

최대월파량의 발생에 따른 사석방파제 배후면 피복석의 안정성에 관한 연구

류청로 · 김홍진* · 최종욱 · 김헌태

A study on stability of rear side armor with maximum overtopping

Cheong-Ro Ryu · Hong-Jin Kim* · Jong-Wook Cheoi · Heon-Tae Kim

Key Word : Maximum Overtopping Rate(최대월파량), Failure Modes(파괴모드), Stability(안정성)

ABSTRACT

Wave overtopping is one of the most important hydraulic responses of breakwater because it significantly affects its functional efficiency, the safety of transit and mooring on the rear side, wave transmission in the sheltered area, rear side armor stones and to some extent, the structural safety itself. In this study, hydraulic model tests has been carried out to investigate the influence of berm's size on overtopping rate by maximum overtopping rate and mean overtopping rate.

The hydrodynamic characteristics of berm breakwater by the overtopping rate can be summarized as follows:

1. It is better to use maximum overtopping rate than to use mean overtopping rate for design of coastal structures in the point of view of stability.
2. When construct berm to decrease energy of waves that it was needed to make breaking conditions of wave on the berm.
3. Under the relative length of berm was over 0.13 overtopping rate was significantly decreased.
4. Overtopping rate affected significantly by the relative length of yhe berm than height of the berm.

1. 서 론

연안역제어구조물의 주된 기능은 입사하는 파랑의 제어이다. 파랑제어 구조물에서 발생하는 입사파랑과 구조물의 상호작용은 구조물 자체의 안정성과 제어구조물을 이용하여 보호하고자 하는 지역까지 안정성에 영향을 미치게 된다. 입사파랑과 구조물과의 상호작용에서 월파 현상은 방파제의 가장 중요한 수리학적 현상 중의 하나이다. 왜냐하면 월파는 방파제 주위의 통로의 안정성, 배후면에 계류된 선박 혹은 시설물의 안정성, 제체 안쪽의 항내정온도, 그리

고 구조물 자체의 안정성 등 구조물의 기능성과 안정성에 중요한 영향인자이기 때문이다.

이러한 월파에 대한 기존의 여러 가지 이론적인 접근은 종종 Weir모델에서 단순한 정상흐름으로 제안되었고 더욱 최근에는 에너지적 관점과 비회전성흐름의 해석을 통해 제안되었다. 허나 해석하는 이상적인 입사파랑과 구조물의 조건에서만 얻을 수 있으므로 주로 수리학적인 검증들 통해서 특성이 파악하였다.

해안구조물의 월파량 예측은 실험실의 수리학적 모델과 경험식을 이용하여 얻는다. 널리 사용되는 방법은 SPM(Shore protection Manual 1984)에서 제시된 방법이 현재까지도 기존의 규칙파랑에서의 간단한 Run-up 및 월

파랑을 결정하는 데에 사용된다. 실제 이러한 현상의 복잡함은 방파제의 종류와 입사파랑의 종류에 많은 영향을 받으므로 실제 현장의 관측 혹은 수리실험을 통한 확인이 필요하다. 실험적 연구에서는 주로 2차원 및 3차원 조파수조에서 규칙 파랑 및 불규칙 파랑에 의한 수리학적 모형실험으로 검토가 이루어졌다.

기존의 월파에 대한 연구는 주로 호안이나 사석방파제에 대한 연구가 진행되었다. 따라서 대수심의 혼성제와 직립구조물에서 3차원 평면파랑의 입사에 따른 현상에 대한 연구결과는 적다. 최근에는 일본, 중국, 이태리, 그리고 스페인 등지에서 해안구조물의 안정성을 포함하는 낮은 건설 및 유지비용 그리고 환경충격의 감소의 잇점에 대해서 더욱더 많은 관심과 연구가 진행되고 있다.

이러한 다양한 월파에 대한 연구는 최근 월파의 발생확율에 대한 연구와 함께 발생된 월파의 시계열을 통해 통계학적인 월파 특성에 대한 연구가 진행중 이다.

방파제의 설계에서 평균월파랑은(mean overtopping rate) 방파제의 천단고를 결정하는 중요한 파라미터이다. 허나 일반적인 항만설계기준에서 사용되는 평균월파랑은 실질적으로 고파랑의 입사시의 파랑과 구조물의 상호작용을 표현하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 파랑제어구조물 중 월파가 중요한 설계요소이 되는 저천단방파제에 기초부를 설치하여, 기초부의 형상에 따른 방파제의 월파현상을 연구한다. 이때 더욱 정확한 월파의 효과를 파악하기 위해 월파랑 관측 시계열을 통해 최대월파랑을 이용·고려하며, 이러한 최대 월파랑을 통하여 기존의 평균월파랑에서 고려되지 못한 구조물과 파랑의 상호작용을 검토한다.

2. 구조물과 월파랑

본 연구에서 대상으로 하고있는 구조물의 형식은 저천단 방파제이다. 일반적인 구조물의 설계시 월파랑 산정에서 문제가 되는 것은 적절한 천단고의 결정이다.

본 연구에서 대상으로 하는 저천단 방파제의 형식은 구조물의 자중을 억제하며 파랑제어효과를 증대할 수 있도록 구조물전면에 소단(기초부)을 설치하여 파랑에너지와 월파랑을 제어하는 구조형식이다.

본 연구에서는 위의 소단을 설치한 저천단방파제의 구조형식과 입사파랑과의 상호관계 통한 월파랑의 제어방법을 확인하고자 한다. 이를 위해 역학적인 물리인자들과의 관계를 살펴보면 일반적인 소단 방파제에서 고려하는 물리량들은 다음과 같은 항으로 고려할 수 있다. 전술한 바와 같이 소단방파제와 입사파랑의 상호관계는 다음의 세가지로 생각하였다.

$$F_D = f_w(T, H, k, i, K_r, W_a, a_w, \dots) + f_b(H, T, i, B, W_a, \nabla_a, a_w, \dots) + f_s(T, H, V, D_{50}, f_s, K_r, i, a_w, \dots) + f_o(h_c, H, T, q, V, K_r, i, a_w, Q_{max}, Q_{mean}, \dots) \quad (1)$$

여기서, F_D 는 파괴의 함수, T는 입사파랑의 주기, H는 입사파고, k는 파수, K_r 은 반사계수, 피복석의 중량, 구조물로 입사하는 파향, B는 이안체의 폭, ∇ 는 피복석의 형상계수, i는 사면의 경사, f는 저면 마찰계수 D_{50} 은 기부 저면 모래의 통과중량백분율이 50인 크기, V는 유속이다. 각 항들이 전체 파괴에 미치는 크기는 서로 다르다. f_w 은 주로 입사하는 파랑에 대해 직접적으로 변형하는 요소이고, f_b 은 사면상의 파랑의 쇄파로 인한 2차적인 변형요소이며, f_s 은 반복되는 외력에 의해 장기적으로 변형하는 기부세굴에 영향을 주는 요소이다. 그리고 f_c 는 구조물에서 발생하는 월파에 영향을 주는 요소들이다. 이러한 구조물과의 역학관계를 검토하기위한 요소 중에서 본 연구에서는 천단고를 포함한 제체의 단면형식은 고정하고, 입사파랑의 조건과 소단의 규모를 조정하였다

2.1 실험장치

본 실험은 부경대학교 해양수리실험소 2차원 수조에서 수행되었으며 Fig. 1에서 보는 바와 같이 수조의 제원은 길이 36 m, 폭 1 m, 높이 1 m이며, 한 쪽 면에 전기서보모터를 이용한 피스톤식 조파기 시스템이 설치되어 있으며, 최대수심 0.7 m, 최대파고 0.3 m, 주기 0.3 sec ~ 3.0 sec 의 파랑을 재현할 수 있으며, 일방향 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다. 실험에 사용된 수조는 ABS Servo motor에 의해 가동되

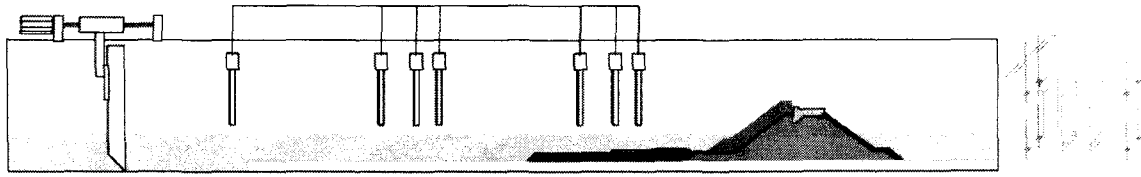


Fig. 1. Experimental setup.

는 피스톤형 조파기로 기존의 조파시스템과는 달리 조파기의 제어기 스스로가 초기 조파판의 위치를 기억하여 조파판의 초기위치 설정시의 오류를 최소화 하였다. 입사파랑의 검증은 Goda의 3점법을 이용하여 불규칙 입사파랑과 반사파랑의 제원을 확인하였다.

2.2 실험방법

본 연구의 전체 순서는 Fig. 2와 같다.

먼저 본 실험에서는 일반적인 연안역 방파제의 설치수심인 20m를 대상으로 실험조건을 구성하였다.

입사파랑조건을 위해서 우선 조파기 및 실험장치들의 보정을 실시하여 보정값을 획득·입력한 후 실험의 정도를 높이기 위해서 유효영역실험을 통하여 실험가능 최적영역을 확인하였다. 실험은 조파수조 내에서 조파방향으로 1m 간격으로 파고계를 이동하여 대상파랑

의 재현성을 검토하였으며, 이를 통해 조파판 전면 16m 지점을 실험좌표로 원점을 결정하였다.

입사하는 파랑의 조건을 재현하기 위해서 구조물을 설치하지 않은 조건에서 수조내에 파고계를 설치하여 이를 구조물로 입사하는 파랑조건으로 결정하였다. 반사파에 의한 파랑장의 교란을 막기 위해서 끝단에 소파제를 충분히 설치하였다.

불규칙파랑의 조파를 위해서 목표스펙트럼을 구성하였으며 본 실험에 사용된 목표스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 이용하여 20개의 주파수를 조합하여 구성하였다. 생성된 조파신호는 D/A 간격을 50 msec으로 신호를 구성하였으며 이는 피스톤형 ABS 스크류 모터를 통하여 조파판을 구동하여 파랑을 조파하게 된다. 검출된 조파신호는 스펙트럼 분석을 통해서 목표스펙트럼과의 비교를 통해 재현파랑의 특성을 확인하였다.

월파랑의 측정은 배후면의 안정성까지 함께 고려하여야 하므로 동일 조건에서 월파랑 측정과 안정성 관측실험이 실행되었다. 월파랑의 관측시에는 월류장치와 월수조를 설치한 후, 월류저수조 내에 용량식 수위계를 설치하여 월파에 의해 월류량을 저수조 내의 수위증가로 측정하였다. 월류수조의 보정은 메스실린더를 이용하여 월류저수조 내에 첨가하면서 수위의 변동을 측정하여 보정값을 획득한 후 이 값을 A/D 변화 시에 환산값으로 적용하여 각 시간에 따른 월파랑 시계열을 측정하여 평균 월파랑과 최대 월파랑을 검출하였다.

월파 및 파랑관측시간의 작용파수는 수조내의

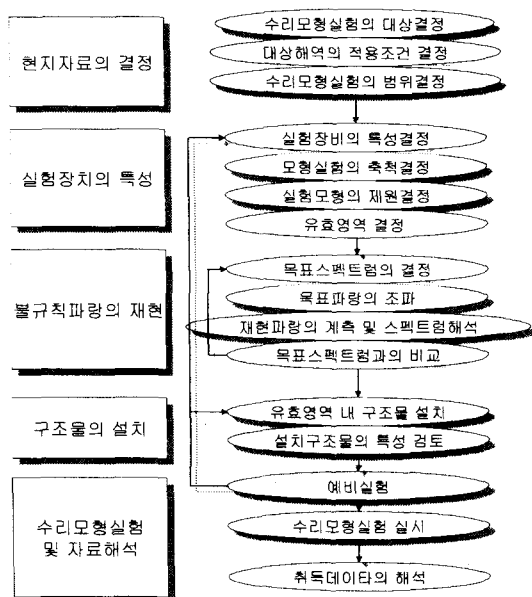


Fig. 2. Flow of Study.

충분한 불규칙 파랑의 발달 및 파수에 따른 파괴의 진행을 검토하기 위해서 유의파 주기를 기준으로 할 때 1000파 이상을 계측하였으며 파랑의 추출간격은 Goda의 3점법 적용시 최적 검출 간격을 고려하여 0.1초로 하였으며 검출데이터의 수는 4096개를 검출하였다. 각 실험은 디지털 화상녹화기(VX-2000, IP5)를 이용하여 월파현상을 녹화하였으며, 이와 함께 디지털카메라(F-707)를 이용하여 각 실험전후의 사진을 촬영하여 구조물의 기하학적인 안정성을 평가하였다.

2.3 실험조건

본 연구에 사용된 구조물의 제원은 현장의 조건을 기준으로 구조물의 기부 수심은 20m이며, 전면 피복석은 T.T.P.를 이용하여 정적 두발걸이 2층 쌓기를 하였다. 전면 피복석의 경사는 1: 1.5이며 내부 사석의 크기는 0.03 m³이며 내부피복석의 경우 0.4 m³의 입경을 가지고 있다. 배후면은 이형블록으로 피복하지 않고 0.4 m³의 사석으로 피복하였다. 구조물 전면의 기초부는 상대 기초부 높이를 세 가지, 길이를 두 가지로 구성하였다. 입사하는 파랑의 조건은 모형으로 하는 대상해역의 설계파랑인 주기 12 sec~14 sec, 파고 4.0 m ~ 5.5 m에 대해 Froude 상사법칙을 적용하여 구성하였다. 실험 조건은 Table 1과 같으며 각 물리량에 대한 무차원수의 관계는 Fig. 3과 같다.

Table 1. Experimental conditions

	Physical parameters	value
Wave conditions (Irregular wave)	H _{1/3} (cm)	6~17
	T _{1/3} (sec)	1.5~2.5
	Spectrum	JONSWAP
	Depth(cm)	45
Structure conditions	Armor Core Slope	tetrapod(500g) riprap(3~10g) 1 : 1.5
	Depth(toe)	45 cm
	Berm(height/length)	5~10 cm /7~14 cm
Bottom conditions	Still Slope	Smooth 1 : 30
	Tested wave number	1000

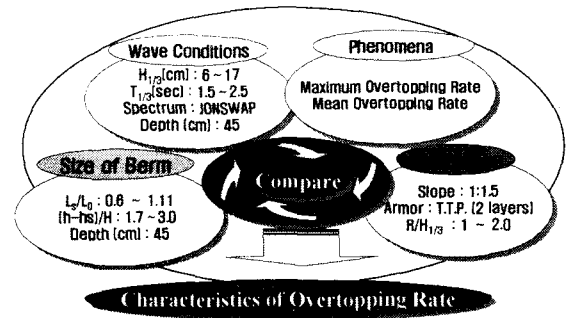


Fig. 3. Schematic diagram of experiment.

2.4 최대월파랑과 평균월파랑

월파랑에 대한 일반적인 정의는 단위시간당의 단위폭을 통과한 월류량으로 정의된 평균월파랑의 개념을 이용한다. 허나 실제 현상에서 월파에 의한 구조물과의 상호작용은 계측시간 동안에 평균된 월파랑 보다는 최대월파랑의 발생시 구조물에 미치는 영향이 크다. 최근 월파현상에 대한 연구동향 또한 최대월파랑에 대한 월파랑의 발생빈도를 검토하는 경향을 가지고 있다. Fig. 4는 대표적인 실험 Case에 대한 누적 월파랑곡선을 통해서 평균 월파랑과 최대 월파랑과의 관계를 보여주고 있다. 본 논문에서는 최대월파랑과 평균월파랑의 정의를 다음과 같이 정의하였다.

$$Q_{\max} = \frac{q_{\max}}{T_{\max}} B \quad (2)$$

$$Q_{\text{mean}} = \frac{q_{\text{accu}}}{t_{\text{meas}}} B$$

여기에서 q_{\max} 는 누적월파랑 곡선을 통한 최대월파랑이며, T_{\max} 는 최대파 주기, q_{accu} 는 계측시간동안 집계된 월파랑, t_{meas} 는 계측시간 그리고 B 는 월파랑 관측 단면의 폭이다.

그림에서 결과를 비교하면 흑색 실선의 경우는 소단이 설치되지 않은 경우이며, 적색 실선의 경우 소단의 규모가 가장 큰 경우이다. 작용된 파랑조건과 제반조건은 동일하다. 흑색실선 및 적색실선에서 최종 누적 월파랑은 적색실선의 경우가 가장 적으나 실질적으로 배후면의 파괴는 가장 크게 나타났다.

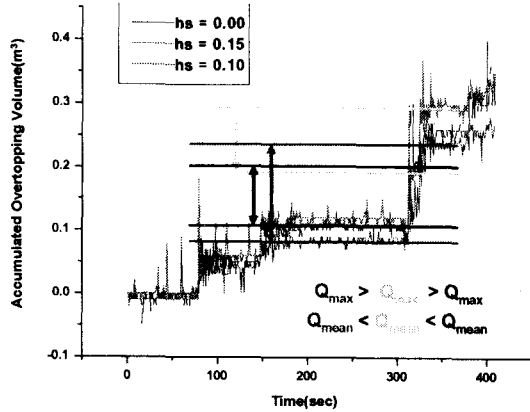


Fig. 4. Variation of accumulated overtopping discharge rate with Time.

일반적으로 평균월파량의 증가는 제내지의 안정성과 비례하는 경향을 보인다. 그러나 이러한 결과는 최종 누적 월파량 즉 평균월파량으로는 확인이 되지 않는 특성이며 최대월파량 경우에는 적색실선의 값이 가장 크게 나타나고 있다. 이는 최대월파량이 구조물과 파랑의 상호작용을 표현하는 좋은 파라메터가 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 본 실험에서 사용된 실험 조건 중 상대천단고에 따른 월파량의 변화를 나타내고 있다. 기존의 2차원 실험을 통한 연구결과와 비교하여 본 그래프는 상대천단고에 따른 평균월파량의 값을 기존의 2차원 단면실험을 통해 진행된 연구자들의 결과를 나타내고 있으며 본 실험은 상대천단고가 1.2에서 1.8까지의 범위에 속한다. 결과에서 보듯이 월파량은 다른 실험결과와 비교하여 유사한 값을 보이거나 다소 높은 경향을 보인다.

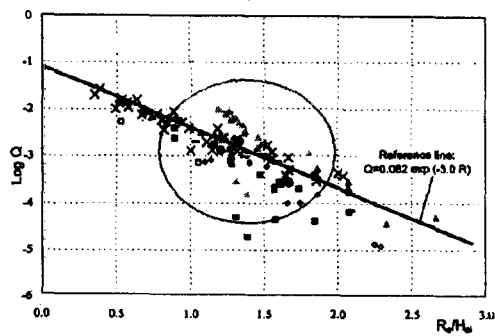


Fig. 5. Range of mean overtopping rate in this experiment.

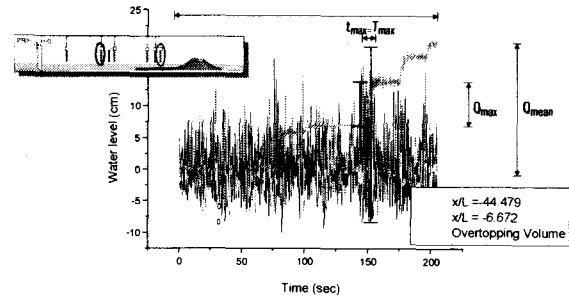


Fig. 6. Variations of accumulated overtopping rate and waterlevel with time.

2.5 최대월파량의 발생

진술하였듯이 평균월파량과 최대월파량의 특징과 정의를 다시 확인하면 단위 시간당 작용한 단위폭당의 저수율을 평균월파량으로 정의할 때 최대월파량은 각 개개 월파량의 최대값을 이야기한다. 월파는 특성상 천단고를 월류할 수 있는 순간적으로 강한 에너지를 동반하므로 구조물의 배후 및 체체 자체의 안정성에 중대한 영향을 준다.

Fig. 6은 입사하는 파랑의 수위시계열과 최대월파량의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 150 sec ~ 180 sec 구간의 월파량의 증가량이 본 케이스의 최대월파량을 나타낸다.

그림에서 월파량의 증가는 수위의 증감 즉 파고의 변화와 직접적인 관계를 가지고 있으며, 고파랑의 입사시에 최대월파량이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 방법으로 각각의 수위시계열에서 최대월파량의 정량적인 값을 확인할 수 있으며, 최대월파량의 정도를 높이기 위하여 월파시의 영상을 디지털 캠코더로 녹화하여 함께 비교·검증하였다. 이러한 고파랑과 최대월파의 발생관계는 구조물의 안정성에 직접적인 영향을 준다.

Fig. 7의 a)와 b)는 월파에 의해 파괴된 배후면의 사진이다. 이와 같은 월파에 의한 배후면의 파괴는 호안의 경우 제내지에 치명적인 인명이나 재산의 손실을 가져오며 구조물의 안정성에도 심각한 결과를 가져온다. 특히 구조물의 안정성에 중요한 문제가 되는 초기파괴가 평균월파량 보다는 최대월파량이 큰 경우에 발생하기가 쉬움을 생각할 때 최대월파량을 통한 구조물의 월파특성 파악은 필수 적일 것이다.

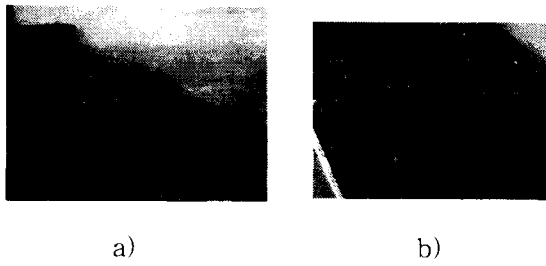


Fig. 7. Scene of armor failed by overtopping at the rear side.

그림에서 배후면의 파괴원인은 소단 상부에서 발생하는 쇄파에 의한 월파량 증가가 원인이며, 이러한 월파량의 증가는 구조물의 상치 콘크리트의 형상을 변형함으로써 조절이 가능하다. 기존의 연구자는 파라펫의 형상을 달리함으로써 10%가치의 월파량 감소를 가지고 온다는 연구 결과도 보고하고 있다.

2.6 입사파랑조건에 따른 월파량의 변화

구조물과 입사하는 파랑과의 관계를 검토하기 위해서 입사파랑에 따른 월파량의 발생 특성을 확인하였다.

Fig. 8에서는 쇄파지수에 따른 평균월파량과 최대월파량의 분포를 보이고 있다. 그림에서 쇄파지수는 4.5에서 5.5사이에 주로 분포한다.

쇄파지수의 증가는 본 실험의 조건을 구조물의 조건을 고정하여 구성하였으므로 입사파랑의 제원의 변화를 나타내며 파고값과는 반비례한다. 허나 일반적인 연구결과에서 월파량은 파고의 증가에 비례하는 것으로 연구되었으나 본 그림에서 반비례의 관계를 보이는 것은 파고의 효과보다는 주기의 효과가 더욱 지배적으로 작용하고 있음을 나타낸다.

쇄파지수란 전술하였듯이 구조물의 기하학적 특성과 입사파랑의 특성을 고려한 무차원수이다.

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H/L_0}} \quad (3)$$

로 정의된다. 여기서 θ 는 구조물의 경사이며, H 는 입사파랑, L_0 는 심해파장이다. 일반적으로 쇄파지수는 쇄파의 형태를 구분하는 기준으로 많이 연구되어 왔으나 구조물과 입사파랑의

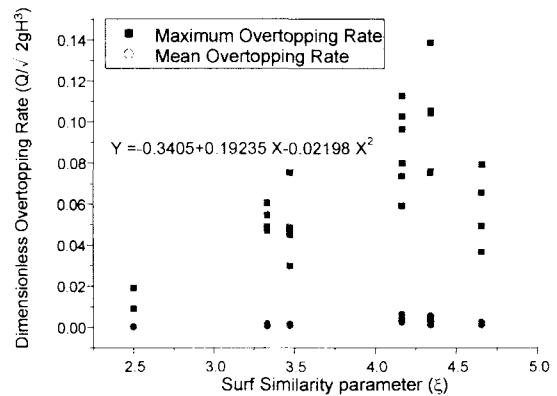


Fig. 8. Distribution Overtopping rate with ξ .

조건을 포함한 대표적인 파랑제어구조물에서의 무차원 파라미터이다.

전술한 쇄파지수에 따른 월파량의 발생특성을 입사하는 파랑의 조건에 대해 더욱 상술하기 위해 파형경사에 대한 월파량의 변화를 확인하였다. Fig. 9은 파형경사에 따른 월파량의 변화를 나타내고 있다. 본 실험에서 사용된 파형경사 조건은 0.01~0.02의 범위로 비교적 장주기 파랑조건이며 파형경사의 증가에 따라 월파량의 발생이 감소하고 있음을 보인다.

일반적으로 파형경사가 크게되면 쇄파가 발생하기 쉽다. 이전 절에서 이야기하였듯이 쇄파와 고파랑은 월파량의 증가를 가지고 온다. 허나 그림과 같이 파형경사의 증가에 따른 월파량의 감소는 파형경사가 파고와 비례하고 주기와는 반비례 함을 생각할 때 주기에 더욱 영향을 받고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 일반적으로 파고가 증가할수록 월파량이 증가한다는 기존의 연구와는 다른 내용이며 이는 파고의 증감 외에 입사하는 파랑의 주기성분이 쇄파의 형상이나 쇄파후의 사면 입사각에 작용하여 파고의 변화 효과를 초과하여 월파량의 변화에 영향을 미치고 있다. 이는 비선형적인 요소들과 특수한 구조물 형식에서 나타나는 현상이며 특히 본 연구의 기초부의 기하학적인 형상을 변화시키는 경우에는 입사하는 파랑의 파고보다 파랑의 주기가 중요한 지표가 됨을 알 수 있다.

최대월파량에서 파형경사가 0.017에서 최대가 발생하는 것은 이에 해당하는 파랑조건일 때에 쇄파 후 흐름에너지의 입사각이 정수면 상부로 작용하여 run-up을 증가시키는 경우이다. 이는

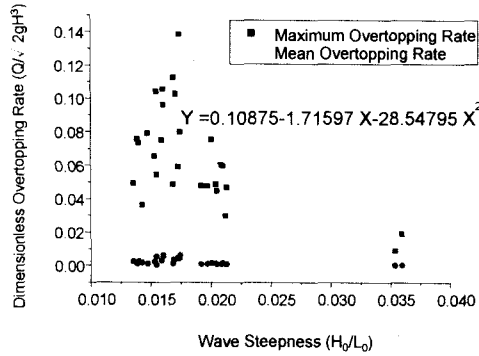


Fig. 9. Distribution of overtopping rate with wave steepness.

쇄파후의 입사각에 대한 입사 파형경사가 중요한 파라미터가 되고 있음을 보이고 있다.

본 연구에서 파형경사의 범위는 일반적인 경우가 0.03에서 0.06임을 생각 할 때 비교적 낮은 값이다. 이는 장주기 효과로 인한 쇄파의 형태에도 영향을 미치게 되며 이러한 영향으로 유의적인 월파의 증가를 보인다.

지금까지의 결과를 통해서 소단의 높이는 소단 상부에서의 쇄파발생에 영향을 미치며 이는 최대월파량의 이상적인 증가를 가져온다. 파형경사의 경우 특히 주기가 큰 경우와 쇄파가 발생한 경우에는 쇄파 후의 흐름이 작용하는 소상대의 위치를 정수면 상부로 작용하게 하여 소상고를 증가시키며 이러한 소상고의 증가는 최대월파량의 증가를 가져온다.

방파제에서 파랑의 에너지를 제어하기 위한 소단의 설치 시 쇄파의 발생은 중요한 비선형적인 문제이며 쇄파이외에도 충분한 비선형요소 검토가 필요하다.

3. 결론

이상으로 저천단 방파제에서 파랑제어를 위한 소단설치 시 소단의 규모에 따른 월파량 발생에 관한 수리학적 특성을 살펴보았다. 또한 월파량의 발생특성 중 최대월파량과 평균월파량을 이용하여 구조물 배후의 안정성과 월파의 관계를 확인하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 구조물의 설계시 월파에 의한 배후면이나 제내지의 안정성을 평가하기 위해서는 실제 구

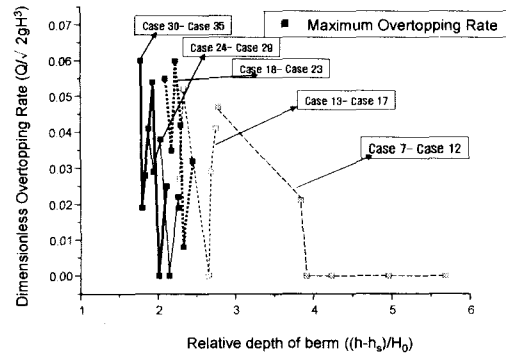


Fig. 10. Distribution of overtopping rate with size of berm.

조물에서 일어나는 현상을 예측하기 위해서는 평균월파량을 이용하는 것 보다 최대월파량을 이용하는 것이 더욱 적합하다.

2. 파랑제어를 위한 기초부(소단)의 설치는 소단상부수심이 입사파고보다 3배 이상이 되어야 양호하게 월파량을 제어할 수 있다.
3. 소단의 길이(L_s)가 파장의 0.13배 이상이 될 때 유의적인 월파량의 감소가 나타났다.
4. 유효한 월파량 제어를 위한 기초부(소단)의 규모는 길이에 더욱 직접적이며 높이의 경우 쇄파의 발생을 충분히 고려하여야 한다.

참고문헌

- 1) Arnskov, M.M., Fredso, J. and Sumer, B.M., "Bed Shear Stress Measurements over a Smooth Bed in Three-dimensional Wave-current Motion", Coastal Engineering Vol. 20, 277-316, 1993.
- 2) Deigaard, R., J. Fredsoe, "Shear Stress Distribution in Dissipative Water Waves", Coastal Engineering Vol. 13, 357-378, 1989.
- 3) Pedersen, C., Deigaard, R. and Fredsoe, J., and Hansen, E.A., "Numerical Simulation of Sand in Plunging Breakers", Coastal Engineering, No. 180, 2344-2357, 1992.
- 4) Van der Meer, Jentsje W. , "Rock slopes and Gravel Beaches under wave attack", Delft Hydraulics Communication, 1988.
- 5) Van der Meer, J.W. and Vedman, Johannes J., "Singular points at berm breakwater: scale effects, rear, round head longshore transport" ASCE, Coastal Engineering, Vol.17, 153-171, 1992.
- 6) 横木 亨 著, "漂砂와 海岸侵蝕", 清文閣, 1996.