화를 위해서 상대높이의 값을 0.5 보다 큰 값을 사용하였다. 보다 체계적인 기초 자료 확보를 위해 향후 상대높이가 0.5보다 작은 경우에 대한 수리실험도 계획하고 있다. 또한, 다열로 배치된 수중 구조물이 구조물에 미치는 영향, 수중 구조물과 방파제 사이에 생기는 와류에 의한 기초 지반의 안정성 문제, 수중 구조물의 설치로 수중 구조물과 방파제에 작용하는 파압의 변화 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청, 서울특별시 및 (주) 대영엔지니어링의 재정적 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김도삼, 이광호, 유현상, 김창훈, 손병규 (2004) 불규칙파동장에 있어서 VOF법에 의한 투과성수중 구조물의 파랑제어 특성에 관한 연구. 한국해양해양공학회지, 제16권, 제3호, pp. 121-129.
- 이종인, 김영택, 조용식 (2003) 수중방파제 형상에 따른 규칙파의 반사실험. 한국해양해양공학회지, 제15권, 제3호, pp. 167-175.
- 전찬후, 조용식, 이종인 (2003) 사다리꼴형상 투과성 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사. 한국수자원학회 논문집, 제36권, 제5호, pp. 741-749.
- 황종길, 이승협, 조용식 (2004) 불투과성 수중 방파제에 의한 불규칙파의 변형. 한국수자원학회 논문집, 제37권, 제11호, pp. 949-958.
- Chang, H.K. and Lion, J.C. (2007) Long wave reflection from submerged trapezoidal breakwaters. *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 185-191.
- Cho, Y.S., Lee, J.I. and Kim, Y.T. (2004) Experimental study of strong reflection of regular water waves over submerged breakwaters in tandem. *Ocean Engineering*, Vol. 31, pp. 1325-1335.
- Goda, Y. (2000) *Random Seas and Design of Marine Structures*, 2nd edition. World Scientific, Singapore.
- God, Y. and Suzuki, Y. (1976) Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of 15th International conference on Coastal Engineering*, Hawaii, USA, pp. 828-845.
- Hsu, T.W., Hsieh, C.M. and Hwang, R.R. (2004) Using RANS to simulate vortex generation and dissipation around impermeable submerged double breakwaters. *Coastal Engineering*, Vol. 51, pp. 557-579.
- Huang, C.J. and Dong, C.M. (1999) Wave deformation and vortex generation in water waves propagating over a submerged dike. *Coastal Engineering*, Vol. 37, pp. 123-148.
- Huang, C.J., Lin, M.C. and Cheng, C.Y. (2003) Structural permeability effects on the interaction of a solitary wave and a

- submerged breakwater. *Coastal Engineering*, Vol. 40, pp. 1-24.
- Jeng, D.S., Schacht, C. and Lemckert, C. (2005) Experimental study on ocean waves propagating over a submerged breakwater in front of a vertical seawall. *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp. 2231-2240.
- Johnson, H.K. (2006) Wave modelling in the vicinity of submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 39-48.
- Johnson, H.K., Karambas, T.V., Avgeris, I., Zanuttigh, B., Gonzalez-Marco, C. and Caceres, I. (2005) Modelling of waves and currents around submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp. 949-969.
- Lara, J.L., Garcia, N. and Losada, I.J. (2006) RANS modelling applied to random wave interaction with submerged permeable structures. *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 395-417.
- Lin, P., and Liu, H.-W. (2005) Analytical study of linear long-wave reflection by a two-dimensional obstacle of general trapezoidal shape, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 131, pp. 822-830.
- Losada, I.J., Lara, J.L. and Garcia, N. (2003) 2-D Experimental and numerical analysis of wave interaction with low-crested breakwaters including breaking and flow recirculation. *Coastal structures*, pp. 863-875.
- Mizutani, N., Mostafa, A.M. and Iwata, K. (1998) Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction. *Coastal Engineering*, Vol. 33, pp. 177-202.
- Muni Reedy, M.G. and Neelamani, S. (2005) Hydrodynamic studies on vertical seawall defenced by low-crested breakwater. *Ocean Engineering*, Vol. 32, pp. 747-764.
- Neelamani, S. and Sumalatha, B.V. (2006) Wave reflection, run-up, run-down and pressures on seawalls defenced by an offshore breakwater. *Indian Institute of Science*, Vol. 86, pp. 15-31.
- Pinto, F.T. (2005) Regular water wave measurements near submerged breakwaters. *Measurement Science and Technology*, Vol. 16, pp. 1883-1888.
- Shirlal, K.G., Rao, S., Ganesh, V. and Manu (2005) Stability of breakwater defenced by a seaward submerged reef. *Ocean Engineering*, Vol. 33, pp. 829-846.
- van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B. and Wang, B. (2005) Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change. *Coastal Engineering*, Vol. 52, pp. 915-929.

© 논문접수일 : 2007년 06월 14일
 © 심사의뢰일 : 2007년 06월 19일
 © 심사완료일 : 2007년 09월 21일