

## 경사식 방파제 후면에서 월파의 거동분석: 규칙파 대상

### Behavior of Overtopping Flow in the leeside of Rubble Mound Breakwater: Regular Waves

류용욱<sup>1</sup>, 이종인<sup>2</sup>, 김영택<sup>3</sup>, 정태화<sup>1</sup>  
 Yong-Uk Ryu<sup>1</sup>, Jong-In Lee<sup>2</sup>, Young-Taek Kim<sup>3</sup>, and Tae-Hwa Jung<sup>1</sup>

#### 1. 서 론

방파제에서 발생한 월파가 큰 운동량을 갖는 경우에는 배후면으로 제트흐름과 같은 거동을 보이며 자유수면으로 관입하거나 배후사면의 사석 위로 내습하게 된다. 이와 같은 월파 거동은 방파제 배후면의 안정성에 직접적인 영향을 주므로 안정성 연구에 있어서 중요한 요소이다. 월파는 수심 및 파랑조건과 방파제 형상에 따른 기하학적인 조건에 따라 그 거동에 영향을 받는데 이는 결과적으로 방파제 배후면의 안정성과 상관관계를 갖는다고 할 수 있다.

배후면의 안정성 분석에 있어서 월파는 중요한 요소임에도 불구하고, 지금까지 배후면 안정성에 관한 대부분의 연구는 월파 거동을 고려하지 않고 사석의 이탈여부만을 확인하여 안정성 검토를 수행하였다(Anderson 등, 1992; Van Dijk, 2001; Verhagen 등, 2003; Van Gent과 Pozueta, 2004). 위 연구들은 외부조건인 파랑조건에 따른 안정성을 검토할 수 있으나 그 파랑이 배후사면에 도달하여 안정성에 영향을 미치는 과정에서 중요한 원인인 월파를 간과하였다.

Kudale과 Kobayashi(1996)는 배후면으로 떨어지는 월파의 거동 특성을 바탕으로 배후면에서의 월파를 월파제트(overtopping jet)라고 하였다. 월파제트는 유속 및 층두께에 따라 운동량 및 운동방향이 변한다. 월파제트가 배후사면의 사석

위로 내습할 경우 운동량은 사석에 충격량으로 전해지고, 수면 위로 관입시 유속은 감소하나 부력과 함께 사석의 이탈에 영향을 준다. 따라서 배후사면의 설계에 있어서 월파제트의 관입거리는 중요한 고려사항이 될 수 있다. Fig. 1은 월파제트의 개요도이다.

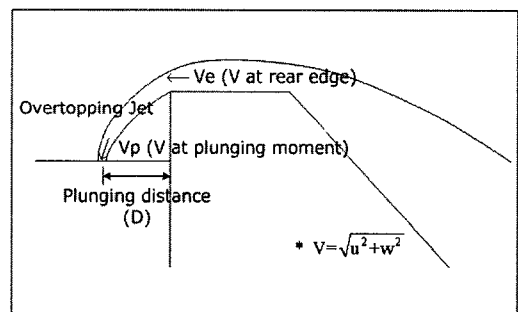


Fig. 1. Scheme of Overtopping jet

본 연구에서는 수리모형실험을 수행하여 경사식 방파제 배후면으로 떨어지는 월파의 거동을 분석하였다. 월파거동에 미치는 파랑의 영향을 검토하기 위해 다양한 파랑주기 및 파고를 갖는 규칙파를 대상으로 하였으며, 월파거동은 월파의 관입거리 및 전면유속을 측정하여 분석하였다. 월파측정은 그림자기법(shadowgraphy)을 응용한 영상기법을 이용하였으며, 디지털화상분석과 상관관계기법을 적용하여 월파수괴의 관입거리 및

1 발표자: 한국건설기술연구원 하천해양연구실 박사후과정  
 2 한국건설기술연구원 하천해양연구실 책임연구원  
 3 한국건설기술연구원 하천해양연구실 선임연구원

유속결과를 얻었다. 파랑조건에 따른 월파의 측정값 분포를 제시하여 월파거동과 파랑조건과의 관계를 검토하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치 및 조건

본 수리모형실험은 한국건설기술연구원 하천해안연구실의 단면조파수조에서 수행하였다. 단면수조는 폭 1.2m, 높이 1.5m, 길이 50m의 수로와 전기서보 피스톤식 조파기, 그리고 반사파를 최소화할 수 있는 소파층으로 구성되어 있으며, 측면은 강화유리로 되어 단면의 광학적 측정이 가능하다.

경사식 방파제 모형은 너비 0.34m의 케이슨과 전면에 1:1.5의 사면경사를 갖고, 제체는 tetrapod(TTP), 중간피복석 및 속채움 사석으로 구성되었으며, 중량 및 두께는 안정성을 갖는 범위에서 결정하여 이동 및 이탈을 최소화하였다. 케이슨의 배후면은 사면이 없는 직립식으로, 이는 월파와 자유수면의 접촉지점인 관입거리를 측정하기 위함이다. Fig. 2는 방파제 모형의 모식도이다.

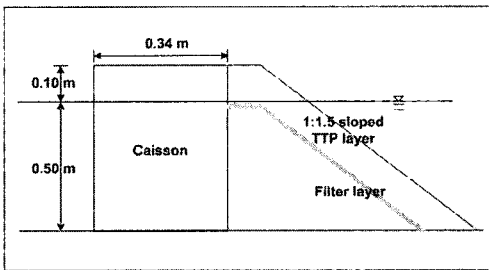


Fig. 2. Sketch of Breakwater model

규칙파를 입사파로 적용하였으며, 주기(T)는 1.2초~2.4초 범위로 0.3초 간격으로 5개 주기를 변화시켰으며, 파고(H)는 0.02m 간격으로 0.10m~0.16m 범위에서 4개 파고를 대상으로 하였다. 수심은 0.5m로 일정하게 하였으며, 방파제 마루높이(Rc)를 0.1m로 고정하여 파고에 의해 Rc/H를 변화시켰다.

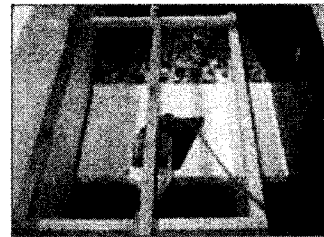
### 2.2 실험절차 및 자료분석

본 연구에서는 월파 파형을 측정하기 위해 그림자기법을 이용하였다. 그림자기법은 대상체를 촬영하는 카메라의 반대편에 조명을 위치하여 공

기와 물의 경계면을 가시화하는 기법으로서 자유수면 및 기포 측정에 사용된다(Ryu 등, 2005). 본 연구에서는 이와 같은 경계면을 추적분석하여 관입거리 및 파형을 얻었다. 조명장치를 위해 수조 내 측면과 평행하게 얇은 아크릴판을 설치하고 그 후면에 할로젠등을 놓아 면광을 발생시켰다. Fig. 3은 수로 내 설치된 방파제 모형과 조명장치를 보여준다. 월파의 녹화는 고속카메라를 이용하여 200Hz의 측정율로 화상을 취득하였다. 측정된 디지털화상을 영상분석하여 월파 관입거리를 얻었으며, 연속된 화상에 녹화된 월파수피전면의 상관관계를 이용하여 전면유속을 계산하였다. 각 실험안에서 파고변화가 미미한 조건에 해당하는 약 100개의 월파에서 측정된 월파거리와 유속을 평균하여 각 실험안에 해당하는 대표값으로 결정하였다.



(a) side view

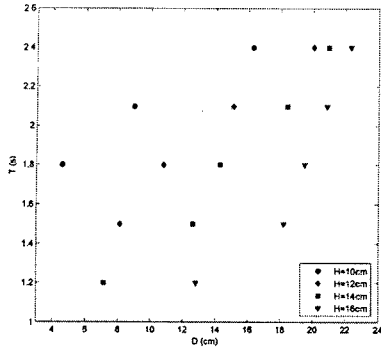


(b) top view

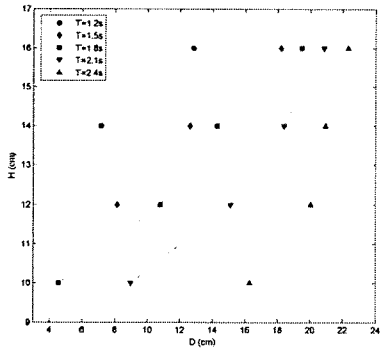
Fig. 3. Setup of model and shadowgraphy

## 3. 결과

Fig. 4는 주기와 파고 변화에 따른 월파 관입거리의 실험결과이다. Fig. 4(a)와 (b)는 같은 결과로서 주기와 파고에 대해 각각 도시하였다. 그림 안에 도시되지 않은 실험안은 관입거리가 4cm 미만인 경우로서 그 편차와 오차가 크기 때문에 제외되었다. 그림에 제시된 분포로부터 주기와 파고가 증가할수록 관입거리는 증가하는 것을 알 수 있다. 관입거리의 분포는 주기와 파고 증가에 대해 작은 주기와 파고를 제외한 실험안의 경우에서 대략 선형적인 증가를 보였다.



(a) D vs. T



(b) D vs. H

Fig. 4. Plunging distance of overtopping jet

Fig. 5와 Fig. 6은 같은 조건아래에서 측정된 월파수괴의 전면유속크기의 결과이다. Fig. 5는 월파수괴가 구조물 상치의 후면선단을 지날 때의 유속크기( $V_e$ )를 나타내고, Fig. 6은 자유수면으로 관입하는 순간의 유속크기( $V_p$ )결과를 보여준다. 결과는 관입거리의 증가 양상과 유사하게 주기와 파고가 증가함에 따라 전면유속크기가 증가하였다. 관입순간의 전면유속크기( $V_p$ )는 후면선단에서 전면유속크기( $V_e$ )에 비해 큰 값을 보여주는데, 이는 상치를 지나며 배후면으로 떨어지며 중력을 영향을 받은 것으로 판단된다. Fig. 7은 두 유속크기의 차를 도시하였으며, 주거나 파고의 크기가 작을수록 두 유속의 차가 크다는 것을 알 수 있다. 상대적으로 긴 주거나 높은 파고는 큰 운동량을 갖는 월파를 발생하므로 이때 월파는 중력에 의한 연직방향 운동량의 영향이 작은 반면, 짧은 주거나 낮은 파고에 의한 월파는 수평운동량이 미미하여 배후면에서 낙하 작용하는 이후 중력가속도에 의한 연직방향 운동량의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

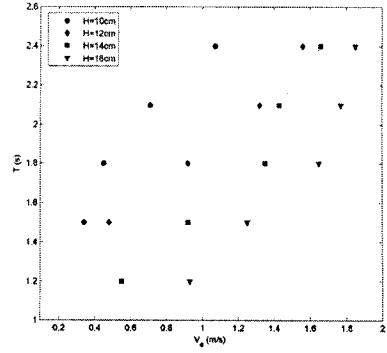


Fig. 5. Velocity at the rear edge of the superstructure

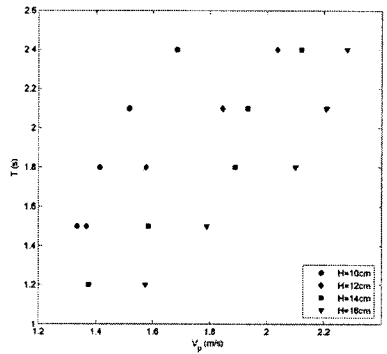


Fig. 6. Velocity at the plunging moment

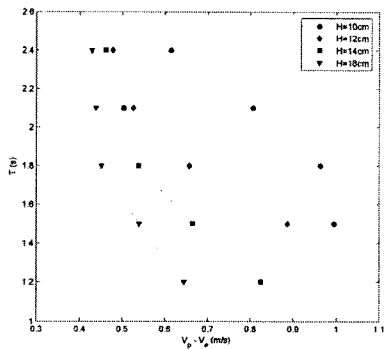


Fig. 7. Difference between  $V_e$  and  $V_p$

#### 4. 결 론

본 연구는 방파제 배후면의 안정성에 직접적인 영향을 주는 월파 거동을 분석하기 위하여, 규칙 파를 대상으로 하는 수리모형실험을 수행하였다. 배후면에서 월파의 관입위치와 관입유속을 검토하기 위해 영상기법을 이용하여 측정하였으며 일련의 결과를 제시하였다. 월파는 파랑주기와 파

고가 증가함에 따라 관입거리와 유속이 증가하는 경향을 보였으며, 주기와 파고에 따른 관입거리를 제시하였다. 본 연구는 방파제 배후면에서 월파거동을 분석하여 배후사면에 주는 영향을 역학적으로 규명하는 것을 목적으로 하는데, 향후 월파제의 관입거리와 유속과의 상관관계를 분석하고, 파형 및 층두께, 그리고 관입 입사각 등을 고려한 연구가 수반될 것이다.

### 참고문헌

- Anderson, O.H., Juhl, J. and Sloth, P. (1992) Rear Side Stability of Berm Breakwaters. Proc. 23rd Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1020-1029.
- Kudale, M.D. and Kobayashi, N. (1996) Hydraulic stability analysis of leeside slope of overtopped breakwaters. Proc. 25th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1721-1734.
- Ryu, Y., Chang, K.-A. and Lim, H.-J. (2005) Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater. Meas. Sci. Tech., 16, 1945-1953.
- Van Dijk, B (2001) The Rear Slope Stability of Rubble Mound Breakwaters. MS thesis, Delft U of Tech.
- Van Gent, R.A. and Pozueta, B. (2004) Rear-side Stability of Rubble Mound Structures, Proc. 29th Coast. Engrg. Conf., ASCE.3481-3493.
- Verhagen, H.J., Van Dijk, B. and Nederpel, A. (2003) Riprap Stability on the Inner Slopes of Medium-Height Breakwaters. Proc. Coast. Struc. 2003, Portland. 213-222.