

## 소파블록피복 케이슨 방파제에서 월파의 거동분석: 규칙파 조건 Behavior of Overtopping Flow of Caisson Breakwater with Dissipating Block: Regular Wave Conditions

류용욱\* · 이종인\* · 김영택\*

Yong Uk Ryu\*, Jong In Lee\* and Young Taek Kim\*

**요 지 :** 본 연구에서는 소파블록피복 케이슨 방파제 후면으로 떨어지는 월파의 거동을 분석하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 방파제 후면으로 낙하하는 월파는 배후사면으로 내습하며 배후사면의 안정성에 직접적인 영향을 준다. 본 연구에서는 배후면에서의 월파거동을 검토하기 위해 월파의 전면유속, 파형 및 관입거리를 측정하였으며, 다양한 파랑조건에 대한 월파의 특성변화를 비교 분석하였다. 수리모형실험은 파랑조건과의 상관성에 초점을 두기 위해 규칙파를 대상으로 하였으며, 월파수괴의 전면유속, 파형, 관입거리를 측정하기 위하여 그림자기법과 교차상관기법을 응용한 화상유속기법을 이용하여 측정하였다. 실험결과에 의하면 배후면에서 월파의 관입거리와 유속은 입사파의 주기와 파고가 커짐에 따라 증가함을 알 수 있었으며, 무차원변수 사이의 상사관계로부터 유속 및 거리분포에 대한 경험식을 유도하였다.

**핵심용어 :** 수리모형실험, 그림자기법, 월파, 월파제트, 월파유속, 관입거리

**Abstract :** The present study investigates the behaviour of overtopping flows falling on the leeside of a caisson breakwater with dissipating blocks through laboratory measurements. The falling overtopping flows in the leeside are expected to directly affect the leeside stability of the breakwater. This study focuses on not the resultant stability but the characteristic pattern of the overtopping flows depending on wave conditions through examining front velocity and plunging distance in the leeside. Regular waves were used to investigate the dependence of the overtopping flow pattern on wave conditions and a modified image velocimetry combining the shadowgraphy and cross-correlation method was employed for measurements of image and velocity. From the measurements, it is shown that the plunging distance and front velocity of the overtopping flow in the breakwater leeside increase as the wave period or height increases. From non-dimensional relationships between the variables, empirical formula for the velocity and overtopping distance are suggested.

**Keywords :** hydraulic model test, shadowgraphy, overtopping, overtopping jet, overtopping velocity, plunging distance

### 1. 서 론

소파블록피복 케이슨 방파제에서의 월파는 상치콘크리트, 후사면 안정성 및 전달파 등의 생성에 영향을 미친다. 특히, 방파제에서 발생한 월파가 큰 운동량을 갖는 경우에는 배후면으로 제트흐름과 같은 거동을 보이게 되고, 자유수면으로 관입하여 방파제 내측에 파랑을 발생시키거나

후사면에 직접 내습함에 따라 월파수괴의 에너지가 체체에 전달되게 된다. 이와 같은 월파 거동은 방파제 후사면의 안정성 확보에 직접적인 영향을 주므로 방파제 안정성 연구에 있어서 중요한 요소라 할 수 있다.

월파는 수심, 파랑조건 및 방파제 형상에 따른 기하학적 조건 등에 따라 그 거동특성이 결정되고, 생성된 월파는 방파제 배후면에 직접적으로 영향을 주기 때문에 파

\*한국건설기술연구원 하천·해양항만연구실(Corresponding author: Jong-In Lee, River, Coastal and Harbor Research Division, KICT, Ilsan, Gyeonggi 411-712, Korea)

랑조건과 월파, 그리고 방파제 배후면의 안정성은 서로 상관관계를 갖는다고 할 수 있다. 지금까지 배후면 안정성에 관한 연구의 대부분은 월파 거동을 고려하지 않고 파랑조건에 따른 배후면 피복재의 이탈여부를 확인하여 안정성을 검토하였다(Anderson et al, 1992; Van Dijk, 2001; Verhagen et al, 2003; Van Gent and Pozueta, 2004). 기존 연구들은 외력조건이라 할 수 있는 파랑조건과 배후면 안정성과의 관계를 파악할 수 있는 장점이 있으나, 내습하는 파랑에너지를 배후면에 전달하는 중간과정인 월파 과정에 대한 분석이 생략되어 있다. 배후면의 피복재가 이탈되고, 에너지 전달에 의해 전달파가 발생하는 것은 월파수괴의 운동량과 직접적인 연관을 가지기 때문에 월파수괴의 운동량을 포함하는 월파수괴의 거동특성에 관한 연구는 배후면 안정성에 관한 역학적 분석에 있어서 필요한 과정이므로 이에 대한 연구는 보완되어야 한다. 국내에서는 최근 월파거동을 분석하기 위해 신뢰성 해석을 이용하는 연구들이(이, 2003; 오 등, 2006)이 소개되었으나, 월파의 운동량보다는 월파량 산정에 초점을 맞추어 역학적 분석에는 제약을 받는다. 이와 같이 월파에 관한 기존 연구의 대부분은 월파량 계측, 전달파 분석 등에 초점을 두고 있으며, 월파유속, 층두께 등과 같은 월파의 세부적인 거동특성의 검토에 있어서는 다소 부족한 측면이 있다.

월파수괴의 운동량을 검토할 수 있는 월파유속 및 층두께 측정에 대한 실험적 연구는 계측장비 문제로 인해 제한적으로 수행되어왔다. 이러한 제한적 실험의 원인으로서는 월파의 빠른 진행과정과 파랑조건이 극한조건으로 갈수록 내습에 의해 발생하는 기포연행을 들 수 있으며, 기존에 사용되는 대부분의 측정기법으로는 큰 오차가 발생하여 측정결과의 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. 기포를 포함하여 공기와 물이 혼합된 다위상상태(multiphase)인 흐름의 측정에 있어 이와 같은 문제는 쇄파측정에 관한 실험 연구에서도 보고되었다(Chang and Liu, 1999; Govender et al, 2002). 국내연구에서 유 등(2007)은 쇄파에 의해 발생한 월파의 유속측정 결과를 제시하였으며, 다위상상태의 월파를 측정하기 위해 PIV(particle image velocimetry) 기법을 변형한 기법, 즉 기포화상의 교차상관관계를 적용한 응용기법을 통해 기포분포가 큰 영역에서 좋은 결과를 보여주었다.

월파 유속이 큰 경우, 월파는 배후면으로 이동하며 구조물 상치콘크리트 후면전단을 이탈하게 되는데, 배후면으로 낙하하는 월파수괴는 체트흐름과 유사한 거동형태를 보이며 관입된다. Kudale and Kobayashi(1996)는 이와

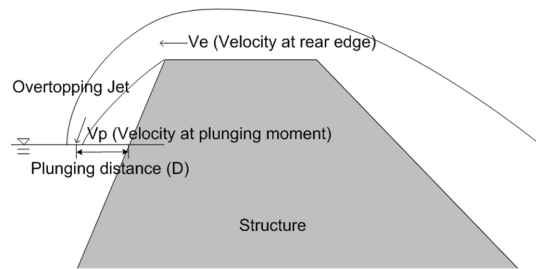


Fig. 1. Schematic sketch of overtopping jet.

같은 월파의 거동특성을 바탕으로 배후면에서의 월파를 월파제트(overtopping jet)라고 하였다. Fig. 1은 월파제트의 개념도이다. 내습파에 의한 월파제트는 제체 배후면이나 항내측 수면과 만나는 마지막 단계의 형태로서 그 거동특성은 배후면의 안정성과 전달파 생성 등에 영향을 미치게 된다. 구조물로부터 이탈된 월파제트는 낙하하는 형태와 배후사면의 형상에 따라 배후사면으로 내습하거나 수면으로 관입된다. 월파제트가 배후사면의 보호공이나 사석 위로 내습할 경우, 그 운동량은 제체에 충격량으로 전달되며, 이러한 충격량과 후사면 피복재의 조건에 따라 배후면의 안정성이 결정된다. 월파제트가 자유수면으로 관입하는 경우는 빠른 유속으로 인해 제체로부터 멀리 관입하거나, 배후사면의 경사가 급할 때 발생할 수 있다. 이러한 경우의 월파제트는 배후사면에 직접적인 영향을 미치지 않고, 전달파 생성 및 관입지점 부근에 흐름을 발생시키며 후사면의 안정성에 간접적인 영향을 줄 수 있다. 월파제트가 수면으로 관입하는 경우는 그 관입지점이 배후사면과 어느 정도 이격되어 있느냐에 따라 그 영향이 달라질 수 있다. 월파제트가 배후사면과 수면이 만나는 지점과 멀리 떨어진 곳에 관입될 경우, 후사면에 전달되는 월파제트의 영향은 미미할 것으로 예상된다. 그러나 배후사면과 수면의 교차지점에 가깝게 월파제트가 관입될 경우, 정수면 부근의 후사면은 월파제트의 직접적인 영향뿐 아니라 월파관입에 의해 운동량을 갖게 된 주변수에 의한 간접적인 영향을 받을 수 있다. 피복재가 수면아래에 위치하는 경우에는 부력이 존재하기 때문에 상대적으로 작은 외력에도 불안정하게 될 수 있으며, 기존 연구에서 자유수면에 가까운 배후사면의 안정성이 상대적으로 낮다고 보고한 사례를 찾을 수 있다(Van Dijk, 2001; Van Gent and Pozueta, 2004). 배후사면에 미치는 월파제트의 영향을 면밀히 검토하기 위해서는 유속, 층두께, 운동량, 그리고 운동방향을 고려한 월파제트 운동량과 관입에 따른 주

변수의 거동, 그리고 월파제트 및 주변수와 사석제의 상호작용에 대한 검토도 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 방파제 배후면으로 떨어지는 월파의 거동을 검토하기 위해 2차원 수리모형실험을 수행하였다. 월파거동과 파랑조건의 상관관계를 검토하기 위해 규칙파를 대상으로 하고, 파랑의 주기와 파고를 변화시키며 수행하였다. 월파의 거동 특성은 구조물 상부에서의 전면유속과 후면으로 관입하는 순간의 유속 및 관입거리를 측정하여 얻은 결과를 분석하여 검토하였다. 수리모형실험에서 월파의 파형측정은 연행기포에 의한 영향을 최소화할 수 있는 그림자기법(shadowgraphy)을 응용한 영상기법을 이용하였으며, 디지털화상분석과 상관관계기법을 적용하여 월파수피의 관입거리 및 유속결과를 분석하였다. 동일한 조건에서 반복수행된 실험결과로부터 얻어진 순간측정값을 위상평균하여 각 실험안별 대표값으로 결정하였다. 또한, 파랑조건에 따른 월파의 측정값 분포를 제시하여 그 관계를 검토하였고, 무차원변수 사이의 상관관계를 이용하여 경험식을 제시하였다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 실험장치 및 조건

본 수리모형실험은 한국건설기술연구원의 2차원 수로에서 수행되었으며, 단면수로의 제원은 폭 1.2 m, 높이 1.5 m, 길이 50 m이며, 전기서보 피스톤식 조파기, 그리고 반사파를 최소화할 수 있는 소파층으로 구성되어 있으며, 측면은 강화유리로 되어 있어 단면의 광학적 측정이 가능하다.

실험모형은 tetrapod(TTP), 중간피복층 및 속채움 사석으로 구성된 1:1.5 경사의 경사식단면으로 구성하였고, 피복재 등은 실험과 범위 내에서 안정성이 확보되는 중량을 설치하였다. 제체 후면에는 케이슨을 설치하였으며, 이는 월파와 자유수면의 접촉지점인 관입거리를 측정하기 위함이다. 사용된 케이슨은 너비 0.34 m에 높이 0.6 m이며, 케이슨 전면의 TTP는 2층 피복된다. Fig. 2는 실험에 적용된 방파제 모형의 모식도이며 세부적인 단면 제원을 보여준다. Fig. 3은 수로에 설치된 방파제 모형의 사진과 배후면으로 낙하하는 월파의 순간사진이다.

본 실험에서는 규칙파를 대상으로 하였고, 주기( $T$ )는 1.2 s~2.4 s 범위에서 0.3 s 간격, 파고( $H$ )는 0.10 m~0.16 m 범위에서 0.02 m 간격으로 구조물이 없는 상태에서 파랑이 설정되었으며, 실험에 적용된 전체 파랑은 20개 조건

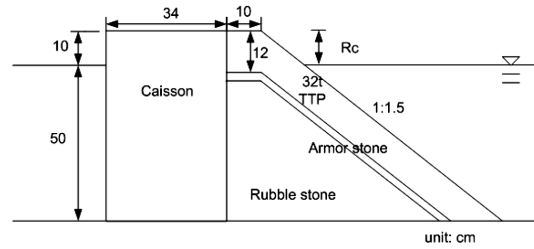
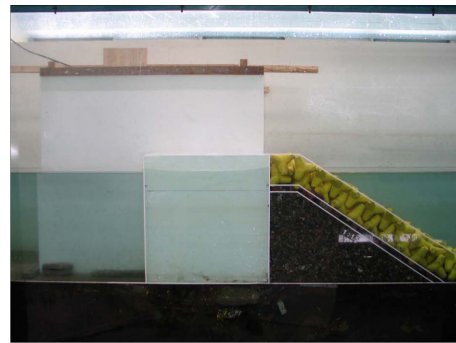


Fig. 2. Sketch of experimental model setup.



(a)



(b)

Fig. 3. View of (a) the breakwater model and (b) falling overtopping water.

에 해당된다. 제체 전면의 수심( $h$ )은 0.5 m로 일정하게 하였으며,  $kh$ 는 0.63~1.53의 범위로서 중간수심조건에 해당된다.

### 2.2 실험절차 및 자료분석

실험측정은 반사된 파랑에 의한 간섭이 없는 범위에서 수행되었다. 즉, 첫 번째 파랑이 구조물로부터 반사되어 조파판에 도달하고, 조파판에서 재반사된 파랑이 구조물에 도달하기 전까지의 시간범위에서 측정되었으며, 얻어진 자료는 자유수면변위를 확인한 후 그 편차가 일정한 구간을 분석에 이용하였다.

내습파가 구조물을 월파하게 되면 기포영역을 포함하게 되는데, 기포의 양이 많아질수록 흐름측정에 있어서 기존 유속계로는 정확도 확보측면에서 제약을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 기포영역을 포함한 월파수위의 파형과 유속을 측정하기 위해 화상을 이용한 광학적 측정기법을 이용하였다. 월파 경계면 및 기포영역을 가시화하여 화상기록을 얻기 위해 그림자기법을 이용하였고, 얻어진 흐름의 화상을 교차상관기법을 적용한 영상분석을 통해 유속을 계산하였다.

유체 경계면의 가시화를 위한 방법으로는 레이저를 유체단면으로 투과하는 화상측정기법이 널리 사용된다. 광원으로 사용되는 레이저는 회절현상이 작고 높은 세기를 가지고 있어 물-공기 경계면 및 유체안의 작은 입자의 가시화에 큰 장점을 보이는 반면, 기포가 많이 분포된 영역에서는 경계면에 의한 빛의 산란으로 인해 기록된 화상이 색포화현상을 갖게 된다. 본 연구에서는 기포에 의한 빛의 산란현상을 최소화하고 물-공기 경계면을 가시화하기 위해 광원을 후면에 배치한 그림자기법을 사용하였다. 그림자기법은 대상체를 촬영하는 카메라의 반대편에 광원을 설치하여 물-공기 경계면의 그림자를 가시화하는 기법으로서 자유수면 및 기포 측정에 사용된다(Ryu et al., 2005). 영상분석을 위해 대상체의 그림자를 제외한 배경은 밝기가 일정해야 하는데 이를 위해 광원으로는 빛세기가 고르게 분포된 면광을 발생시켜야 한다. 본 실험에서는 면광을 위해 500 W 할로겐조명 2개와 백색 아크릴판을 조합한 조명장치를 이용하였으며, 수조 측벽과 평행하게 얇은 백색 아크릴판을 설치하여 2차원적 흐름에 미칠수 있는 영향을 최소화하면서 대상체인 흐름과 조명원을 분리하였고, 그 후면에서 할로겐조명으로 아크릴판을 발광시켰다. 백색 아크릴판은 불투명한 소재로서 할로겐조명에 의한 점광을 고르게 분산시켜 면광을 발생시키게 되며, 이렇게 만들어진 면광에 의해 비추어진 공기 및 물의 유체부분은 밝은 색으로, 경계면과 기포영역은 대상체가 되어 어두운 색으로 카메라화상에 기록된다. 화상의 밝고 어두운 화상세기 정보를 바탕으로 한 영상분석을 통해 파형 및 기포의 형태를 결정하였으며, 이를 통해 관입거리 및 전면유속측정을 가능하게 하였다. Fig. 4은 수로 내 설치된 방파제 모형과 조명장치를 도시한 것이다. 실험에서 월파과정은  $O(0.1\text{ s})$  정도가 소요되는 빠른 흐름을 갖기 때문에 화상녹화는 고속카메라를 이용하여 768×512 픽셀의 해상도와 200 Hz의 측정율로 측정하였다. 카메라 메모리 내 시간적 화상배열은 파형분석과 유속분석을 동시에 할 수

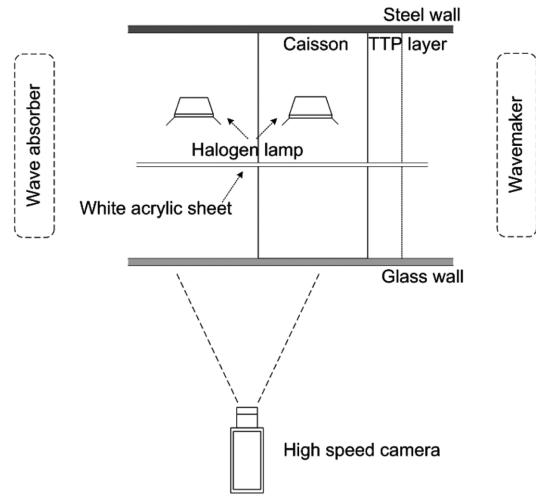


Fig. 4. Sketch of shadowgraphy setup.

있게 조절하였다. 파형분석을 위한 화상은 초당 100개로서 일정한 시간차  $dt_1 (=0.01\text{ s})$ 를 두고 측정하였으며, 각 화상에  $dt_1$ 보다 작은 시간차  $dt_2$ 를 두고 추가적인 화상을 측정하여 유속분석에 이용하였다.

본 연구에서 월파 유속측정을 위해 사용된 기법은 PIV 기법과 유사한 기법으로서 교차상관기법을 적용한 화상분석기법은 같은 반면, 그 분석대상으로 PIV기법의 입자화상 대신 월파의 물-기포 경계면 및 기포형상을 가시화한 화상을 이용하였다. 월파흐름에서 기포영역은 특히 전면에서 많이 분포하기 때문에 그림자기법과 교차상관기법을 이용한 유속은 월파전면에서 좋은 결과를 주는 반면, 후면에서는 상대적으로 작은 수의 유속벡터만이 계산되었다. 영상분석을 통해 얻어진 유속장내 오차유속은 이웃한 속도벡터의 공간분포를 이용한 통계적 후처리방법을 적용하여 1차적으로 제거한 후, 동일한 위상에 해당하는 표본들의 편차를 이용한 2차적 후처리를 수행하였다. 각 실험안별 파고값의 편차가 5% 이내에 해당하는 약 100개의 월파횟수에서 측정된 월파거리와 유속을 평균하여 각 실험안의 대표값으로 결정하였으며, 평균에 사용된 표본으로는 파고변화가 크지 않은 조건에 해당하는 월파를 선택하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

Fig. 5는 주기와 파고 변화에 따른 월파제트 관입거리( $D$ )와 여유고( $R_c$ )의 비인 상대관입거리( $D/R_c$ )와 상대파고( $H/R_c$ )의 관계를 도시한 것이다. 수행된 실험중에서 3 cm

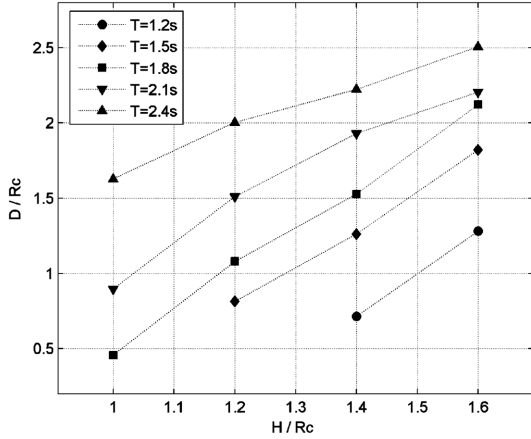


Fig. 5. Plunging distance to the rear free surface.

미만의 관입거리를 갖는 경우는 약 50%에 가까운 상대적인 편차와 오차를 갖기 때문에 분포에서 제외하였으며, 상대적으로 짧은 주기에 작은 파고를 갖는 실험과 조건이 이에 해당한다. Fig. 5로부터 동일주기 조건에서 상대파고가 증가할수록 상대관입거리는 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 증가정도는 선형적인 분포를 보인다. 상대파고에 대한 상대관입거리의 증가정도가 선형이라는 가정하에 회귀분석을 통한 파고증가에 따른 관입거리의 증가율을 추정하였다.  $T=1.5$  s의 경우, 증가율( $dD/dH$ )은 약 2.3이며, 주기가 증가할수록 증가율은 감소하여,  $T=2.4$  s인 경우에  $dD/dH=1.7$ 의 증가율을 보였다. 이로부터 파고에 대한 관입거리의 증가율은 주기가 증가할수록 감소하였으나, 그 감소정도는 크지 않음을 알 수 있다. 또한 동일 상대파고 조건에서 주기가 증가함에 따라 관입거리가 증가함을 알 수 있다. 본 연구에서 수행된 실험조건 중에서  $T=2.4$  s이고  $H/R_c=1.6$ 인 경우에  $D/R_c=2.5$ 로 분석되었으며, 이는 내습파 파장( $L$ )의 0.05배(즉,  $D=0.05L$ )에 해당된다. 그리고  $T=1.2$  s이고,  $H/R_c=1.6$ 인 경우에는  $D/R_c=1.3$ 로 나타났다.  $T=2.4$  s에 해당하는 파장은  $T=1.2$  s에 해당되는 파장의 약 2.5배인 반면, 관입거리는 약 2배 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 본 연구에서 고려한 변수를 차원해석하여 얻은 무차원변수간의 상관관계를 나타낸 것이다. 즉, 상대파고( $H/R_c$ ), 상대관입거리( $D/R_c$ ) 및 상대주기( $gT^2/L$ ) 사이의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과로부터 무차원변수 사이에는 선형적인 상관관계가 있음을 알 수 있고, 회귀분석으로부터 다음과 같은 관계식을 유도하였다. 식의 결정계수(coefficient of determination)는  $R^2=0.89$ 이다.

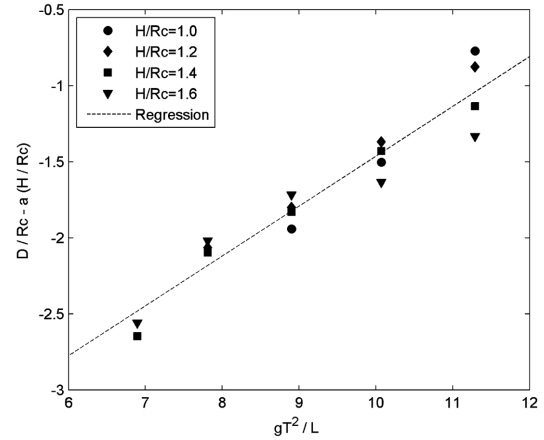


Fig. 6. Relationship between dimensionless variables: plunging distance.

$$\frac{D}{R_c} - a \frac{H}{R_c} = b \frac{gT^2}{L} - c \quad (1)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $a$ 는 무차원변수간의 상관관계를 만족시키는 결정계수로서 2.40의 값을 가지며,  $b$ 와  $c$ 는 최소자승법을 이용한 회귀분석으로 얻은 계수로서 각각 0.33과 4.74의 값을 가진다. 식 (1)을 관입거리  $D$ 에 관한 경험식으로 표현하기 위해 실험에 고려된 변수들을 이용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$D = f_D(H, T, L, R_c) \\ = aH + b \frac{gT^2}{L} R_c - cR_c \quad (2)$$

식 (2)로부터 월파제의 관입거리는 파고와 주기에 비례함을 알 수 있다. 여유고의 경우에는 식 (2)의 우변 제3항의 계수가 제2항의 계수보다 항상 크기 때문에 반비례하는 경향을 보인다.

Fig. 7은 상치콘크리트 후면선단에서의 월파수괴 유속과 파랑조건(주기 및 파고)과의 관계를 검토하기 위해 위상속도( $C$ )로 무차원화한 월파수괴의 후면선단유속( $V_p$ )을 각 주기별 상대파고에 대해 도시한 것이다. 월파수괴의 후면선단유속  $V_p$ 는 월파가 구조물의 상치콘크리트 후면선단을 이탈하기 전, 즉 월파제트로 형성되기 직전의 월파수괴 전면유속으로서 처오름 이후 월파는 이 순간까지 수평방향의 주도적인 운동을 하게 된다. 상치콘크리트 후면선단을 이탈한 월파수괴는 초기 수평유속을 갖는 자유낙하운동을 하게 되며, 이러한 월파제의 운동특성으로 인해 항내측

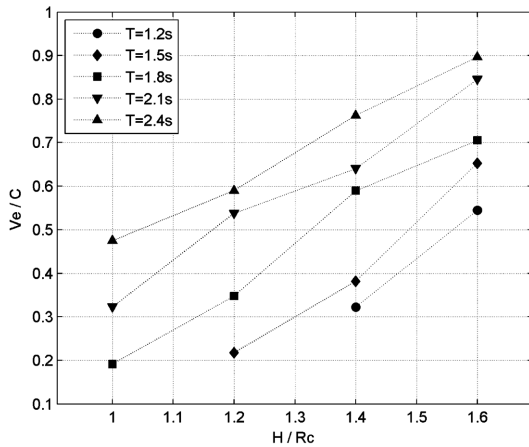


Fig. 7. Velocity at the rear edge of the breakwater deck.

수면으로 관입하는 월파제의 관입거리는 월파수피의 후면선단유속과 상관관계가 있을 것으로 판단된다. 상대후면선단유속( $V_e/C$ )의 분포는 월파 관입거리의 분포와 유사하게 파고가 증가함에 따라 유속이 커지는 경향을 보였으나, 증가되는 분포형태에 있어서 특징적인 양상은 보이지 않았다. 파고증가에 따른 후면선단유속의 증가율을 분석하기 위해 회귀분석으로 증가율을 검토하였다. 회귀분석으로부터 얻어진 파고증가에 따른 유속 증가율은 주기가 길어질수록 감소하였으나, 그 차이가 미미하여 주기에 따른 증가율의 변화가 크지 않음을 알 수 있었다. Fig. 5와 Fig. 7에 제시된 결과로부터 관입거리와 후면선단유속의 파고 및 주기에 대한 분포경향이 서로 유사하다는 것을 알 수 있으며, 이는 관입거리가 월파의 후면선단유속과 상관관계가 있음을 보여준다. 본 연구에서 수행된 실험인 중 측정된 최대 후면선단유속은 약 1.87 m/s로서 동일한 파랑조건에 해당하는 위상속도의 약 0.9배 크기를 갖는다. 동일한 주기에서 파고가 약 37% 감소할 때 후면선단유속은 위상속도의 약 45%정도 감소하였으며, 주기가 감소하는 경우에도 5% 내외의 차이만을 보였다.

Fig. 8은 실험조건 및 측정값을 바탕으로 무차원화된 후면선단유속, 파고, 그리고 주기 사이의 관계를 나타낸 것으로서 계수( $\alpha$ )의 적절한 결정을 통해 얻어진  $\frac{V_e}{C} - \alpha \frac{H}{R_c}$ 와  $\frac{gT^2}{L}$  사이의 상사관계를 도출하였다. Fig. 8에 제시된 분포가 선형성을 갖는다는 가정하에 회귀분석을 실시하였으며, 이로부터 얻어진 경험식은 다음과 같다. 식의 결정계수 (coefficient of determination)는  $R^2=0.92$ 이다.

$$\frac{V_e}{C} - \alpha \frac{H}{R_c} = \beta \frac{gT^2}{L} - \gamma \quad (3)$$

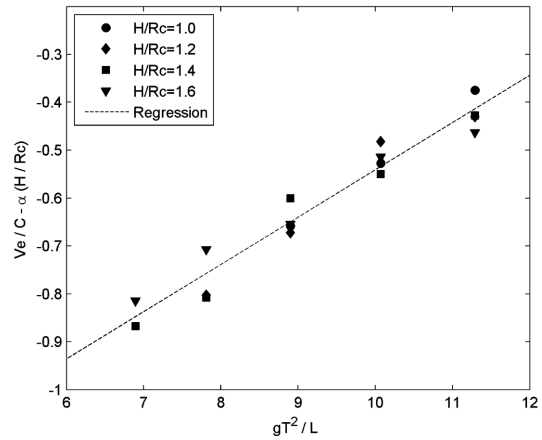


Fig. 8. Relationship between dimensionless variables.

여기서,  $\alpha$ 는 0.85이며, 선형회귀분석에 의해 얻어진 계수  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 각각 0.10과 1.53의 값을 갖는다. 월파 후면선단 유속  $V_e$ 는 영향을 미치는 변수들을 고려하여 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$V_e = f_{V_e}(H, T, R_c, C) = \alpha \frac{H}{R_c} C + \beta gT - \gamma C \quad (4)$$

Fig. 9는 월파제가 항내측 자유수면으로 관입하는 순간의 유속크기를 도출한 것이다. 배후면 안정성분석에 있어 사석 및 보호공에 가해지는 충격량을 결정하는 월파제의 운동량 산정은 중요한 부분이다. 월파제트 관입 유속( $V_p$ )은 월파제의 운동량 산정에 필요한 요소로서 흐름의 충동계와 더불어 배후면 안정성에 영향을 주는 중

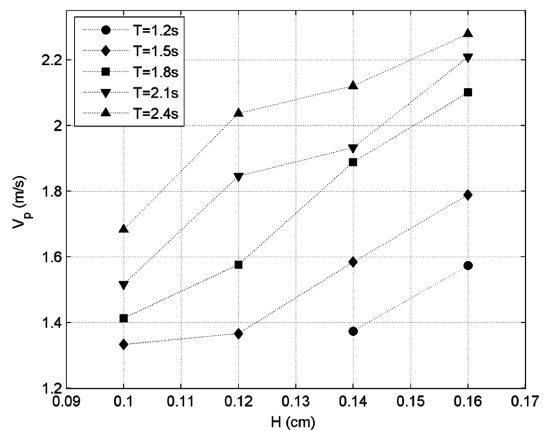


Fig. 9. Plunging velocity of overtopping jet at the rear free surface.

요한 인자이다. Fig. 7에 제시된 월파수괴 후면선단유속에 비해 월파제트의 관입유속은 파고증가에 대해 다소 큰 편차를 갖는 분포를 보이거나 파고가 증가함에 따라 월파제트의 관입유속이 커지는 경향은 유사하게 나타났다. 각 상대파고별 관입유속 또한 주기가 증가함에 따라 증가하는 형태를 보였으나, 그 증가율은 후면선단유속의 분포에 비해 일정하지 않음을 알 수 있다. 월파제트의 관입유속은 월파수괴의 후면선단유속에 비해 상대적으로 큰 크기를 갖는데, 이는 월파가 구조물에서 이탈하면서 중력가속도에 의한 연직방향운동에 영향을 받기 때문으로 판단된다. Fig. 10은 월파제트 관입유속( $V_p$ )과 월파수괴전면의 후면선단유속( $V_e$ ) 차이를 위상속도( $C$ )에 대한 상대값으로 도시한 것이다. 두 유속의 크기차이는 주기가 길고 파고가 클수록 작아졌으며, 주기가 짧고 파고가 작을수록 유속차가 증가하였다. 이와 같은 유속차이의 분포경향은 전술한 바와 같이 후면으로 낙하하는 월파제트의 거동특성에서 찾을 수 있다. 구조물 상부로 진행되는 월파는 처오름 이후 상치콘크리트 후면으로 진행하며, 이때 주된 운동성분은 수평성분이라 할 수 있다. 월파수괴가 상치콘크리트 후면을 지나는 순간부터 낙하운동이 시작되며, 낙하운동은 연직방향 유속을 발생시키고 유속크기를 증가시키게 되는데, 수평유속성분이 상대적으로 작을수록 전체유속크기는 연직유속성분에 의해 크게 좌우된다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 상대적으로 긴 주기와 높은 파고 조건에서 월파는 구조물의 후면선단에서 수평성분이 주를 이루는 큰 유속크기를 갖게 되며, 이 경우에 연직유속성분에 의한 월파제트의 관입유속크기의 변화는 작아진다. 이와 반대로, 월파 후면선단유속이 작은 경우에는 월파제트

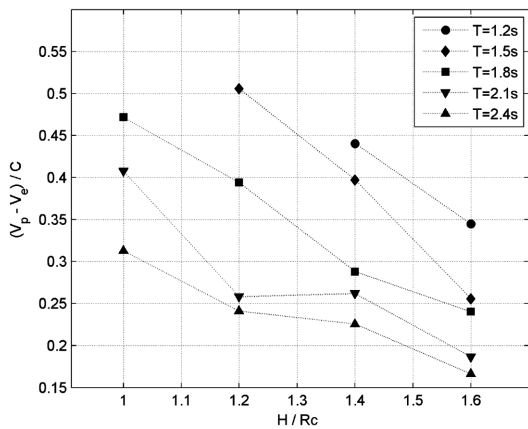


Fig. 10. Difference between plunging velocity of overtopping jet and overtopping velocity at the rear deck edge.

관입유속크기는 연직방향 유속성분에 의해 증가하게 된다. Fig. 10에 도시한 유속차이는 낙하운동이 이와 같은 월파제트의 관입유속크기에 미치는 영향을 설명해 주는 것이다. 월파제트의 관입거리와 관입유속 그리고 월파 후면선단유속의 분포로부터 주기와 파고가 클수록 월파의 수평 유속성분은 증가하고, 이에 따라 월파제트는 관입거리가 증가하며 수평에 가까운 운동방향을 갖는 반면, 주기와 파고가 감소할수록 월파유속은 감소하여 관입거리는 짧아지고 월파제트의 관입유속은 연직에 가까운 운동방향을 갖는다는 것을 알 수 있다.

파고 및 주기 조건에 따른 측정값의 분포를 통해 월파제트 관입거리와 월파 후면선단유속의 경험식인 식 (2)과 식 (4)를 각각 유도하였으며, Fig. 11과 Fig. 12는 각 경험식에 의한 예측값과 측정값을 비교 도시한 것이다. Fig. 11에 도시한 관입거리의 비교에서는 식 (2)에 제시된  $f_D$ 에 의한 값과 함께 월파 후면선단유속  $V_e$ 에 의한 예측값도 함께 비교하였다.  $V_e$ 를 이용한 예측값은 월파제트가 수평방향유속의 감소가 작은 자유낙하운동을 한다는 가정 하에 얻어진 값으로서  $V_e$ 에 낙하시간을 곱하여 관입거리를 계산하였다. 여유고  $R_c$ 에서 중력가속도  $g$ 에 의해 낙하하는 시간은  $t = \sqrt{2R_c/g}$ 로서 관입거리는 간단하게 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D = V_e \cdot \sqrt{2R_c/g} \quad (5)$$

관입거리의 비교를 위해 측정값( $V_{e, \text{meas}}$ )와 식 (4)에 제시된 경험식  $f_{ve}$ 로부터 얻어진  $V_e$ 를 이용하여 얻어진 관입거리를 Fig. 11에 도시하였다. 식 (2)로부터 얻어진 관입

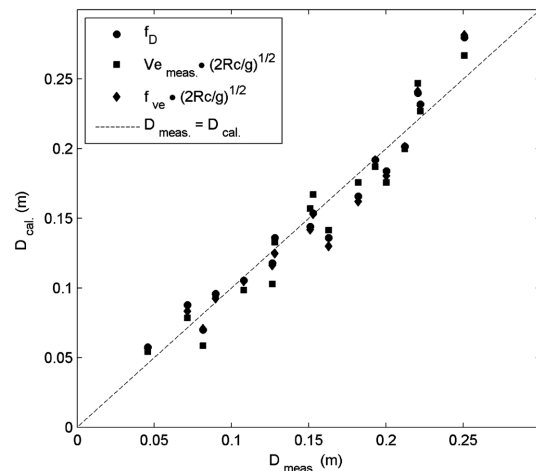


Fig. 11. Comparison of plunging distance.

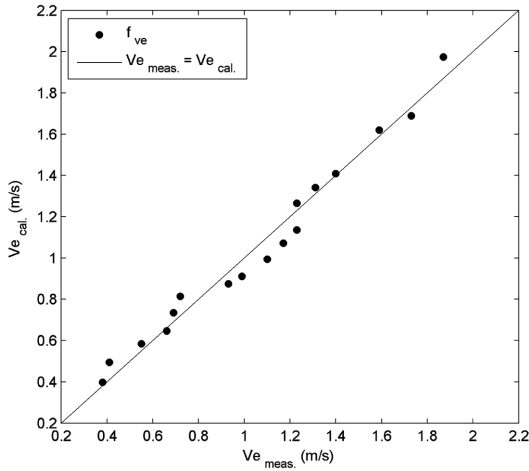


Fig. 12. Comparison of overtopping velocity at the read deck edge.

거리는 측정값과 양호한 일치성을 보였고, 후면선단유속으로부터 유도된 계산값도 측정값과 큰 차이를 보이지 않았다. 이로부터 후면선단유속을 적용하기 위한 자유낙하운동의 가정이 적합하였음을 알 수 있고, 이는 월파체의 낙하운동에 대한 다른 외부인자의 영향이 미미했기 때문으로 판단된다. Fig. 12는 월파 후면선단유속  $V_e$ 의 측정값과 경험식  $f_{ve}$ 에 의한 값을 비교한 것으로서 Fig. 11의 관입거리 비교와 마찬가지로 좋은 일치성을 보였다. 월파체트 관입거리의 비교로부터 월파체트는 외부 인자에 의한 영향을 크게 받지 않음을 알 수 있으며, 동일한 가정 하에 월파체의트 관입유속크기  $V_p$ 를  $V_e$ 로부터 추정하였다. 초기 연직방향 유속이 없다는 가정 하에 중력가속도  $g$ 에 의해 여유고  $R_c$ 만큼 낙하할 때 연직방향유속은  $V_g = \sqrt{2gR_c}$ 이다. 월파체의트 관입유속크기( $V_p$ )는 수평성분이 주를 이루는  $V_e$ 와 연직방향유속  $V_g$ 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$V_p = \sqrt{V_e^2 + 2gR_c} \quad (6)$$

식 (6)의  $V_e$ 에 측정값( $V_{e,meas}$ )과 식 (5)로부터 얻어진 값을 적용하여 관입거리를 계산하였으며, Fig. 13에 측정값과 비교 도시하였다. Fig. 12의 결과와 마찬가지로  $V_e$ 의 측정값과 경험식을 이용한 값은 서로 유사한 분포를 보였으나,  $V_p$ 의 측정값에 비해 계산값이 전체적으로 약간 큰 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.  $V_e$ 를 이용한 두 종류의 계산값 모두 측정값에 비해 최대 20%정도 큰 크기를 보였는데, 유속크기가 크거나 작은 영역에서 그 차이가 두드러졌다. 월파 후면선단유속을 이용한 월파체트 관입유

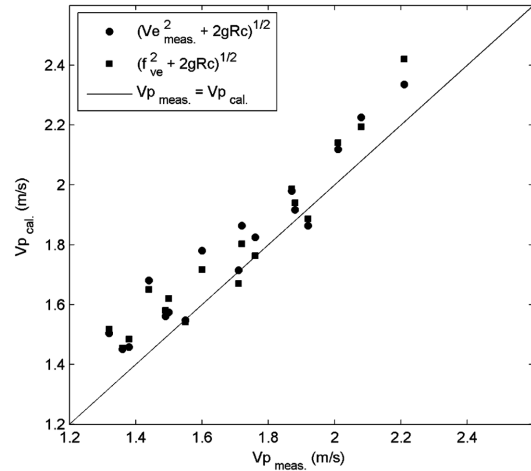


Fig. 13. Comparison of plunging velocity of overtopping jet.

속의 추정은 관입거리에 비해 측정값과의 차이가 상대적으로 컸으나 그 오차가 20%내로 양호한 일치성을 보였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 방파제 배후면의 안정성에 직접적인 영향을 미치는 월파거동을 분석하기 위해 규칙파를 대상으로 한 수리모형실험을 수행하였다. 월파거동의 분석을 위해 구조물 후면선단에서의 월파 유속, 배후면으로의 월파 관입거리, 그리고 배후면에서 발생하는 월파체의트 관입시 유속을 측정하였다. 월파의 파형과 유속을 측정하기 위해 그림자기법을 응용한 영상기법을 이용하였으며 일련의 결과를 제시하였다. 구조물 상부의 월파수괴와 배후면의 월파체트는 주기와 파고가 증가함에 따라 그 유속이 증가하였으며, 관입거리 또한 증가하는 경향을 보였다. 주기와 파고에 대한 측정값의 무차원화한 분포로부터 얻어진 상관관계를 이용하여 구조물 후면선단에서의 월파 유속과 관입거리를 나타내는 경험식을 제시하였다. 또한 월파의 후면선단유속을 이용하여 월파체의트 관입거리와 관입유속을 계산하였으며, 각 인자간의 상관관계를 검토하였다.

본 연구는 방파제 배후면에서 월파거동을 분석하여 배후사면에 미치는 영향을 역학적으로 규명하는 것을 목적으로 하고 있으며, 향후 배후면 안정성에 직접적인 영향을 주는 월파의 운동량 검토를 위해 파형, 층두께, 관입입사각 등을 고려한 연구가 수행될 예정이다. 또한, 월파와 불규칙성을 갖는 파랑조건과의 상관성을 검토하기 위



해 불규칙파를 대상으로 하는 연구가 수반될 것이다. 본 연구에 적용된 실험모형은 실험자료 계측의 편의를 위해 체체 후면에 케이슨을 설치하였다. 그러나 소파블록피복 케이슨 방파제 항내측 사면의 안정성에는 체체상단에서의 투과파도 영향을 미칠 수 있으므로 향후 안정성 검토에서는 이러한 영향을 고려하여 수행할 예정이다.

### 참고문헌

- 오정은, 서경덕, 권혁민 (2006). 호안에서의 월파에 대한 신뢰성 해석. 한국해양-해양공학회지, 18(1), 69-83.
- 류용욱, 이종인, 김영택 (2007). 쇄파에 의한 치오름과 월파 유속. 한국해양-해양공학회지, 19(6), 606-613.
- 이철웅 (2003). 월파에 대한 경사식 해안 구조물의 신뢰성 해석. 한국해양-해양공학회지, 15(4), 214-223.
- Anderson, O.H., Juhl, J. and Sloth, P. (1992). Rear Side Stability of Berm Breakwaters. Proc. 23rd Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1020-1029.
- Chang, K.-A. and Liu, P.L.-F. (1999). Experimental investigation of turbulence generated by breaking waves in water of intermediate depth. Physics of Fluids, 11, 3390-3400.
- Govender, K., Mocke, G.P., and Alport, M.J. (2002). Video-imaged surf zone wave and roller structures and flow fields. J. Geophys. Res., 107, 3072.
- 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.

---

Received December 1, 2008

Accepted February 19, 2009