

# 사석방파제 toe부에서의 세굴특성에 관한 연구

윤한삼\* · 남인식\*\* · 류청로\*\*\*

\*(주)한국연안개발기술, \*\*한국컨테이너부두공단, \*\*\*부경대학교 해양공학과

## Scouring Characteristics at the Toe of the Rubble Mound Breakwater

HAN-SAM YOON\*, IN-SIK NAM\*\* AND CHEONG-RO RYU\*\*\*

\*Korea Coastal Development Technology Co. Ltd., Seoul, Korea

\*\*Korea Container Terminal Authority, Busan, Korea

\*\*\*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY-WORD:** Scouring 세굴, Deposition 퇴적, Rubble Mound Breakwater 사석방파제

**ABSTRACT:** This study is aimed to find the scouring mechanism at the toe of rubble mound structures. To investigate the characteristics of scouring in front of the structure, experiments were performed with regular waves in a 2-D flume. The results of this study are as follows. 1) It can be said the characteristics of incident wave causes rolling and sliding of armour block. The difference of wave pressure on the slope, internal flow as well as settlement of armour block due to the weight cause scouring. 2) It is observed that scouring depth at the toe increased when wave height or period increased. The location of ultimate scouring and deposition depth moved seaward when wave period increased. 3) The failure of rubble mound structure was caused by waves or scouring. Failure by erosion increased with high waves and long waves. 4) Using surf-similarity parameter including characteristics of incident waves and structure, scouring and deposition pattern were found and their limit was formulated.

### 1. 서 론

해양파랑에 의해 사석방파제의 toe부(경사제 구조물 끝단과 해저면 바닥이 접하는 부분)에서 발생하는 기초지반의 유실인 세굴은 방파제의 파괴모드 중의 하나로, 최근 이러한 세굴로 인한 해안구조물의 파괴에 관심이 집중되고 있다(Sumer and Fredsøe, 2000; 손병규, 2001).

사석방파제의 세굴·퇴적 발생메카니즘은 Fig. 1과 같다. 먼저 입사파랑에 의해 피복블럭의 rolling 및 sliding에 따른 toe 부의 수심변화, 사면상에 작용하는 파압작용점 위치변동, 파랑의 down-rush시 외해로 빠져나가는 흐름과 투수성 구조물내

부로부터 유출되는 침출수 등에 의해 사석방파제 toe부에서 세굴 및 퇴적은 복합적으로 발생하게 될 것이다. 또한 외력인자인 파랑작용과는 무관하게 피복블럭의 자중에 의한 침하가 세굴을 야기시키는 원인으로 파악될 수 있다. 특히 사면상의 파랑작용시 외해로 향하려는 사면상의 흐름에 의해 저질 입자를 외부로 수송하는 메카니즘이 세굴을 급진적으로 발생시킨다고 판단된다.

아울러 세굴의 발생은 입사파나 구조물 주변의 유동장 특성 외에도 구조물의 재질, 경사, 저질의 특성, 구조물의 설치수심, 해저면의 경사 등 구조물의 특성에 따라서 더욱 복잡한 양상을 나타내기도 한다. 또한 세굴의 발생으로 인해 2차적으로 방파제 파괴를 초래하는 경우가 있는데 이에 대한 분류는 얕은 세굴심(shallow scour hole)과 깊은 세굴심(deep scour hole)의 두 가지 패턴으로 나누어 살펴볼 수 있다. 일반적으로 전자가 발생할 경우 구조물 기초지반의 피복층에 대한 지지력 상실을 야기시킴으로 인해 피복블럭이 사면표층 위를 굴러 떨어지게 되며, 후자가 발생하면 구조물 전체 사면에 대한 불안정을 야기시켜 전체 또는 일부분의 구조물이 sliding되거나 전복되는 현상을 초래하게 된다.

이상과 같이 사석방파제 toe부의 세굴·퇴적은 상술한 여러 복잡한 현상들의 상호작용에 기인한 것으로, 이러한 현상의 메카니즘을 파악하려는 연구는 Herbich and Ko(1968) 등이 있으며, 최근에는 Sumer and Fredsøe(2000)에 의해 사석방파제 및 직립방파제에서의 세굴·퇴적에 대한 발생 메카니즘 이해와 세굴방지공에 대한 수리실험연구가 수행되어진 바 있다.

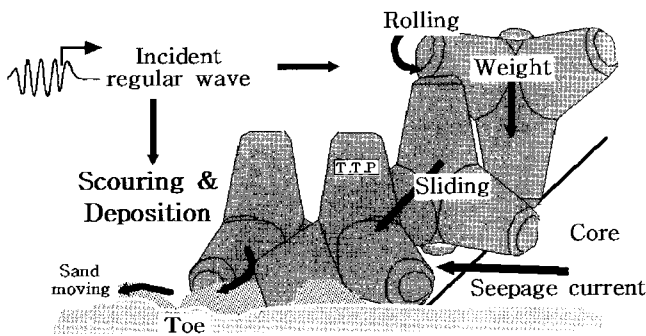


Fig. 1 Scouring mechanism of rubble mound structure

제1저자 윤한삼 연락처: 서울특별시 마포구 마포동 350

02-3272-6687 yoonhs13@dreamwiz.com

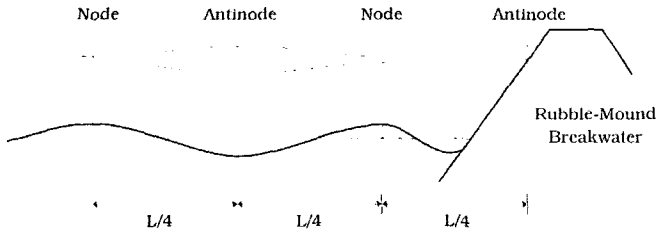


Fig. 2 Schematic illustration of the scour/deposition pattern in the case of the rubble-mound breakwater(Sumer and FredsØe, 2000)

Fig. 2는 사석방파제에서의 세굴 및 퇴적패턴을 개념화한 것으로 입사파의 파장에 따라 Antinode와 Node가 발생하는 지점에서의 저면 세굴패턴이 다르게 분포한다는 것을 나타내고 있다. 특히 toe지점은 입사파랑(주기) 뿐만 아니라 구조물의 경사각에 따라서 또는 저질의 특성에 따라서 세굴·퇴적패턴이 달라질 수 있다.

하지만 toe부 세굴에 의한 사석방파제의 파괴모드를 입사파랑의 파라미터와 구조물의 구조적 특성, 저질 입경의 함수로 정량화시킨 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 현장 파랑 및 저질조건에 부합되어 세굴·퇴적 영역을 구분할 수 있다면 구조물 설계시 toe부 세굴·퇴적에 따른 구조물의 파괴여부를 사전 예측함과 아울러 구조물 안정대책수립에 크게 기여할 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 2차원 규칙파 실험을 통해 사석방파제 toe부에서의 세굴퇴적 발생메카니즘을 파악하고, 입사파랑의 파라미터로서 방파제 toe부에서의 세굴에 의한 발생세굴랑을 정식화하는데 목적이 있다.

## 2. 차원해석

사석방파제의 세굴에 영향을 주는 요소를 살펴보면, 유체의 성질, 구조물 형상, 재료의 특성, 입사파랑 및 흐름의 특성 등으로 구분할 수 있으나, 이들 조건을 모두 고려하여 정량화함에 있어서는 어려운 점이 많다. 따라서 사석방파제 toe부에서의 세굴에 영향을 미치는 인자들을 구분하고, 차원해석을 통하여 다음과 같은 무차원 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d_{50}}{H} = f\left(\xi, \frac{h_s}{H}, \frac{h_t}{H}, \frac{gT^2}{H}, \frac{\nu T}{H^2}, \frac{TV_{max}}{H}, \theta, \dots\right) \quad (1)$$

여기서,  $d_{50}$  모래의 중앙입경,  $\xi$  surf-similarity parameter,  $h_s$  toe에서의 세굴심,  $h_t$  toe에서의 수심,  $H$  입사파고,  $T$  입사파 주기,  $V_{max}$  사면상의 최대유체입자 속도,  $\theta$  사면 경사각,  $\nu$  동점성 계수,  $g$  중력가속도이다. 식(1)의 무차원 변수 중에서 일부는 실험방법과 조건에 따라 무시되거나 기존의 연구결과에 따라 그 영향이 아주 작을 때는 무시할 수 있다.

2차원 수리모형실험에서 파랑이 고정경사면을 가진 구조물에 일정하게 입사하고, 세굴과정에서 유체점성의 영향이 비교적 작다고 가정할 때, 식(1)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\frac{d_{50}}{H} = f\left(\xi, \frac{h_s}{H}, \frac{h_t}{H}, \frac{TV_{max}}{H}\right) \quad (2)$$

## 3. 실험방법

수리모형실험은 길이 35m, 폭 1m, 높이 1m인 2차원 조파수조내에서 수행하였으며, core부와 피복층으로 구성된 사석방파제 모형의 사면경사는 1:1.5이고, core부를 이루는 재료인 사석은 Froude 상사법칙을 적용하여 축척효과를 고려하였다. 실험조건은 Table 1과 같이 나타내었다.

실험 대상파랑은 규칙파를 사용하였고, 파고 1.1~7.1 cm, 주기 0.7~1.9 sec인 파랑을 대상으로 실험을 수행하였다. 파고는 용량식 파고계 4개를 Fig. 3과 Photo 1과 같이 구조물 전방에 설치하여 입사파랑을 측정하였고, 사면의 toe부에 도플러 유속계를 설치하여 toe부 수심 5.1 cm에서의 수평수립자 속도를 측정하였다.

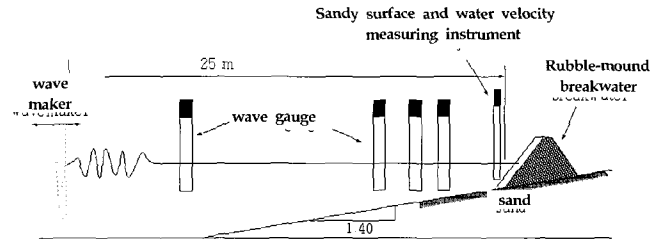


Fig. 3 Experimental set-up

Table 1 Experimental conditions

Parameters		Conditions
S t r u c t u r e	$W_t$	20 g (Tetrapod)
	$W_a$	2 ~ 5 g (Quarry stone)
	Sand( $d_{50}$ , mm)	0.17
	Slope ( $\theta$ )	1:1.5 (Permeable)
	$h_t$ (cm)	10.0, 20.0
	$h_c$ (cm)	Non-overtopping
W a v e	$i$	1:40
	$T$ (sec)	0.7 ~ 1.9
	$H$ (cm)	1.1 ~ 7.1

$W_t$  Weight of TIP;  $W_a$  Weight of core material;  $i$  Slope of sea bottom;  $T$  Incident wave period;  $H$  Incident wave height;  $h_t$  Water depth at toe;  $h_c$  Crest height

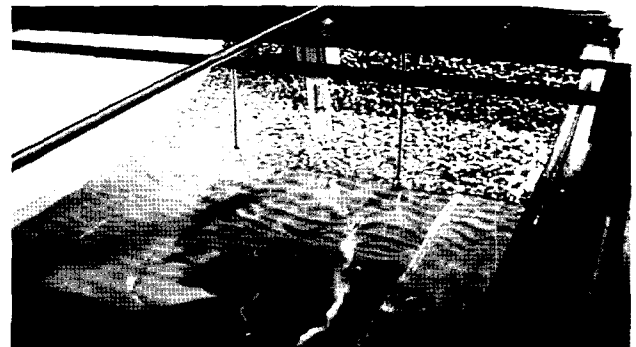


Photo. 1 Experimental set-up

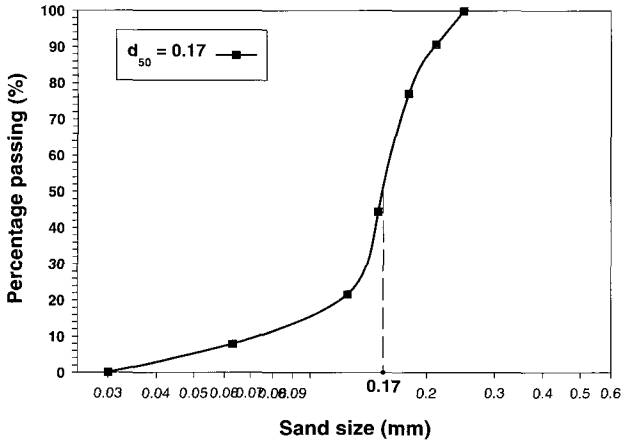


Fig. 4 Sand size distribution curve

또한 세굴실험을 위해 구조물 전면에서  $d_{50} = 0.17$  mm인 모래를 사용해 길이 70 cm, 폭 60 cm, 두께 20 cm의 직사각형 모양으로 바닥을 구성하였다. 실험에 사용된 모래의 입경가적곡선은 Fig. 4와 같다. 세굴깊이의 측정은 사면계(Sandy surface measuring instrument)를 설치하여 toe로부터 사면전방으로 2 cm간격으로 구조물 앞 저면의 세굴패턴을 측정하였으며, 사면계의 측정오차범위는  $\pm 0.5$  mm이다. 실험시간은 세굴심이 더 이상 진행되지 않는 상태 즉, 평형세굴심에 도달할 때까지의 실험시간으로 하였으며, 실험파수는 주기에 따라서 1000~2600 파 범위이다.

### 4. 세굴실험결과

#### 4.1 입사파랑과의 상호관계

Fig. 5와 Photo 2는 입사하는 파랑의 특성에 따른 사면전면에서의 세굴패턴을 보여주고 있다. Fig. 5에서 가로축  $x$ 는 사면으로부터 조파기 방향으로의 거리를 나타내며, 세로축  $h_s$ 는 세굴깊이를 나타내고 있다. 동일한 파고일지라도 주기가 길수록 최대세굴·퇴적지점이 toe로부터 멀어지며, 주기가 클수록 세굴·퇴적심도 커지는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 주기에 대해서 파고의 증가에 따라 방파제 전방에서의 세굴패턴을 나타낸 것이 Photo 2이다. 주기는 1.31 sec로 동일하며 파고가 각각 (a) 2.81 cm, (b) 4.32 cm인 경우인데, 사진에서 볼 수 있듯이 동일한 주기에서 파고의 증가에 따라서 세굴량의 변화가 나타남을 정성적으로 알 수 있다.

Photo 3 (a), (b), (c)에서 Sumer and FredsØe(2000)의 연구와 동일하게 세굴·퇴적의 패턴이 방파제와 평행하게 주기적으로 발생하고, 파고가 일정한 경우에 대해서 주기가 커짐에 따라 toe부에서의 세굴깊이가 깊어지는 것을 알 수 있다. 또한 구조물 toe부로부터 최대세굴심 또는 최대퇴적심까지의 거리는 주기가 길어짐에 따라서 사면으로부터 멀어지는 경향을 나타내고 있으며, 이는 세굴과 퇴적의 과정이 부분중복파 형성에 의한 것이라는 Carter *et al.* (1973)의 연구결과와 동일하다.

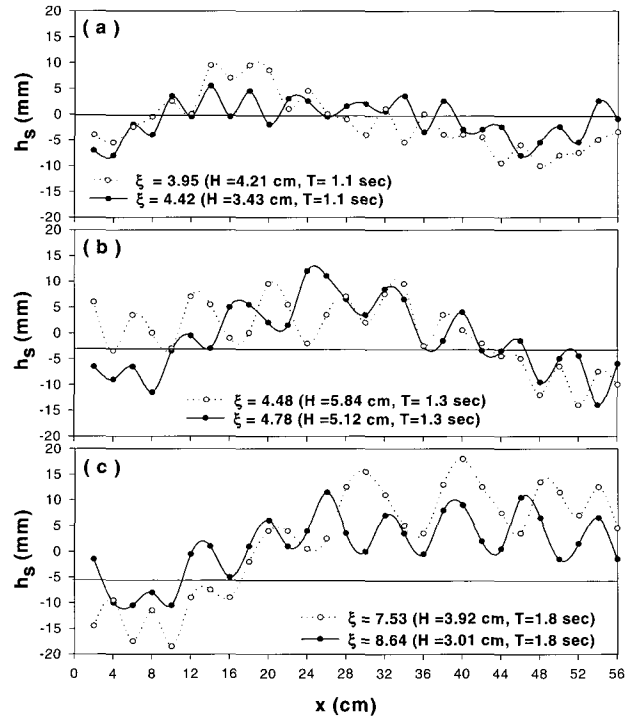


Fig. 5 Scouring pattern in related to incident wave characteristics

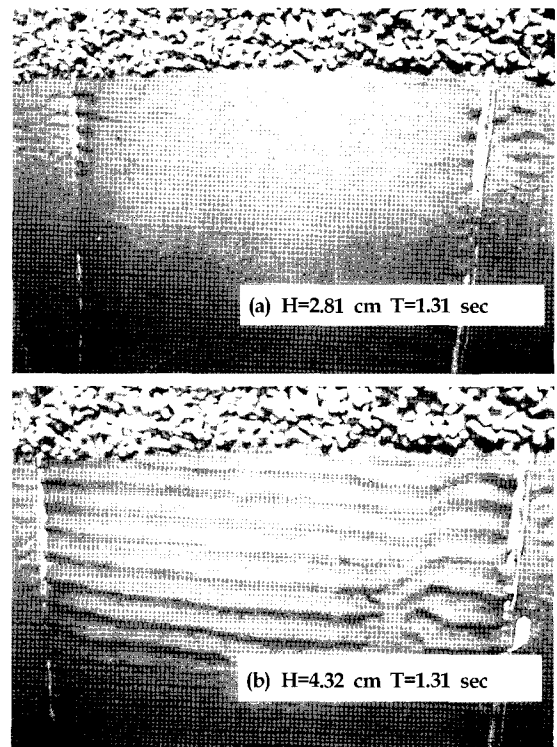


Photo 2 Scouring pattern in related to wave height

전술한 결과로부터 사석방파제 toe에서의 세굴량은 파고와 주기가 증가할수록 증가하며, 주기가 길어짐에 따라서 구조물 사면전방으로의 최대세굴심 또는 최대퇴적심이 이동한다는 것을

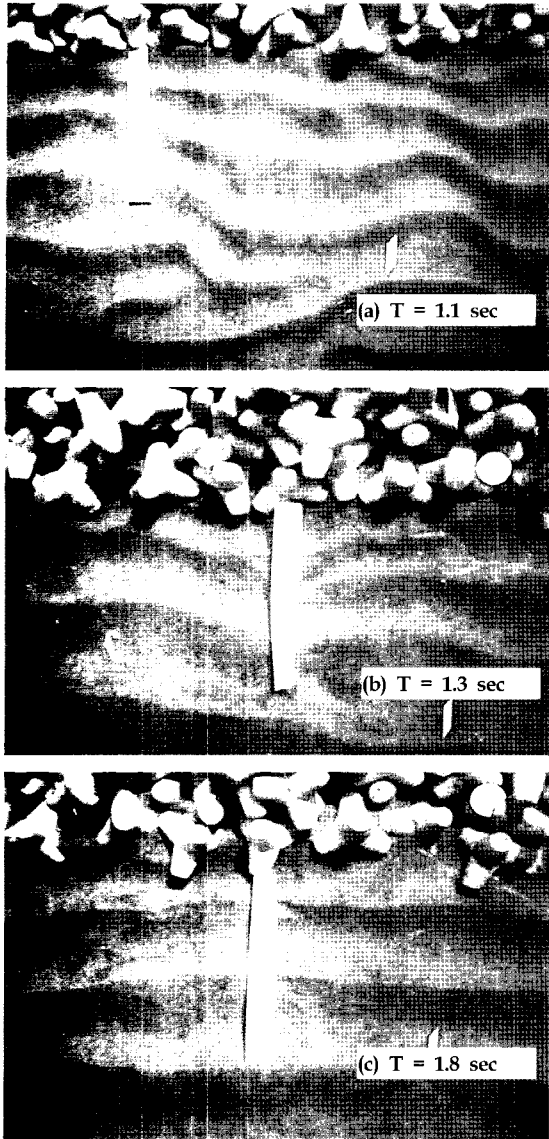


Photo 3 Scouring pattern in related to wave periods

알 수 있다. 이는 구조물 전방 파랑의 증폭영역에서 나타나는 현상으로 Node부에서 발산하고, Antinode부에서 수렴하는 질량수송 메카니즘을 나타내고 있다.

4.2 반사율과 수립자 속도

Watanabe *et al.* (1984)은 세굴의 경향은 구조물의 설치수심, 입사파의 특성 그리고 저질의 특성이 일정할 경우에는 반사율이 적을수록 세굴량이 적으며, 구조물 전방에서의 반사율은 최대세굴깊이와 선형적인 관계를 가진다는 것을 실험데이터를 바탕으로 보고한 바 있다.

그러나 본 연구에서는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 본 연구의 실험조건  $0.076 < H/h_t < 0.571$  에서는 세굴의 경향을 반사율 ( $K_r$ )로는 명확히 구분할 수 없는 것으로 생각된다. 이는 구조물 전방에서의 최대세굴심을 대상으로 한 Watanabe *et al.* (1984)의 제안과는 달리 본 연구는 구조물 toe부의 세굴데이터

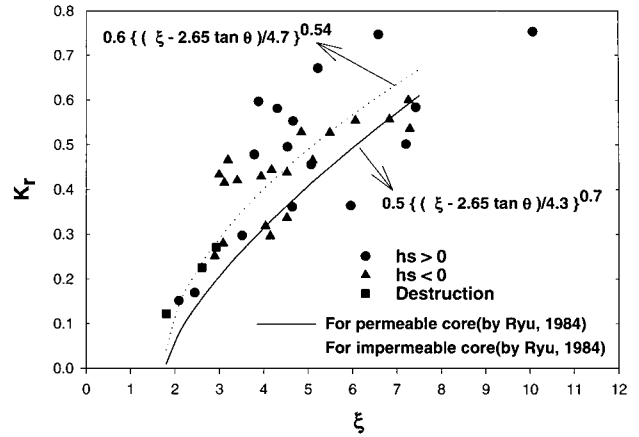


Fig. 6 Reflection coefficient vs. surf-similarity parameter

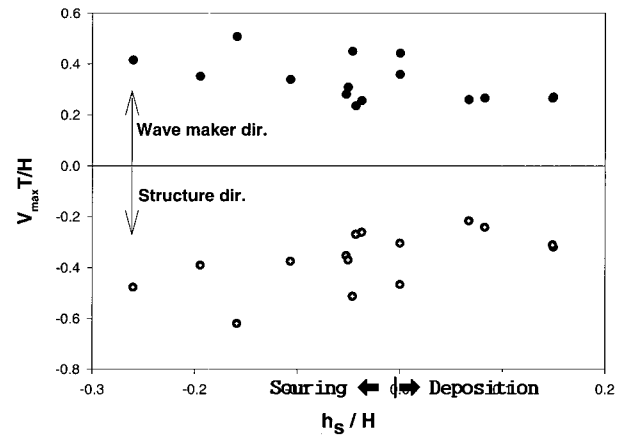


Fig. 7 Maximum water particle velocity vs. scour depth at toe

만을 대상으로 한 것으로 세굴과 퇴적의 현상이 중복되는 사면 toe에서의 메카니즘을 명확히 이해하기 위해서는 이에 대한 연구가 차후 이루어져야 할 것이다. Fig. 6에서  $\blacktriangle$ 는 세굴 ( $h_s < 0$ ),  $\bullet$ 는 퇴적( $h_s > 0$ ) 그리고  $\blacksquare$ 는 구조물 사면의 파괴로 인한 세굴·퇴적의 구분이 불가능한 상태를 나타낸다.

또한 사면 toe상에 설치되어진 유속계로부터 얻어진 최대 수립자속도와 사면 toe에서의 세굴변화양상을 Fig. 7에 나타내었다. 사면 toe에서 조파기 방향이 양(+)이고 구조물 내부로 들어가는 방향이 음(-)의 방향이다. 여기서 사면상의 수립자 속도는 세굴에 영향을 주며 최대수립자 속도가 증가할수록 세굴심도 증가함을 알 수 있다.

5. 세굴패턴의 정식화

Ryu (1999)는 입사하는 불규칙 파랑의 surf-similarity parameter와 toe부의 수심으로 무차원화한 상대유의파고를 사용하여 일반적인 사석방파제의 파괴모드를 Fig. 8와 같이 나타내었다.

또한 기존 연구결과를 통해 세굴(침식)에 의한 파괴는 상대적으로 고파랑과 장파의 조건하에서 일어난다고 제안하고 그

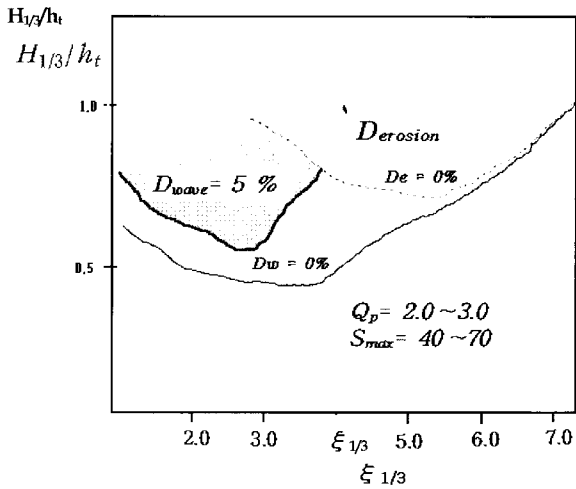


Fig. 8 The damage criteria in related to the damage modes

림에서와 같이 피복석의 직접적인 파랑의 침입에 의한 파괴는  $\xi_{1/3} [= \tan \theta / (H_{1/3} / L_{01/3})^{1/2}]$ 와 toe에서의 상대유속과  $(H_{1/3} / h_t)$ 로써 제어할 수 있음을 주장하였다.

따라서 본 연구결과를 통해 toe부에서의 세굴과 퇴적의 영역을 Fig. 9와 같이 정식화 하였다. 구조물 toe에서의 세굴·퇴적 패턴은 크게 세굴영역(scouring zone), 퇴적영역(deposition zone), 그리고 퇴적도 세굴도 나타나지 않거나 퇴적이나 세굴로 변화·이행되어져 가는 과도기의 상태인 이행영역(transition zone)으로 나눌 수 있으며, 이러한 영역은 본 연구의 실험조건

인 상대수심  $0.076 < H/h_t < 0.571$ 에서 다음의 식 (3a)~(5b)와 같이 상대모래입경(relative sand size)과 surf-similarity parameter를 사용하여 정식화할 수 있다.

실험결과에서  $\xi$ 가 크고  $d_{50}/H$ 가 작은 경우에는 세굴패턴이 커지며,  $\xi$ 가 작고  $d_{50}/H$ 가 큰 경우에는 퇴적패턴이 강하게 나타난다. 또한  $\xi=4.6$ 을 기준으로 세굴·퇴적·이행영역이 3영역으로 구분되어짐을 알 수 있다. 그림에서 세굴·퇴적영역의 음영은 입사파랑으로 무차원한 세굴심을 나타내며 음영이 진해질수록 세굴·퇴적이 크게 발생함을 나타낸다.

**세굴영역**

$$d_{50}/H < 0.013 \log \xi - 0.002 \quad \text{for } \xi > 4.6 \quad (3a)$$

$$d_{50}/H < 0.011 \log \xi - 0.001 \quad \text{for } \xi \leq 4.6 \quad (3b)$$

**퇴적영역**

$$d_{50}/H > 0.011 \log \xi - 0.001 \quad (4a)$$

$$d_{50}/H < -0.042 \log \xi + 0.034 \quad \text{for } \xi < 4.6 \quad (4b)$$

**이행영역**

$$d_{50}/H > 0.013 \log \xi - 0.002 \quad \text{for } \xi > 4.6 \quad (5a)$$

$$d_{50}/H > -0.042 \log \xi + 0.034 \quad \text{for } \xi \leq 4.6 \quad (5b)$$

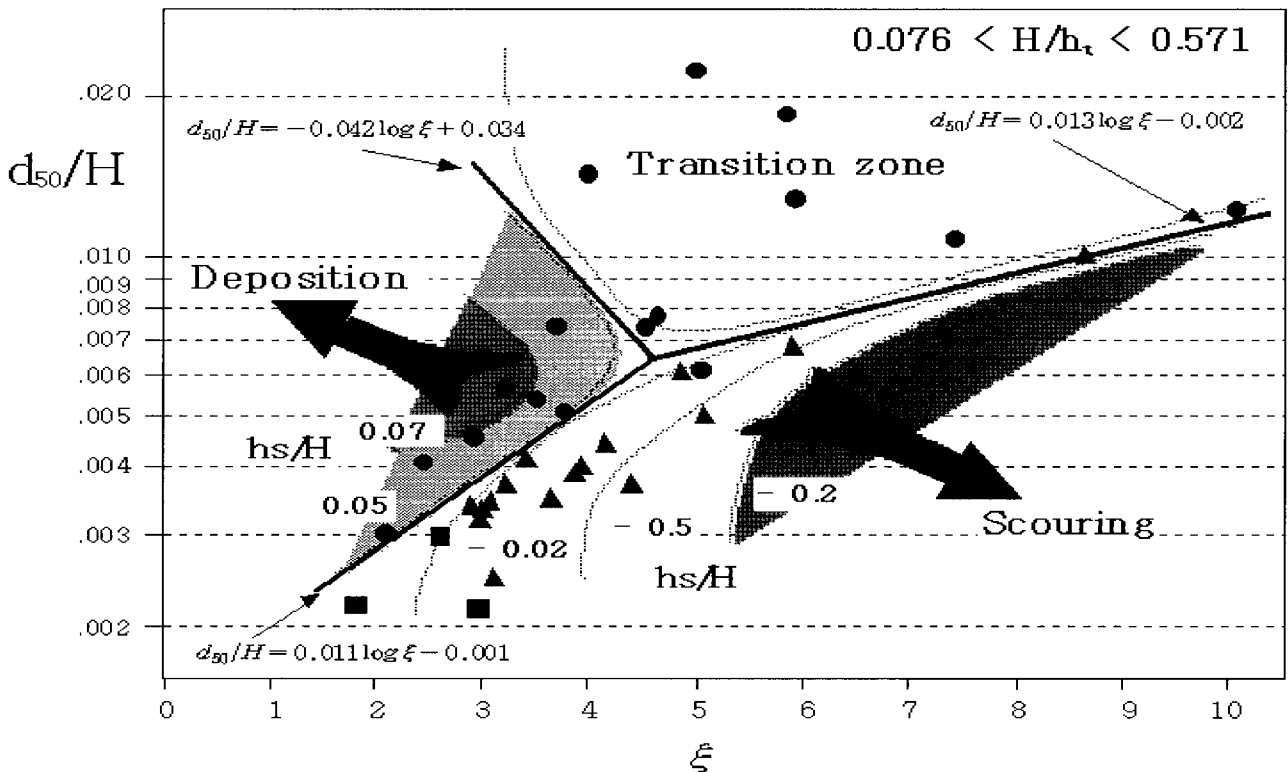


Fig. 9 Criteria of scouring and deposition at toe of rubble mound structure

## 6. 결 론

본 연구는 사석방파제 toe부에서의 세굴·퇴적 발생메카니즘을 입사파랑의 파라미터를 사용하여 나타낼 수 있는 물리적 현상으로 파악하고, 사석방파제 저면 toe부에서의 세굴에 대한 일반적인 특성을 규명하기 위해 2차원 규칙파 수리모형실험을 수행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 입사하는 파랑의 특성에 따라서 피복블럭의 rolling과 사면상의 sliding이 발생하고, 아울러 사면상의 파압의 차이와 내부흐름, 또한 피복블럭의 자중에 의한 침하가 세굴을 야기시키는 발생기구로 파악될 수 있다.
- 2) 수리실험을 통해 파고와 주기가 증가할수록 toe부에서의 세굴량은 증가하며 주기가 증가함에 따라 구조물 전방에서 최대세굴심 또는 최대퇴적심이 외해영역으로 이동한다는 것을 알 수 있는데 이는 사석방파제 전방에서의 부분중복파 생성과 파랑에 의한 질량수송에 따른 것이다.
- 3) 사석방파제의 파괴모드는 파랑에 의한 파괴와 침식에 의한 파괴모드로 구분지어서 이해할 수 있으며 침식에 의한 파괴는 상대적으로 고파랑과 장파의 조건하에서 일어난다.
- 4) 사석방파제 toe에서의 세굴과 퇴적의 일반적인 패턴을 입사파의 특성과 구조물의 형태를 포함하는 surf-similarity parameter를 이용해 구분짓고 그 메커니즘이 발생할 수 있는 영역을 정식화하였다.  $\xi$ 가 크고  $d_{50}/H$ 가 작은 경우에는 세굴패턴이,  $\xi$ 가 작고  $d_{50}/H$ 가 큰 경우에는 퇴적패턴이 강하게 나타나며,  $\xi=4.6$ 을 기준으로 세굴·퇴적·이행 영역이 3영역으로 구분되어진다.

## 참 고 문 헌

- 손병규 (2001), "다방향불규칙파에 의한 사석방파제의 안정성에 관한 기초적 연구", 부경대학교 박사학위논문.
- Carter, T.G., Liu, P.L-F. and Mei, C.C. (1973). "Mass transport by waves and offshore bed forms", Proc. A.S.C.E. J. Waterw. Harbors Coastal Div. 99(WW2), pp 165-184.
- Herbich, J.B. and Ko, S.C. (1968). "Scour of sand beaches in front of seawalls", Proc. Coastal Engineering, ASCE, Chapter 40.
- Ryu, C.R. (1984). "A study on the hydraulic optimal design of the rubble mound breakwaters", Thesis of Doctor of Eng., Osaka Univ.
- Ryu, C.R. (1999). "Destruction mechanism of rubble mound structures under the directional irregular waves: review and new works", International Symposium on Progress in Coastal Eng. and Oceanography, pp 251-264.
- Sumer, B.M. and Fredsøe J. (2000). "Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater", Coastal Engineering, Vol 40, pp 59-87.
- Watanabe, R.K., Herbich, J.B., Schiller, Jr., R.E. and Dunlap, W.A. (1984). Seafloor scour-design guidelines for ocean-founded structures, Marcel Dekker, Inc.

2001년 12월 10일 원고 접수

2002년 7월 30일 최종 수정본 채택