

## 사석경사식 방파제에서의 파랑의 처오름높이와 월파

### Run-up and Overtopping of Waves on Slopes of Rubble-Mound Breakwaters

이 승 협\* / 우 종 협\*\* / 조 용 식\*\*\*

Seung-Hyeob Lee / Jong-Hyub Woo / Yong-Sik Cho

#### Abstract

In this study, laboratory measurements are presented for run-up heights and overtopping of water waves on slopes of rubble-mound breakwaters armored with tetrapods. The effects of wave steepness, surf similarity and wave period on the run-up height and overtopping are investigated in detail. A series of numerical experiments is also carried out to verify the accuracy of the laboratory measurements. A very reasonable agreement is observed. As slopes of breakwaters become milder, run-up heights become smaller. The overtopping rate also is considerably affected by wave steepness and period.

*keywords* : rubble-mound breakwater, run-up height, overtopping, VOF method

#### 요 지

본 연구에서는 실험실에서 수행한 처오름높이와 월파량에 대한 결과를 제시하였다. 처오름높이와 월파량에 대한 파형경사, 쇄파계수와 파랑의 주기에 대하여 상세히 조사하였다. 또한 수치모형실험을 통해 실험의 정확도를 검증하였다. 그 결과, 실험의 정확성을 확인할 수 있었다. 구조물의 경사가 낮아질수록 상대 처오름높이가 작게 나타났다. 또한, 월파량의 경우는 파형경사와 주기의 변화에 따른 차이가 크게 나타났다.

**핵심용어** : 사석경사식 방파제, 처오름높이, 월파, VOF 기법

#### 1. 서 론

심해에서 발생하여 해안으로 접근한 파랑은 항만구조물 및 연안에 건설된 해안구조물과 접촉하면서 처오름, 월파, 반사, 전달 등의 여러 물리적 현상을 발생시킨다. 특히, 처오름높이는 항만시설, 화력발전소와 원자력발전소 등과 같은 연안에 건설되는 해안구조물의 높이 결정, 취수구의 최저높이 설계, 해안선 근처의 범람구역 설정, 방파제의 높이 결정 및 연안구조물에 작용

하는 파력 계산을 위해 정확한 산정이 필요하다 (Herbich, 1990).

현재까지 처오름높이에 대한 대부분의 연구는 불투과성 해안 구조물에 대해 정현파와 크노이드파를 사용하여 수행되었다. Hall and Watts(1953)는 고립파를 입사파로 이용하여 콘크리트 급경사에서 파랑의 최대 처오름높이 산정에 관한 수치모형실험을 수행하여 최대 처오름높이에 대한 공식을 제안하였다. Ohya(1987)는 해안경사가 30°, 45°, 및 60°일 때 크노이드파를 사

\* 대영엔지니어링 항만부, Harbor Engineering Division, Daeyoung Engineering, Seoul 135-851, Korea.  
(e-mail: pachen33@empal.com)

\*\* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea. (e-mail: wooblu77@hanmail.net)

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

용한 수리모형실험을 수행하여 처오름높이를 계산하였으며, 동일한 조건하에서 경계요소법을 이용하여 처오름높이를 계산하였다. 최근에는 불규칙파를 사용하여 Rock, Cube, 및 Core-Loc으로 피복된 투과성 해안 구조물에 대한 연구가 진행되고 있다. Melito와 Melby (2002)는 불규칙파를 이용하여 Core-Loc으로 피복된 방파제에서의 처오름높이, 전달계수와 반사계수에 관한 실험을 수행하였다.

외국에서는 Rock, Dolos, Cube 및 Core-Loc 등을 이용한 사석경사식 방파제를 주로 사용하는데 반해, 국내에서는 대부분 테트라포드를 피복제로 이용한 사석경사식 방파제를 많이 사용하고 있다. 현재까지 국내 항만은 주로 선진국의 기술을 도입하여 설계해 왔으나, 선진국에서 들여온 설계 기술자료의 대부분이 자국의 환경을 기준으로 연구되어온 Rock 또는 Cube와 Core-Loc 등에 대한 자료이며, 테트라포드를 피복제로 사용한 연구는 일본에서는 Sakakiyama and Liu(2001)가 계속된 연구를 하고 있고, 국내에서는 이달수 등(2003)이 유공 방파제 및 경사식 방파제에서의 파력에 대해 다양한 각도로 연구를 하고 있다. 하지만, 사석경사식 방파제에 대한 연구가 아직은 미미한 실정이다. 또한, 기존의 방파제 설계에 사용되어온 Hudson 공식 및 Van der Meer 공식은 각각 파랑의 주기, 제체의 투과성 및 파형경사에 대한 고려가 되어 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 불규칙파랑을 이용하여 테트라포드를 사용한 사석경사식 방파제에서의 처오름높이 및 월파를 수리모형실험과 수치모형실험을 이용하여 연구하였다. 수리모형실험에서는 파형경사, 쇄파계수(surf similarity parameter) 등의 수리학적 요소들과 처오름높이와의 관계에 대하여 분석하였다. 수치모형실험을

이용하여 결과를 검증하였으며, 수리모형실험에서 얻을 수 없었던 결과를 예측할 수 있었다.

## 2. 수리모형실험

본 수리모형실험은 한양대학교 해양공학실험실에 위치한 단면실험수로에서 수행하였다. 사용한 장비는 Fig. 1과 같이 폭 0.6m, 높이 1.1m, 길이 32.5m의 수로와 전기서보피스톤식 조파기로 구성된 단면조파장치로서 규칙파와 불규칙파를 조파할 수 있으며, 주기와 파고를 연속적으로 변화시킬 수 있다. 또한, 수로의 전면 27.2m 구간을 유리로 제작하여 실험장면을 관찰할 수 있도록 하였다. 실험수로의 끝 부분에 여러 겹의 다공성 구조로 된 소파장치가 설치되어 있다.

수리모형실험에 사용된 사석경사식 방파제 모형은 조파관으로부터 약 23.4m 떨어진 지점에 0.9m 높이로 설치되었으며, 1:1.5, 1:2.0 그리고 1:3.0 세가지 경사를 갖는다. 구조물은 테트라포드, 피복석과 사석으로 이루어졌으며, 테트라포드는 2층으로 구조, 피복석은 테트라포드와 사석사이에 1층으로 피복하였다. 구조물에 사용된 테트라포드는 6.3ton급 중량의 원형을 1:30으로 축소한 모형을 사용하였다. 피복석은 한 개의 부피가 0.2m<sup>3</sup>정도인 평균 입경이 약 0.04m인 쇄석을 사용하였으며, 사석은 0.016m인 골재를 표면의 오염물질을 제거한 후 사용하였다.

실험에서 조파되는 입사파랑의 재현성을 확인하기 위하여 입사파와 반사파를 분리하였다. 입사파와 반사파를 분리하기 위해서 설치된 두 개의 파고계로부터 독취된 자료를 바탕으로 Goda and Suzuki(1976)의 방법으로 계산하였다. Fig. 2는 실험에서 입사파와 반사파가 분리되어 입사파 스펙트럼과 목표 스펙트럼이 잘 일치함을 보여준다.

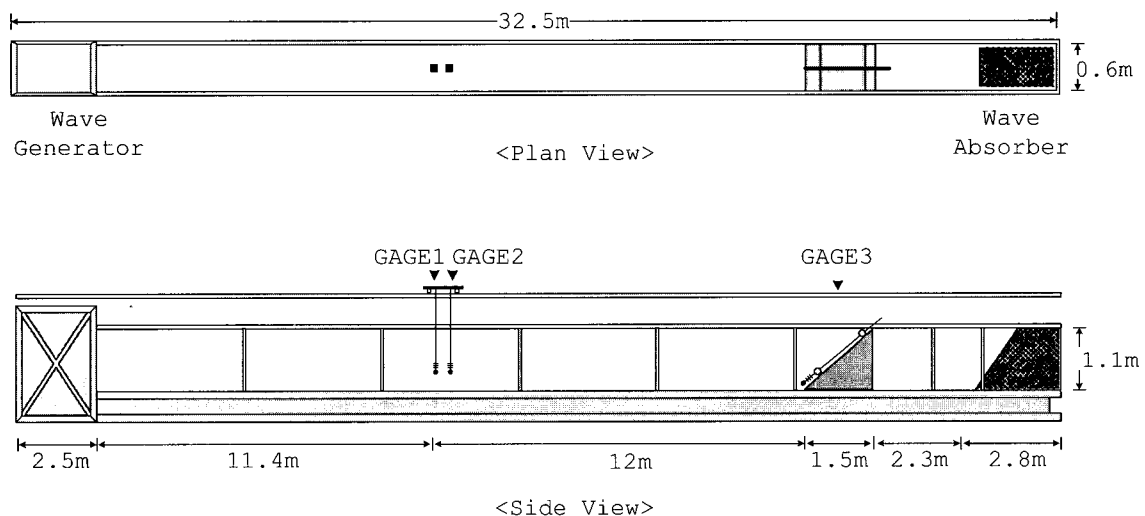


Fig. 1 Schematic sketch of wave flume

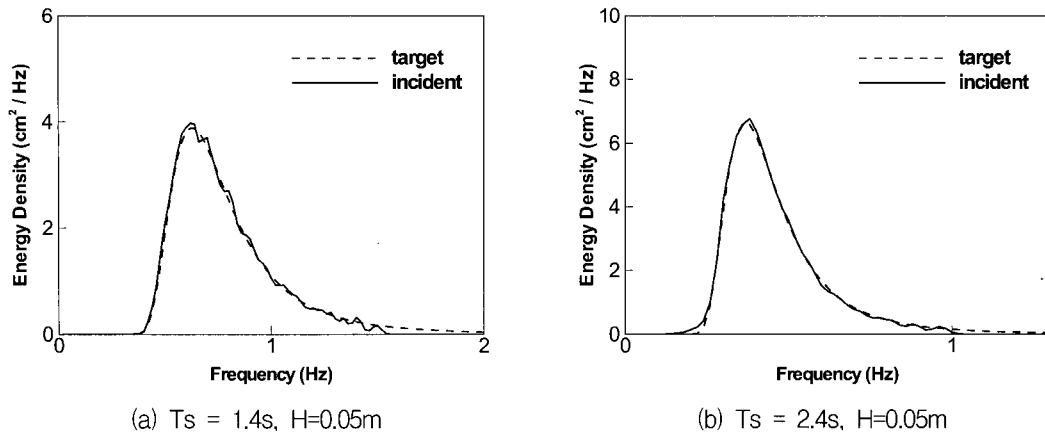


Fig. 2 Comparison of target and incident spectrum

수리모형실험에서 일방향 불규칙파를 사용하였으며, 사용된 일방향 불규칙파는 Eq. (1)과 같은 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼(Goda, 2000)을 목표 스펙트럼으로 설정하여 재현하였다.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (1)$$

여기서,  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼,  $H_{1/3}$ 는 불규칙파의 유의파고,  $T_{1/3}$ 는 유의주기이며,  $f$ 는 주파수를 나타낸다.

사용된 입사파의 성분은 처오름높이와 월파량 측정 두 실험에서도 동일하게 사용하였다. 유의주기는 1.0sec에서 2.4sec까지 0.2sec 간격으로 변화시켰으며, 유의파

고는 0.01m에서 0.08m까지 0.01m간격으로 실험하였다. 수심은 0.5m로서 모든 실험에서 동일하게 적용하였다.

정확한 처오름높이의 계측을 위해서 다음 Fig. 3과 같은 처오름높이 측정장치를 사용하였다. 처오름높이 측정장치는 KENEK사의 CHT5-100의 파고계를 두 개의 수평지지봉과 한 개의 수직지지봉을 이용하여 사면 경사에 근접시켜 사면에서의 수면변화 측정의 오차를 최소화하였다. 파고계의 독취율은 20Hz로 설정하여 사면의 수면변화를 정밀하게 계측하였으며, 실험파는 각 파랑의 주기에 따라 파수 600파를 조파한 후 100-600파랑의 수에 해당하는 자료를 zero-upcrossing 방법으로 분석하였다.

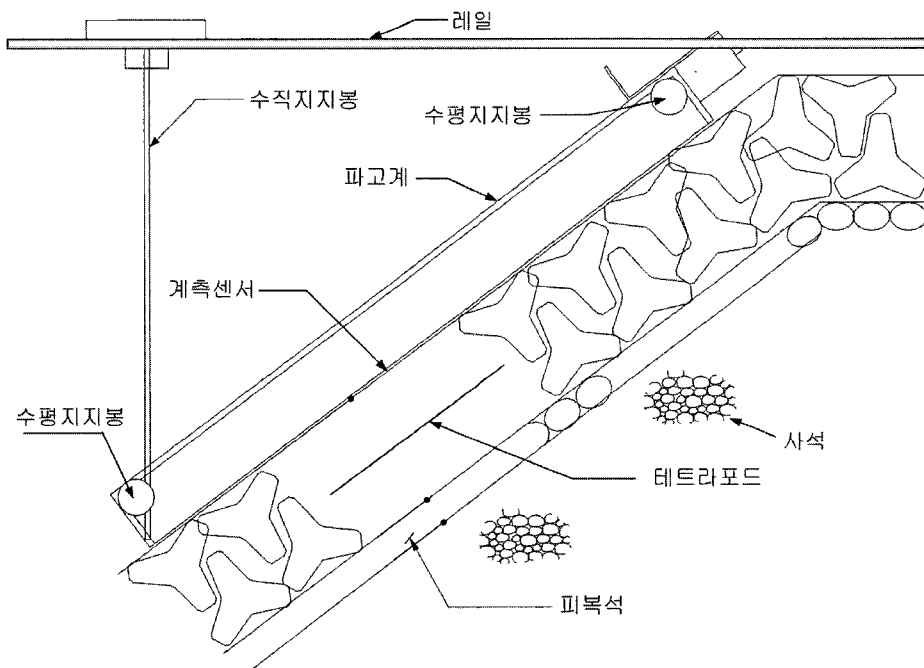


Fig. 3 Apparatus for measuring wave run-up

월파랑 계측을 위해서 처오름높이 계측에 사용된 구조물을 변형시켜 수면과 천단고의 차이가 0.04m 간격의 사석경사식 방파제를 만들어 사용하였다. 정확한 월파랑계측을 위하여 Fig. 4와 같은 월파랑 측정장치를 사용하였다. 월파랑 측정장치를 구조물 뒷면에 설치하고, 천단고를 넘는 물의 양을 계측하였다. 계측된 물은 펌프를 이용하여 다시 수로안으로 넣음으로써 수로안의 수위를 일정하게 유지하였다. 월파랑 계측에 사용된 실험과는 각 파랑의 주기에 따라 파수 400파를 조파한 후 100-400파랑의 수에 해당하는 자료를 분석하였다.

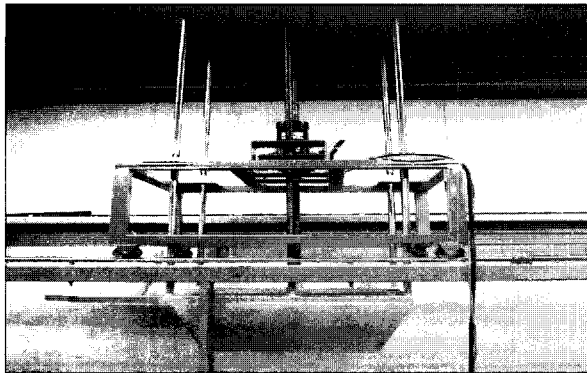


Fig. 4 Overtopping measurement equipment

### 3. 수치모형실험 조건과 지배방정식

본 연구에서는 수치모형실험 결과를 이용하여 수리모형실험 결과를 검증하였고, 수리모형실험에서 얻지 못한 장주기에 대한 처오름높이 결과를 수치모형을 이용하여 예측하였다. 수치모형실험은 수리모형실험과 동일한 조건에서 수행하였으며, 유의파고와 수심은 각각 0.04m와 0.5m로 고정하였다.

본 연구에서 사용된 수치모형에서는 기존의 수심 평균된 방정식인 천수방정식과 Boussinesq 방정식으로 재현하기 어려운 자유수면변위의 정확한 형상과 유속장을 표현하기 위해 Reynolds 방정식,  $k-\epsilon$  모델 및 VOF 기법을 사용하였다. Fig. 5는 유속장을 포함한 자유수면변위 형상을 잘 나타내고 있다.

투과체는 복잡한 구조이기 때문에 투과체 내에서 직접 Navier-Stokes 방정식을 해석하는 것은 어렵다. 일반적으로, Navier-Stokes 방정식은 대표 공극 크기보다 크고 자연현상에서의 대표 길이 단위보다는 작은 길이 단위  $l_p$ 에 대해서 평균된다. 더욱이, 유체 변수들은 공간적으로 평균된 양과 변동되는 양으로 나뉘어진다. 즉,  $u_i$ 는  $(\bar{u}_i + u_i'')$ 로 나타내고,  $P_0$ 는  $\bar{P}_0 + P_0''$ 으로 표현된다. 여기서,  $n$ 은 공극체의 유효 공극율이다.

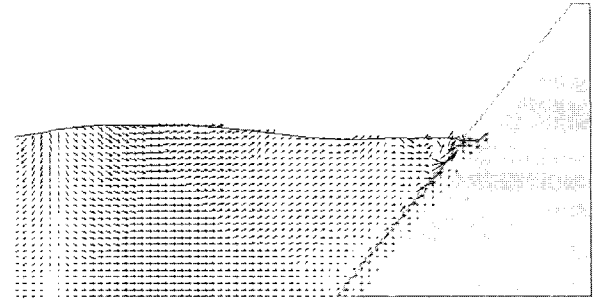


Fig. 5 Free surface displacement shape with velocity field

공간 평균된 Navier-Stokes 방정식은 Eq. (2) 및 Eq. (3)과 같다(조용식 등, 2003).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1 + c_A}{n} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\bar{u}_j}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \quad (3)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial x_i} + \frac{\nu}{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{1}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i'' \bar{u}_j''}{\partial x_j}$$

Eq. (3)의 오른쪽 두 번째항은 점성항으로 세 번째항에 비해 매우 작으나, 미세 부분에서 공극체와 외부 흐름간 연결부근에서 중요한 역할을 한다. 투과체내에서 가속되는 유체에 의해 발생하는 질량 효과를 고려하기 위해서 시간에 대한 미분항을 Eq. (4)와 같이 표현한다(Liu et al., 1999).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \left( \frac{1 + c_A}{n} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \quad (4)$$

Eq. (4)에서  $c_A$ 는 추가된 질량계수이고 van Gent (1995)가 제안한  $\gamma_p(1-n)/n$  식을 사용하였다. 여기서,  $\gamma_p$ 는 경험상수로 0.34이다. Eq. (3)의 오른쪽 마지막 항이 나타내는 공간 속도 변동의 상관관계는 Eq. (5)와 같은 선형 마찰력과 비선형 마찰력의 조합으로 구성하였다.

$$-\frac{1}{n^2} \frac{\partial \bar{u}_i'' \bar{u}_j''}{\partial x_j} = -g a_p \bar{u}_i - g b_p u_c \bar{u}_i \quad (5)$$

Eq. (5)에서  $a_p$ 와  $b_p$ 는 경험상수이고,  $u_c$ 는  $\sqrt{\bar{u}_i u_i}$ 이다. 또한, 오른쪽의 첫 번째 항은 점성 효과에 의해 발

생한 마찰력을 나타내고, 두 번째 항은 난류효과에 의한 마찰력을 의미한다.

경험상수  $a_p$ 와  $b_p$ 에 대한 경험식은 van Gent(1995)가 Eq. (6) and Eq. (7)과 같이 제안하였다.

$$a_p = \alpha_p \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{\nu}{gD_{50}^2} \quad (6)$$

$$b_p = \beta_p \left(1 + \frac{7.5}{KC}\right) \frac{(1-n)}{n^3} \frac{\nu}{gD_{50}^2} \quad (7)$$

여기서,  $\alpha_p$ 와  $\beta_p$ 는 각각 1,000과 1.1이며,  $KC$ 는 Keulegan-Carpenter수(Liggett, 1994)로서 유체 입자 운동과 투과체 내에서의 특성 길이 크기의 비를 나타내며, Eq. (8)로 표현할 수 있다.

$$KC = u_c \frac{T}{nD_{50}} \quad (8)$$

Eq. (8)에서  $T$ 는 파랑의 주기를 나타내고,  $D_{50}$ 은 투과체 구성물질의 유효직경을 나타낸다. 투과체 구성물질의 모양, 위치, 표면 조도는 질량과 마찰 특성에 영향을 주는 요소이지만 본 연구에서는 고려하지 않았다.

#### 4. 실험결과

분석결과는 처오름높이를 유의파고로 나눈 무차원 값을 상위 2%와 상위 33.33%에 대한 상대 처오름높이에 대한 결과를 도시하였다. 상위 2%의 분석은 방파제의 설계시 최악조건인 설계 기초자료가 되며, 33.33%의 분석은 경제적 방파제 설계의 기초자료가 된다.

파고를 파장으로 나눈 값 ( $H/L$ )으로 정의되는 파형 경사는 입사파의 특성을 나타내는 중요한 변수이다.

Fig. 6 and Fig. 7은 파형경사의 변화에 따른 상대 처오름높이의 변화를 나타내었다. 투과성 방파제에서 파형

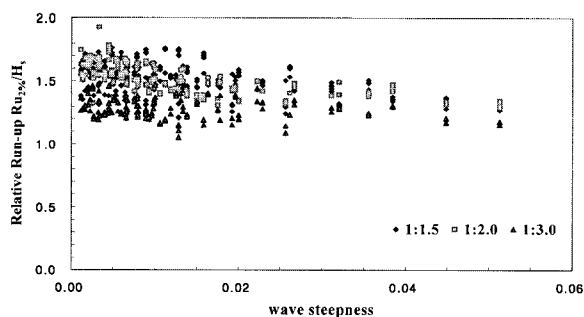


Fig. 6 Relative run-up versus wave steepness(2%)

경사 변화에 따른 상대 처오름높이의 변화는 값이 증가함에 따라 상대 처오름높이가 감소하는 현상을 보이지만 복잡한 파랑과 구조물간의 상호작용 그리고, 구조물의 투과성으로 인한 영향으로 인해 뚜렷한 변화를 보이지 않는다. 구조물의 경사가 낮아질수록 상대 처오름높이 또한 작게 나타내는 경향을 보인다. 이는 구조물의 경사가 낮아질수록 입사된 파랑이 구조물 경사면을 따라 이동하는 거리가 증가하고, 거리가 증가하는 만큼 마찰력이 증가할 뿐 아니라 테트라포드 사이를 통과하면서 파랑에너지가 감소하기 때문에 판단되지만 이러한 현상 변화 또한 미미한 편이다. 따라서, 테트라포드를 사용한 사석 경사식 방파제에서는 파형경사에 따른 처오름높이의 분석은 큰 의미를 갖지 않음을 알 수 있다.

처오름높이의 특성에 영향을 주는 또 다른 요소는 쇄파계수( $\xi$ )이며, 쇄파계수는 사면에서 발생하는 파랑 운동의 주기 영향을 나타내며 Eq. (9)로 정의한다.

$$\xi_m = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{s}} = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H_s}{gT_m^2}}} \quad (9)$$

여기서,  $\alpha$ 는 구조물의 경사각,  $s$ 는 파형경사,  $H_s$ 는 유의파고이며,  $T_m$ 은 평균파 주기이다(Battjes, 1974).

Fig. 8 and Fig. 9에서 쇄파계수가 1.0에서 5.0까지 증가함에 따라 상대 처오름높이가 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나, 쇄파계수가 5.0을 넘으면서 상대 처오름높이는 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 파랑이 투과성 표면들을 지나면서 에너지 분산과 테트라포드의 다공성으로 인해 상대 처오름높이 값이 감소되어 일정한 파형경사 이상에서는 더 이상 증가하지 않는 것으로 판단된다. 따라서, 경제적인 구조물을 설계하기 위해서는, 각각의 구조물이 설치되는 해역에 따라 내습하는 파랑과 구조물의 경사를 고려하여야 할 것이다.

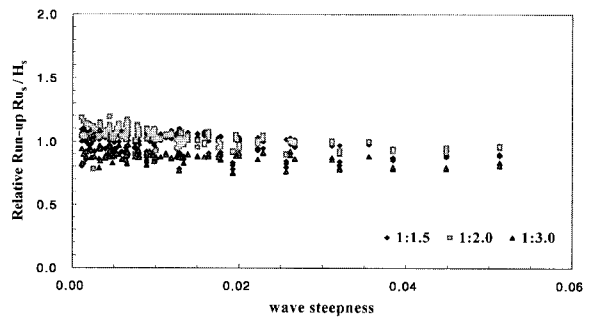


Fig. 7 Relative run-up versus wave steepness(33.33%)

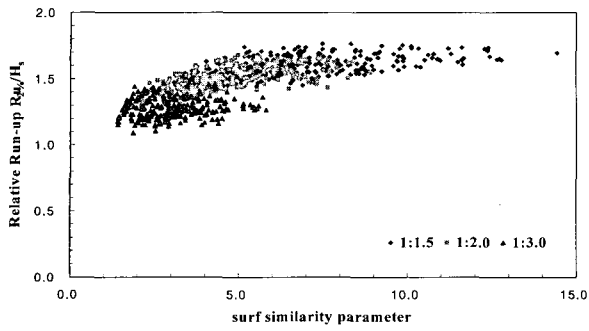


Fig. 8 Relative run-up versus surf similarity parameter(2%)

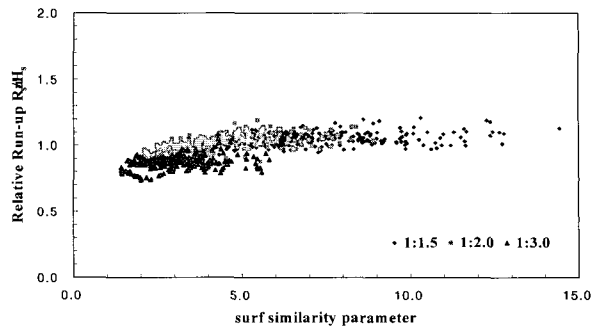


Fig. 9 Relative run-up versus surf similarity parameter(33.33%)

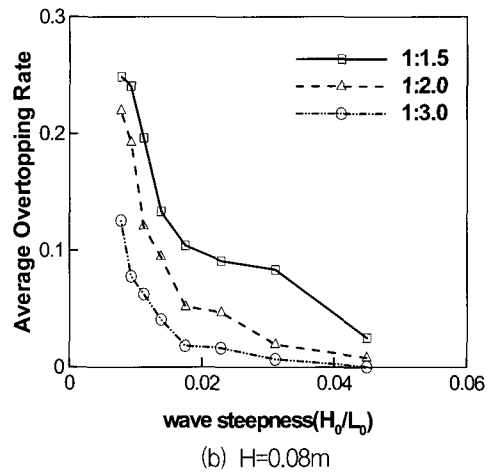
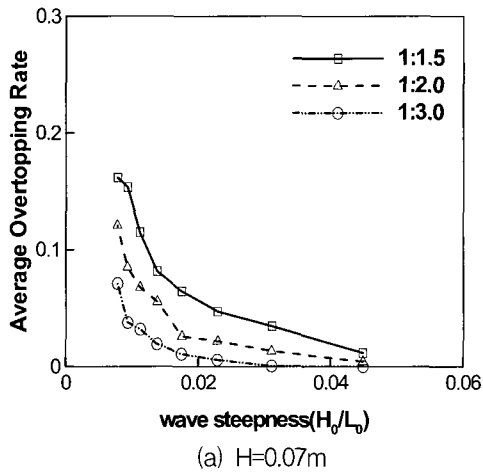


Fig. 10 Change of overtopping versus wave steepness

Fig. 10은 월파랑계측 실험중에서 입사파고가 0.07m와 0.08m일 때 파형경사 변화에 따른 월파랑의 변화를 도시하였다. 테트라포드를 사용한 사석경사식 방파제에서는 동일 파고에서 파형경사가 증가할수록 월파랑이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 상대적으로 단주기 파랑에 비하여 장주기 파랑이 더 큰 에너지를 가지고 있으므로, 파랑의 주기가 증가함에 따라 월파랑이 크게 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 동일한 파형경사 조건에서는 구조물의 경사가 작을 때 월파랑이 더 작게 나타남을 알 수 있다. 경사가 낮은 구조물에서는 파랑이 사면을 따라 이동하는 거리가 길어짐으로 인해 파랑의 에너지가 감소에 의하여 월파랑이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

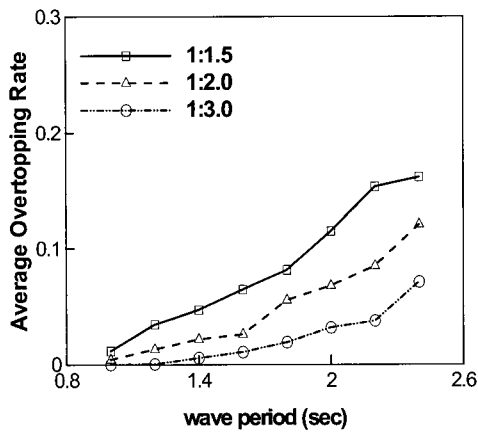
Fig. 11은 주기 1.2~2.4sec구간을 0.4sec 간격으로 주기를 변화시켜 월파랑의 변화를 관찰하였다. 동일한 입사파고 조건에서 주기가 증가할수록 월파랑의 변화가 크게 증가함을 알 수 있다. 즉, 월파랑은 주기와 상당히 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있으며, 월파랑 측정

및 테트라포드의 증량산정에 있어서도 파랑의 주기가 중요한 매개변수임을 확인시켜주며, 파랑의 주기 성분을 무시한 Hudson 공식은 보완되어야 함을 의미한다.

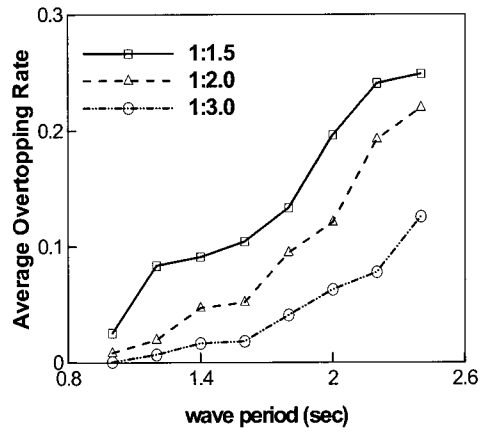
Fig. 12~Fig. 14는 수리모형실험과 수치모형실험의 결과를 비교하여 도시하였다. 그림의 결과는 최대 처오름높이를 내림차순으로 정렬하였을 때 상위 33.33%에 해당하는 값의 평균이다. 수리모형실험과 수치모형실험의 결과는 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림에서는 주기 2.6~3.0sec의 결과는 수치모형실험 결과만을 도시하였다. 이는 수리모형실험 장치의 기계적 한계로 인해서 재현하기 어려운 장주기 파랑에 대한 실험 부분을 수치모형실험을 통하여 예측한 결과이다. 수치모형실험에서 계산된 처오름높이의 결과를 이용하여 수리모형실험에서 관측하지 못한 다양한 구조물의 수리학적 요소에 대하여 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 테트라포드를 사용한 방파제의 처오



(a) H=0.07m



(b) H=0.08m

Fig. 11 Change of overtopping versus wave period

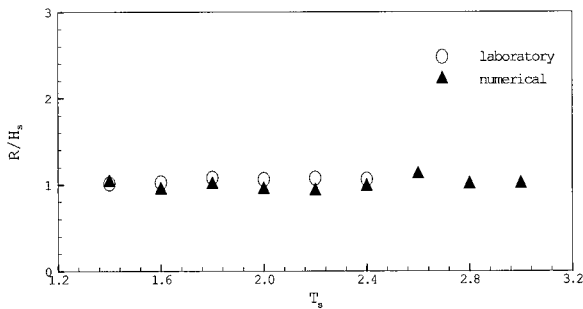


Fig. 12 Run-up versus change of significant wave period(slope 1:1.5)

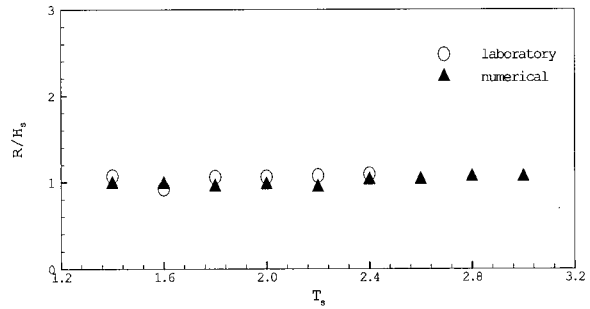


Fig. 13 Run-up versus change of significant wave period(slope 1:2.0)

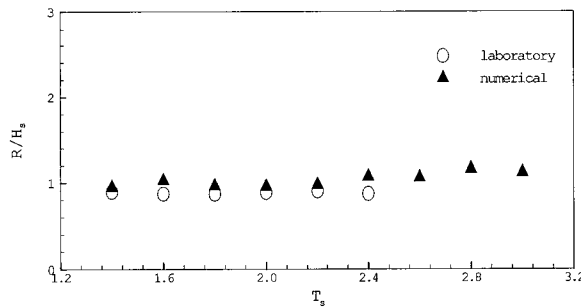


Fig. 14 Run-up versus change of significant wave period(slope 1:3.0)

름높이와 월파량에 관한 실험을 수행하였다. 처오름높이와 월파량의 중요한 변수인 파형경사, 쇄파계수와 파랑의 주기 영향에 관하여 실험하였다. 또한, 수치모형실험을 이용하여 실험결과를 검증하였으며, 수치모형실험에서 얻을 수 없었던 결과를 예측할 수 있었다. 처오름높이 분석에서 파형경사의 영향은 복잡한 파랑과 구조물간의 상호작용으로 인한 영향으로 큰 변화를 찾아볼 수 없었다. 쇄파계수의 변수 값이 일정한 값 이상이 되면 상대 처오름높이는 더 이상 증가 하지 않고 일정한 값을 유지하는 결과를 보였다. 월파량 분석의 경우 파

형경사와 주기의 변화에 따라 월파량이 크게 차이가 남을 알 수 있었다. 수치모형실험에서는 수치모형실험의 결과와 잘 일치함을 알 수 있으며, 수치모형실험의 기계적 한계로 인하여 실험하지 못한 부분을 수치모형실험으로 보완하였다. 수치모형실험과 수치모형실험을 상호 보완적 관계로 사용함으로써 좀 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

기존의 방파제 설계에 사용되고 있는 Hudson 공식은 파랑의 주기 및 제체의 투과성을 고려하지 않은 공식으로 파형경사의 증감에 대한 변화가 매우 둔감하다.

Van der Meer 공식은 Hudson 공식에 비하여 진보한 공식이기는 하나 파형경사 적용 및 테트라포드 단면에 대한 실험식이 없어 다양한 요소가 고려된 새로운 설계식이 필요함을 알 수 있다. 따라서, 이 실험 결과를 통해 다양한 주기 및 파고에 따른 파랑을 분석하여 가장 적절한 파형 경사를 가진 보다 안전한 방파제 설계를 통해 우리나라에 적합한 좀 더 나은 설계 방법의 기초 자료로 제공되고자 한다.

향후 연구에서는 다양한 테트라포드의 중량과, 다른 형상의 사석경사식 방파제에서 처오름높이가 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 감사의글

본 연구는 산학연 공동기술개발 컨소시엄 과제로 중소기업청, 서울특별시 및 (주)대영엔지니어링으로부터 재정적 보조를 받았기에 이에 사의를 표합니다.

### 참 고 문 헌

- 이달수, 염기대, 김창일, 오영민 (2003). 경사식 방파제의 사면 변형에 관한 실험연구. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, pp. 5053-5058.
- 조용식, 전찬후, 이종인 (2003). 사다리꼴형상 투과성 수중방파제에 의한 정현파의 Bragg 반사. **한국수자원학회 논문집**, 제36권, 제5호, pp. 741-749.
- Battjes, J.A., (1974). Surf similarity. *Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*, Vol. 1, pp. 466-480, Virginia, USA.
- Goda, Y. and Suzuki, Y., (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 828-845, Hawaii, USA.
- Goda, Y., (2000). Random seas and design of maritime structures 2nd edition, World Scientific, Singapore.
- Hall, J.V. and Watts, J.W., (1953). Laboratory investigation of the vertical rise of solitary waves on impermeable slopes. *Technical Memorandum 33, Beach Erosion Board*, US Army of Corps of Engineers, USA.
- Herbich, J.B., (1990). Wave run-up and overtopping, *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, edited by J.B. Herbich, pp. 727-834, Gulf Publishing Company, USA.
- Melito, I. and Melby, J.A., (2002). Wave runup, transmission, and reflection for structures armored with CORE-LOC. *Journal of Coastal Engineering*, Vol. 45, pp. 33-52.
- Liggett, J.A. (1994). Fluid mechanics, McGraw-Hill.
- Liu, P.L.-F., Lin, P., Chang, K.-A. and Sakakiyama, T., (1999). "Numerical modeling of wave interaction with porous structures." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 322-330.
- Ohyama, T., (1987). "Laboratory experiments for wave motions and turbulence flows in front of a breakwater." *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, Japan*, Vol. 381, pp. 189-198, (in Japanese)
- Sakakiyama, T. and Liu, P.L.-F., (2001). A boundary element analysis for cnoidal wave runup. *Journal of Coastal Engineering*, Vol. 44, pp. 117-139.
- van Gent, M.R.A., (1995). Wave interaction with permeable coastal structures. Ph.D. thesis, Delft University, The Netherlands.

(논문번호:05-83/접수:2005.06.21/심사완료:2005.09.29)