

방향성 파랑의 입사에 따른 이안제 제두부의 안정성에 관한 기초적 연구

김홍진* · 류청로**

A study of stability at the head of a breakwater with directional waves

Hong-Jin Kim* · Cheong-Ro Ryu**

Key Word : Stability(안정성), Scour(세굴), Directional Wave(방향성파),
Detached Breakwater(방파제)

ABSTRACT

The failure at the head section of rubble-mound detached breakwaters is more important than other failure modes, because this initial failures will occur the failure of the trunk section and lead to the instability of the structure.

The three-dimensional failure modes are discussed using the experimental data with multi-directional waves considering the failure modes occurring around the head of the rubble-mound detached breakwater. The spacial characteristics of failure mode around the rubble-mound structures can be summarized as follows:

- 1) It was clarified that the failure modes at the round head of a detached breakwater are classified as failure by plunging breaker on the slope, failure by direct incident wave force and failure by scouring at the toe of the detached breakwater.
- 2) The failure mode was found in the lower wave height than the design wave by the breaker depth effects. It is clarified that the structure monitored was safely designed for the design wave but the failure was occurred by the reason of breaker waves and scouring processes at the toe
- 3) It was observed that scouring at the toe developed in the region where steady stream due to vorticity was generated and the spatial variation of scour at the toe of the round head was predominated by incident wave direction.

1. 서 론

연안에 대한 관심의 증대는 보다 안정적인 연안공간을 필요로 하게 되었고 이에따라 연안역의 여러 외력들을 제어하기 위한 많은 연안역 제어구조물이 개발되었다. 대표적인 연안역 제어구조물의 하나인 이안제는 크게 파랑제어효과와 연안 흐름제어효과를 동시에 가지게 된다. 허나 구조물의 기능성이 확보되기 위해서는 구조물 자체의 안정성이 우선되어야 하며 이러한 안정성은 입사하는 파랑에 의해 지배적인 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 방향성파랑의 입사에 따른 이안제 피복석의 파괴모드를 제두부

와 제체부를 함께 고려하고자 한다.

사석방파제 제두부에 대한 설계는 일반적으로 제체부의 1.5배의 사석중량을 이용하여 설계·시공한다. 그럼에도 불구하고 실제 현장에서의 파괴 사례를 살펴보면 이안제의 제두부 혹은 호안의 우각부에서 초기파괴가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 제두부에 대한 연구는 제두부 주위의 세굴 특성에 관한 연구(Sumer, 1997)가 진행되었고, 곡선호안 및 제두부의 안정성에 관한 연구도 진행되었다(Ryu & Sohn, 1999).

기존의 연구를 통한 이안제 제두부의 파괴기구는 Fig. 1과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 입사하는 파랑의 입·반사파에 의한 제두부 전면

에서의 파괴.(Van der Meer, 1992)

2) 제두부의 사면상을 따라 발달하는 권좌쇄파와 흐름에 의한 파괴.(Sumer, 1997)

3) 이안제의 기부에서의 세굴 및 퇴적에 의한 파괴.(Ryu & Sohn, 1999)

의 크게 세가지 메카니즘을 가지고 있다. 파랑의 입·반사에 의한 제두부 전면부의 파괴는 경사제의 단면실험의 결과와 유사한 결과를 보인다. 그리고, 사면상의 쇄파에 의한 파괴는 강한 유속과 함께 피복석의 파괴 및 이동에 영향을 미친다. 사면상을 진행하는 파랑이 수심의 변화와 굴절 및 회절에 의해 에너지가 집중되어 권좌쇄파가 만들어지고 이러한 쇄파는 강한 흐름을 만든다. 기부의 세굴은 파랑이 구조물에 부딪혀 회절, 굴절 및 반사되어 기부에 연행한 와류와 정상류의 발달, 그리고, 사면상에서 쇄파이후에 진행된 흐름이 중앙 후위의 유속을 증가시키고, 세굴에 의한 기부의 파괴를 발달시키게 된다.

본 연구에서는 이전의 무월파 고천단 조건에서의 파괴모드를 확장하여 천단고의 감소에 따른 제두부 피복석의 파괴모드와 제두부 주변의 물리현상의 변화를 살펴보고자 한다.

2. 이안제 제두부의 안정성 실험

2.1 이안제 제두부의 파괴와 파괴율

전술한 바와 같이 이안제의 파괴기구는 다음의 네 가지로 생각할 수 있다.

$$F_D = f_w(T, H, k, i, K_r, W_a, \alpha_w \dots) + f_b(H, T, i, B, W_a, \nabla_a, \alpha_w \dots) + f_s(T, H, V, D_{50}, f_s, K_r, i, \alpha_w \dots) \dots \quad (1)$$

여기서, F_D 는 파괴의 함수, T 는 입사파랑의 주기, H 는 입사파고, k 는 파수, K_r 은 반사계수, 피복석의 중량, 제두부로 입사하는 파향, B 는 이안제의 폭, ∇ 는 피복석의 형상계수, i 는 사면의 경사, f 는 저면 마찰계수 D_{50} 은 기부 저면모래의 통과중량백분율이 50인 크기, V 는 유속이다. 각 항들이 전체 파괴에 미치는 크기는 서로 다르다. f_w 은 주로 입사하는 파랑에 대해 직접적으로 변형하는 경우이고, f_b 은 사면상의 파랑의 쇄파로 인한 2차적인 변형이며, f_s 은 반복되는 외력에 의해 장기적으로 변형하는 기부세굴에 의한 파괴이다. 그리고 f_c 는 천단고의 감소에 따른 무월파에 의한 파괴이다. 지금까지의 연구는 무월파조건에 대한 연구였다. 현지의 대부분의 사석 구조물들이 월파를 허용하고 있고, 설계에 있어서 천

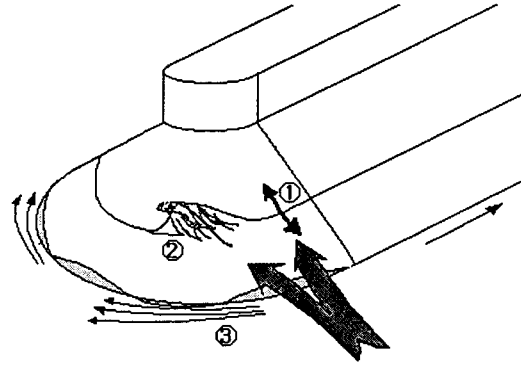


Fig. 1. Failure mechanism at the round head.

단고의 감소추세는 이러한 기존의 연구와 더불어 천단고의 감소에 따른 파괴모드의 규명 또한 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 제두부에서의 파괴모드를 저천단 이안제에 까지 확장하여 그 수리학적 파괴모드를 확인하고자 한다.

안정성 연구에서 정량적인 파괴와 파괴율의 정의는 필수적이다. 먼저 파괴는 피복석의 크기만큼의 이동, 즉, 초기 설치 위치를 벗어난 피복석을 파괴라고 정하고 전체 피복석의 수에 대한 이동한 피복석의 백분율을 파괴율이라 정한다. 일반적인 파괴율은 다음과 같이 정의한다.

$$D = \frac{\text{Number of stones removed}}{\text{Number of stones with in active zone}} \times 100 \quad (2)$$

(CERC, 1984)

파괴율은 위와 같이 영역내의 전체 피복석에 대한 이동한 피복석의 비를 이야기한다. 그러나 본 연구에서의 대상영역은 공간적으로 피복석의 수가 변화하는 제두부이므로 다음과 같이 제두부중앙을 중심으로 하여 피복석의 각 방향에 대한 단면상의 피복석수의 대한 단면상에서 파괴된 피복석수의 비를 이야기한다

$$D = \frac{\text{Number of tetrapods removed}}{\text{Number of tetrapods with in active section}} \times 100 \quad (3)$$

2.2. 실험 조건 및 방법

본 실험에서는 여러 가지 방향성 파랑의 입사에 대한 이안제 제두부 및 제체부 피복석의 파괴와 기부의 세굴 및 퇴적에 대한 안정성을 밝히고자한다. 따라서 파고는 쇄파한계를 중심으로 비쇄파조건인 파고를 사용하였고, 입사파랑의 조건은 Table 1과 같다. 구조물은 Tetrapod로 피복되어 있다 천단고는 정수면을 중심으로 $\pm 5\text{cm}$ 로 설치하였다. 천단고의 변화에 따른 제체 폭의 기준을 어떻게 하느냐가 구조물의 조건을 결정하는 데에 문제가 되었으나 본 실험에서는 사면과 천단고를 중심으로 설정하였다.

Table 1 Experiment conditions

	physical parameters	value
Wave conditions (regular wave)	H(cm)	6~8
	T(sec)	1~1.2
	Direction(deg)	220°, 280°
Structure conditions	Armor	tetrapod(20g)
	Core	riprap(5-10g)
	Slope	1 : 1.5
	Depth(toe)	15cm
	Crest height	±5 cm
Bottom conditions	Sand	$d_{50}=0.18\text{mm}$
	Slope	1 : 30
	Test time	2, 3 hours

저면의 모래입경은 Fig. 2 에서와 같은 입도분포를 가지고 있는 세사를 사용하였다. 이안제 제두부에서의 공간적인 파괴기구를 표현하기 위한 실험기자재의 배치 및 좌표는 Fig. 3과 같다. 좌표계는 이안제의 제두부 중심을 원점으로 하고 이안제의 중심축을 +x축으로 하였다. 기부세굴은 30° 간격으로 사면계를 이용하여 계측하였고 제체부까지 연장하였다. 유속은 도플러유속계를 사용하여 제두부 주위의 유속장을 계측하였다(7×8). 입사하는 파랑은 기부 전면 50cm 지점에서의 파랑계원을 대표파고(H_N)로 사용하였다. 2시간을 실험시간으로 하였고, 시간에 따른 기부세굴 및 퇴적을 측정하기 위해 12시간 장시간 실험도 수행하였다. 파고는 초기파고를 측정하였고, 유속은 사면의 안정후에 제두부 및 제체부 주위의 유속장을 계측하였다. TTP(Tetrapod)는 제두부에는 기부층 하단부터 98개, 제일 상단에 4개로 정적두발걸이 2층 쌓기로 18단 적재하였고, 제체부에는 Section별로 하단, 상단 공히 21개의 TTP를 적재하였다. 제체부에는 구조물의 중앙위치는 방향성 파의 조파유효영역인 조파판 전면의 6m지점에 설치하였다.

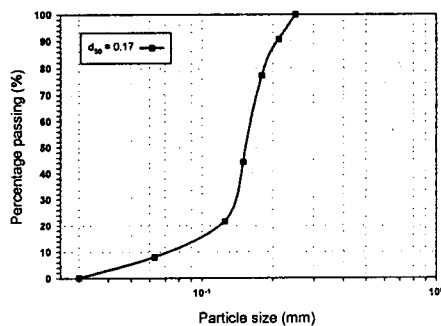


Fig. 2. Grain size distribution.

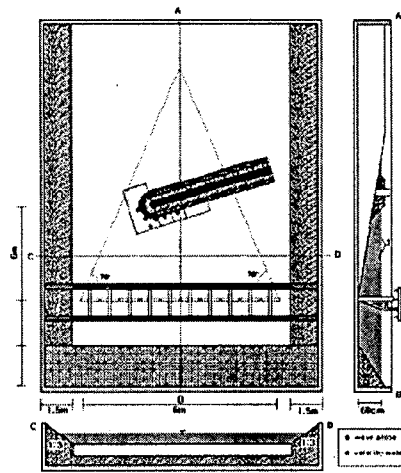
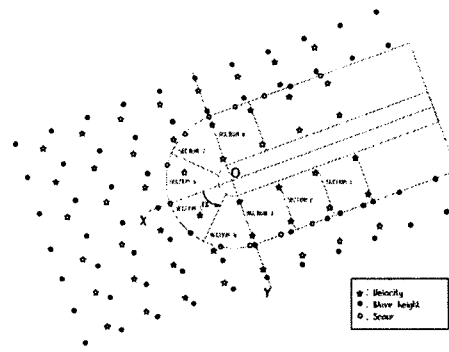


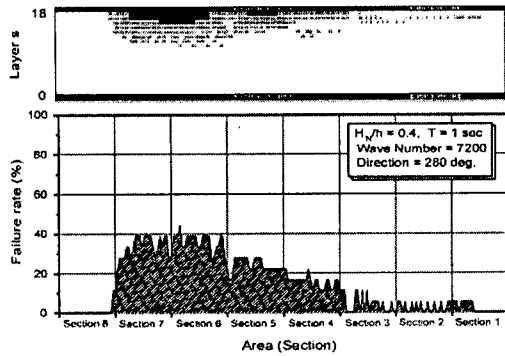
Fig. 3. Experiment setup.

3. 결과 및 고찰

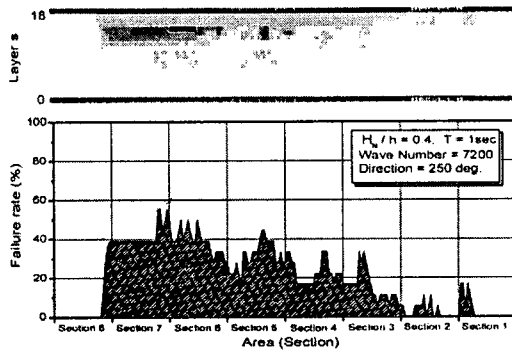
3.1 피복석의 파괴모드

먼저 안정성을 평가하기 위해서 제두부와 제체부의 안정성에 대한 평가방법을 달리하여야 하였다. 따라서 제체부에서는 기존의 일반적인 방법을 사용하여 대상영역에서의 피복석의 수와 파괴된 사석수의 비율을 이용하여 파괴율을 산정하였다. 제두부에서의 방사형태를 가지는 배열을 제체부의 직각배열과 비교하기 위해서 제두부 모든 영역에서의 적재단이 18단인 것을 이용하여 방사형의 제두부를 직사각형의 제체부 형태로 변환하였다. 파괴된 피복석의 위치에 관한 정보는 촬영된 화상과 기록데이터를 이용하였고, 각 단의 TTP 수를 기본으로 하여, 하단과 윗단에 비례값을 곱하여 직각 좌표화하였다.

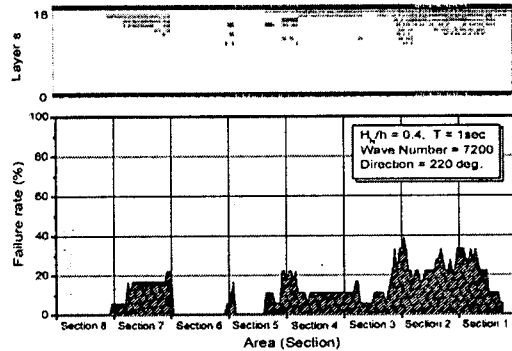
피복석의 파괴는 주로 파고, 주기, 입사 파향이 지배적인 요인이 된다. Fig. 4 에서는 동일한 파형경사를 가지는 파랑을 방향이 다르게(220°, 250°, 280°) 입사하는 경우에 대한 제체부 및 제두부의 피복



a) Direction(α) = 280°



b) Direction(α) = 250°



c) Direction(α) = 220°

Fig. 4. Failure pattern & Damage at the detached breakwaters.

석의 파괴모드를 나타낸다.

가로축은 해당영역(Section 1 ~Section 8) 이며 세로축은 전술한 파괴율이다. 대체로 정수면 이하의 피복석은 파괴가 되지 않았으며 주로 파괴는 사면상의

소상대에서 파괴가 먼저 일어나고 발달하며, 계속해서 소상대 상단의 TTP가 파괴된다. 그림에서 Section 1 ~ Section 3는 전면 제체부이고 Section 4 ~ Section 7은 제두부이다. 또한 월파 혹은 쇄파에 의한 배후면의 안정성을 확인하기 위해 배후면은 Section 8로 두고 관측하였다.

상단의 그림은 방사형의 제두부를 직각좌표로 변환하여 제체부와 통합한 그림이며 그림 내부에 음영으로 표시된 영역이 파괴된 피복석의 위치를 나타낸다. 음영의 농도는 짙은 경우가 초기 파괴이며, 연한 경우가 진행된 파괴영역이다.

피복석의 파괴는 Fig. 1에서 나타내었듯이 전면의 입·반사파에 의한 파괴, 사면상의 쇄파에 의한 파괴 그리고 와류 및 항류성분에 의한 기부세굴에 의한 파괴로 생각할 수 있다. Fig. 4에서 입사하는 방향에 대해 살펴보면 a)는 입사각이 280° 으로 전체적인 파괴가 Section 2와 Section 3에서 일어난다. 이는 사면상의 쇄파에 의해 강화된 유속으로 일어난 파괴이다. a)의 경우 상대적으로 전면의 입·반사파에 의한 파괴가 적다. 이는 입사파와 반사파의 방향이 상이하어 중복파 영역이 구성되지 않았기 때문이며, 따라서 파괴율의 분포는 단봉형의 형태를 가진다. b)의 경우 입사파의 방향은 250° 이다. a)의 경우와는 다르게 반사파에 의한 Section 4, Section 5의 영역에서 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있으며, Section 7에서의 파괴는 쇄파에 의한 파괴이다. 따라서 파괴율의 분포가 전면의 파괴영역과 쇄파에 의한 파괴영역이 분리되고 있음을 보인다. c)의 경우에는 제두부를 중심으로 볼 때 전형적인 쌍봉형의 형태를 띤다.

3.2 기부세굴의 공간적인 특성

기부세굴은 속도전단에 의한 바닥단층력에 의해 진행된다. 따라서, 본 연구에서는 이안제의 후면으로부터 전면까지 기부를 따라 15 point를 계측하였다. 간격은 배후면 4측점(Point 1~Point 4), 제두부 7측점(Point 5 ~ Point 11) 그리고 전면 4측점(Point 12 ~Point 15)을 30cm 간격으로 사면계를 이용하여 계측하였다. Fig. 5는 각 측점에 대한 세굴깊이를 나타내는 것으로 세가지 입사방향에 대해 나타내었다. 세굴의 발생원인은 대표적으로 쇄파에 의해 발생된 흐름과 전면 중복파 영역에서의 정상흐름, 그리고 이안제를 연행하는 와류이다. 이는 피복석의 파괴모드와도 유사한 형태를 띤다. Fig. 5에서 입사방향에 따른 최대 세굴깊이의 위치가 변하고있는 것을 알 수 있다. 세굴발생원에 대해 생각해보면 입사각이 220°의 경우에 전면에서 세굴이 가장 발달하는 것을 알 수 있고 방향이 바뀔에 따라 최대세굴위치가 배후로

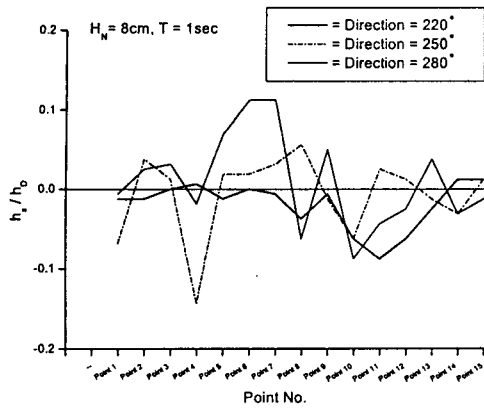


Fig. 5. Distribution of scouring depth with wave directions.

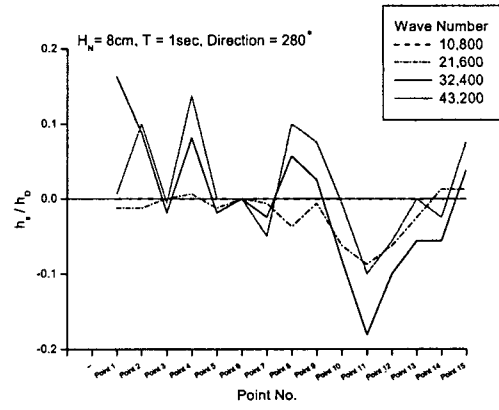
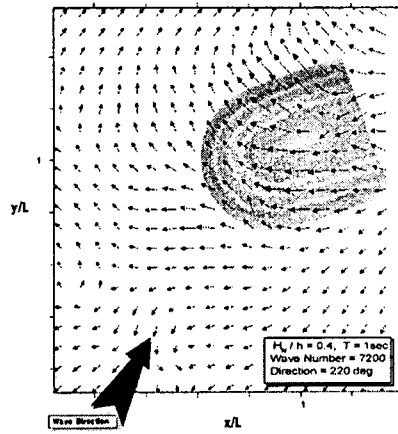
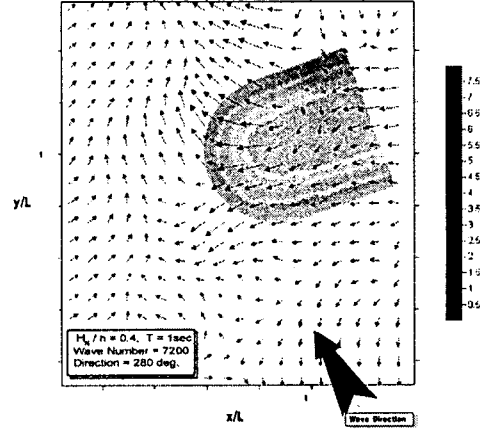


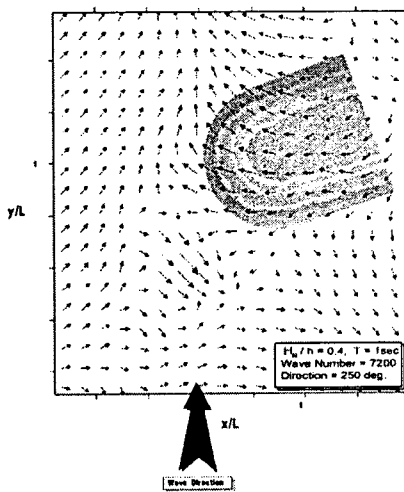
Fig. 6. Development of the scouring depth



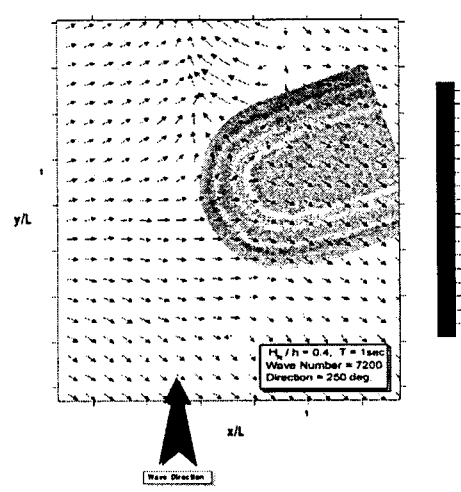
a) Direction = 220°, $H_N/h_i=0.4$, $h_c/h_i=-0.33$



b) Direction = 280°, $H_N/h=0.4$, $h_c/h_i=-0.33$



c) Direction = 280°, $H_N/h=0.4$, $h_c/h_i=-0.33$



d) Direction = 280°, $H_N/h=6.7$, $h_c/h_i=+0.33$

Fig. 7. Distribution of velocity field around the detached breakwaters.

발달하지 않았으며, 250°의 경우에 이동하는 것을 알 수 있다. 반면 사면상에서 발생한 쇄파에 의해 강화된 유속은 220°의 경우에 배후면 세굴이 가장 큰 것을 알 수 있다. 모든 경우에서 구조물 전면에서 배후면 까지 구조물에 연행하는 와류의 영향으로 작지만 세굴이 발달하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 같은 파랑조건에 대해 장시간 관측하여 세굴의 발달을 나타낸 것이다. 세굴이 초기에 작용하는 외력에 의해서 처음에는 크게 발달하다가 점점 평형 단면으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다.

3.3 제두부의 유속분포

본 연구에서는 이안제에 작용하는 여러 가지 물리적 파라미터 중에서 입사방향과 함께 유속이 가장 중요한 인자이다. 저면의 세굴은 중복파의 영향과 구조물과의 상호작용으로 생성된 흐름에 지배적으로 발달한다. 피복석의 파괴 또한 사면상의 쇄파에 의한 강한 유속의 발달로 증대된다. 따라서 제두부 부근의 유속장과 기부저면의 변형을 함께 고려하여야 하며 배후면의 유속 또한 중요한 인자 된다. Fig. 7은 제두부로 입사하는 파랑에 대한 지점평균유속의 분포이다. 유속의 분포는 입사하는 파향에 따라 전면의 중복파와 구조물을 연행하는 와류에 의해 유속이 발달하여 있는 것을 알 수가 있고, 회절되어 돌아가는 leewake vortex의 발달도 확인 할 수 있다.

세부적으로 살펴보면 a), b) 그리고 c)에서 평균유속은 입사하는 방향에 대해서 구조물을 측면과 상부를 감싸면서 굴절되는 패턴을 보인다. 구조물에 대해 측면으로 돌아가는 와류보다 구조물의 상부를 진행하는 쇄파에 의한 유속이 상당히 강한 것을 볼 수가 있다. 전면에서는 반사파에 의해 발달한 흐름도 보이며 구조물을 연행하는 흐름이 보인다. 또한 d)의 경우는 저천단의 조건이므로 사면상의 유속보다는 구조물을 우회하여 진행되는 현상이 나타나고 파고가 증가되었으므로 앞의 a), b), c)와 비교할 때 전면의 유속장은 구조물의 파괴로 인해 감소하였고, 쇄파에 의한 배후면의 유속이 강하게 발달하는 것을 알 수가 있다.

4. 결론

이상의 실험들을 통해서 방향성 파랑의 입사에 따른 이안제의 제두부에서의 파괴 및 세굴에 대한 특성을 검토하고, 파괴기구를 밝혔다. 전반적인 실험 케이스에 대해서 지배적인 변수는 입사파랑의 조건인 주기, 파고, 파향의 물리량들이지만 가장 크게 영향을 미치는 것은 입사파향이다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 방향성 파랑의 입사에 따른 이안제 제두부의 파괴 메카니즘을 알 수 있었다.
- 2) 파괴는 크게 사면상의 쇄파에 의한 파괴, 중복파 영역에서의 입·반사파에 의한 파괴, 기부 저면의 세굴 및 퇴적에 의한 파괴로 나뉜다. 허나 세굴에 의한 파괴는 크기가 파괴라기보다는 장시간의 정상흐름에 의해 기부가 변형이 되는 경우이다.
- 3) 이안제 주위의 유속장을 통해서 쇄파에 의한 파괴가 구조물에 가장 큰 영향을 주는 것을 확인 할 수 있다.

본 연구는 방향성파를 조건으로 실험을 행하였고 차후에는 다방향불규칙파에 대한 이안제의 상호관계에 대한 연구도 계속하여 진행되어야 할 것이다.

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) Fredsoe, J. and Sumer, B.M., "Scour at the round head of a rubble-mound breaker", ASCE, coastal Engineering Vol. 29, 231-262, 1997.
- 3) Fredsoe, J., "Modelling of Non-cohesive Sediment Transport Processes in the Marine Environment", Coastal Engineering Vol 21, 71-103, 1993.
- 4) 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.
- 5) Purandare, M.M. and Narayana, P.A.A., "Wave Power Variation in the Near-shore Regions", Coastal Engineering Vol. 11, 381-390, 1987.
- 6) Ranasoma, K.I.M. and Sleath, J.F.A., "Velocity Measurements Close to Rippled Beds", Coastal Engineering, No. 183, 2383-2396, 1992.
- 7) Sumer, B.M., Laursen, T.S. and Fredsoe, J., "Wave Boundary Layers in a Convergent Tunnel", Coastal Engineering Vol. 20, 317-342, 1993.
- 8) Van der Meer, J.W. and Vedman, Jonhannes J., "Singular points at berm breakwater: scale effects, rear, round head longshore transport" ASCE, Coastal Eengineering, Vol.17, 153-171, 1992.