

입사파의 방향성효과에 의한 방파제 제두부의 안정성에 관한 실험적 연구

손병규* · 김홍진* · 류청로*

한국건설기술연구원 수자원환경연구부, *부경대학교 해양공학과

An Experimental Study on the Stability of Breakwater Head by the Wave Directional Effects

Byung-Kyu SOHN[†], Hong-Jin KIM* and Cheong-Ro RYU*

Korea Institute of Construction Technology, Water Resources and Environmental Res., Koyang 411-712, Korea

*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

The aim of this study is to check the application criteria of the conventional techniques and clarify the effects of breaker depth, seabed conditions on the stability in relation to the effects of uncertainty of storm duration and directional irregular waves. The typical damage modes were divided by the direct wave force on the armor unit and by the local scouring around the toe of a breakwater head by the model experiments. The destruction modes are defined, and some criteria on the damage modes and scouring/deposition at the toe of a breakwater head in relating the wave-bottom-structural conditions can be checked using the multi-directional irregular wave generator system. According to the results, it is emphasized that the 3-D effects on the stability should be analyzed in the design of multi-purpose/function coastal structures in consideration of the evaluation of spatial variation of damage modes and hydraulic characteristics as well as the wave distribution along the structures.

Key words: Stability, Scour, Wave directionality, Breakwater head, Damage mode

서 론

다양한 연안역 방제시설중에서 방파제는 입사파랑을 제어하여 항만이나 배후지역의 기능을 유지시킬 목적으로 건설된 가장 기본적인 중요한 연안시설물중의 하나이다. 외곽시설인 방파제는 해양으로부터의 끊임없는 자연재해에 항상 노출되어 있으며, 이로 인해 방파제의 설계수명이 계속 발전되어 온 것은 당연한 일이다. 현재까지도 방파제의 안정성은 수리모형실험으로 평가할 수 밖에 없는 입장이며, 특히 방파제 제두부의 안정성 평가는 불확실한 요인이 많아 결정론적으로 평가하기에는 어려움이 많다.

사석방파제 제두부에 대한 설계는 경험적으로 제간부의 1.5배 이상의 사석(블록) 중량으로 설계·시공되어지고 있다. 그렇지만, 실제 현장에서의 피해사례를 살펴보면 방파제의 제두부 혹은 호안의 우각부에서 초기파괴가 발생하는 것을 볼 수 있고, 사석방파제의 파괴모드는 사면상의 파랑의 직접작용에 의한 파괴와, 기초부 세굴에 의한 파괴로 각각 나누어 검토되고 있다(柳 등, 1999). 또한 사석방파제 제두부에서의 세굴특성은 Fredsøe and Sumer (1997)에 의해 실험적으로 연구되었으며, 최근 Ryu and Sohn (1999)은 2차원 단면실험을 통해 기초부 세굴과 피복석(블록)의 안정성의 한계를 정하기도 하였으며, 평면실험으로 파괴모드의 공간적인 분포특성을 고려한 연구성과를 제시한 바 있다.

이러한 제두부에 대한 연구는 주로 제두부 주위의 세굴 특성과 연관지어 진행되어 왔으며, 곡선부 호안 및 제두부의 안정성에 관한 연구도 진행되었다(Ryu and Sohn, 1999). 방파제 제두부의 파괴

메카니즘은 파와 구조물의 상호작용에 의한 중복파 영역에서의 파괴(Van der Meer and Vedman, 1992), 제두부의 사면상을 따라 발달하는 권파쇄파(plunging breaker)와 흐름에 의한 파괴(Fredsøe and Sumer, 1997), 방파제 기초부에서의 세굴 및 퇴적에 의한 피해한계(Ryu and Sohn, 1999)와 같이 크게 세가지로 나눌 수 있다.

이와 같이 제두부는 입사파의 방향성의 영향을 현저하게 받아 들일 가능성이 높으며, 3차원적인 현상의 원인 규명을 위해 수리모형실험으로부터 해결책을 찾으려는 노력이 집중되고 있다. 특히 입사파랑의 방향성, 불규칙성 및 3차원성에 대한 고려도 중요한 사안으로 지적되고 있다. 따라서 본 연구는 제두부의 파괴모드와 제두부 주변의 물리적인 영향인자를 고려하여 입사파의 방향성효과에 의한 파괴메카니즘의 시·공간적인 특성을 규명하고자 하였다.

재료 및 방법

Core층의 투수계수 측정

항만구조물의 계획 및 설계에 있어서는 수리모형실험에 의해 결정할 수 밖에 없는 사항이 적지 않다. 본 연구에서는 축척효과가 발생하지 않도록 투수계수를 일정하게 유지하기 위하여 core층의 투수성에 대해서 검토하였다. 투수실험은 투수계수가 큰 조립토에 적합한 정수두 투수실험을 수행하였으며, 투수실험 조건은 Table 1에 나타낸 것과 같다. 본 실험에 사용된 투수계는 재료용기의 길이 L=80 cm, 수두차는 110 cm로 하였고, 재료는 평균 입경이 다른 7종류의 시료를 사용하였다. 본 투수실험에 사용된 재료의 공극률은 43~46%로 편차가 5% 이내의 공극률을 가지는 사석을 사용하였으며, 7종류의 재료에 대하여 수두를 일정하게 유지하면서

[†]Corresponding author: bksohn@kict.re.kr

Table 1. Results and condition of permeability test

| Grain size (cm; d_{50}) | Density (g/cm ³) | Porosity (%) | Permeability (cm/sec) |
|----------------------------|------------------------------|--------------|-----------------------|
| 0.15 | 2.58 | 44 | 1.1 |
| 0.7 | 3.00 | 45.83 | 6 |
| 1.05 | 2.90 | 43.30 | 7.46 |
| 1.35 | 2.80 | 44.00 | 9.09 |
| 1.71 | 2.82 | 44.10 | 10.64 |
| 2.23 | 2.70 | 43.30 | 12.53 |
| 2.95 | 2.93 | 45.80 | 14.52 |

10회 반복하여 측정하였다.

투수계수의 결정은 Darcy의 법칙을 적용하여 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$Q = A \cdot k \cdot i \cdot t = A \left(k \frac{L}{L} \right) t \quad (1)$$

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (2)$$

여기서, Q: 단위시간당 유량, A: 시료의 단면적, L: 시료의 길이, h: 수두차, t: 측정시간을 각각 나타낸다.

투수실험결과 식 (2)와 같은 방법으로 각각의 직경에 해당되는 재료들의 투수계수를 Table 1과 같이 나타내었다. 그리고 사석방파제의 내부 흐름에 관해서는 정상침투실험에 의한 침투류의 축척효과와 발생관계는 $Re_{core} < 2 \times 10^3$ 로 된다 (柳, 1984)는 결과에 따라, 축척효과가 발생하지 않도록 투수계수를 유지하였다.

사석 및 피복석 (블록)의 공극율과 구조물의 형상을 일정하게 하고, 방파제의 법선방향의 지형변동을 검토한 후 기초부의 세굴패턴을 고찰하였다. 수리모형 실험조건은 Table 2와 같이 구성하였다.

Table 2. The experimental conditions of breakwater models to analyze the stability

| Terms | W_a | W_c | Slop | h_t (cm) | Spectrum type | Bottom slope |
|---------------|-----------------------------------|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------|
| Scale (1:100) | 20 g | 5~10 g | | | | |
| | 20 g, only build a TTP (2 layers) | | 1:1.5 | 15 | JONSWAP | 1:30 |
| | Uni-directional regular waves | | | Multi-directional irregular waves | | |
| Wave type | H(cm) | T(sec) | β (°) | $H_{1/3}$ (cm) | $T_{1/3}$ (sec) | β (°) |
| | 6~12 | 0.7~1.5 | 60, 70, 90, 110, 120 | 6.2 | 1.2 | 70, 90, 110 |

Notes: W_a , W_c are the weight of armour unit of revetment, core layer respectively, h_t is the water depth at the toe of the breakwater, H, $H_{1/3}$ are the incident wave height, T, $T_{1/3}$ are the period of incident wave, β is the principal wave direction, S_{max} is the spreading parameter. All models are scaled with Froude criterion of similitude.

파괴율의 산정

방파제 제두부의 파괴는 파와 구조물의 상호작용에 의해 야기되는 중폭파영역, 사면상의 쇄파형태, 흐름발생에 지배된다. 이와 같이 방파제 제두부에서 발생하는 파괴 메커니즘을 Fig. 1과 같이

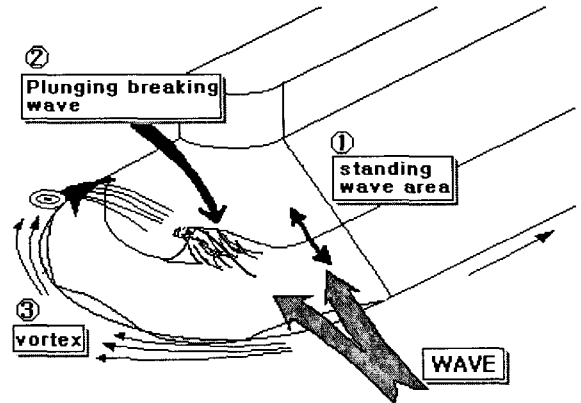


Fig. 1. Failure mechanism around the breakwater head.

모식적으로 나타낼 수 있다.

사석방파제의 안정성 평가시 정량적인 파괴와 파괴율의 정의는 필수적이다. 파괴는 피복석 (블록)의 크기만큼의 이동 즉, 초기 설치 위치를 벗어난 피복석 (블록)을 파괴라고 정하고 전체 피복석의 수에 대한 이동한 피복석의 백분율을 파괴율로 정의한다 (CERC, 1984). 일반적인 파괴율은 다음 식과 같다.

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

그러나 제두부는 공간적으로 피복석의 수가 변화하는 영역이므로 다음 식과 같이 제두부중앙을 중심으로 피복석의 각 방향에 대한 단면상의 피복석 수에 대한 해당 단면상에서 파괴된 피복석 수의 비로 정의한다.

$$D(\%) = \frac{\text{Number of tetrapods removed}}{\text{Number of tetrapods with in active section}} \times 100 \quad (4)$$

실험방법 및 내용

본 연구에서는 모두 이동상실험을 수행하였으며, 중앙입경 $d_{50} = 0.18$ mm의 모래를 이용하였다. 좌표계는 Fig. 2와 같이 제두부 중심을 원점으로 하고 방파제 법선방향의 축을 x축으로 하였다. 여기서 α 는 그림과 같이 파랑의 진행방향이 아니라, 제두부의 중앙으로 진행해 오는 방향이다. 그리고 모형방파제가 조파판과 20° 기울어지게 제작한 것은 수조내에 발생하는 다중반사의 영향을 고려한 것이다. 기초부 세굴은 30° 간격으로 사면계 (Sandy surface measuring in strument, WHT-100, KENEK Co.)를 이용하여 계속하였다. 유속은 도플러유속계 (Doppler velocity meter, ADV lab, NORTEK)를 사용하여 제두부 주위의 유속장을 계속하였다. 파랑은 일방향규칙파 (Uni-directional regular wave)와 다방향 불규칙파 (Multi-directional irregular wave)의 조건으로 Goda (1985)의 쇄파관계식을 사용하여 쇄파조건, 비쇄파조건으로 실험을 수행하였으며, 입사파향은 제간부에 수직으로 입사하는 $\beta = 110^\circ$ 외에 $\beta = 60^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 의 파향을 사용하였다. 또한 대표파의 주기는 0.7 sec, 1.0 sec, 1.2 sec 및 1.5 sec를 각각 사용하였고, 다방향불

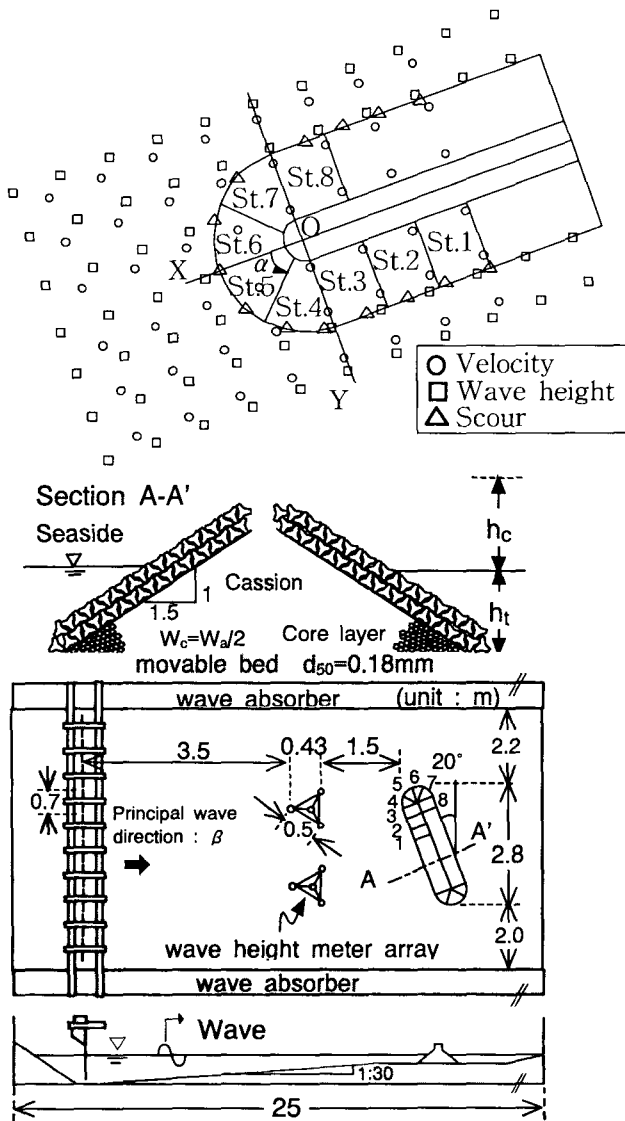


Fig. 2. Experimental apparatus of multi-directional irregular wave-maker basin.

규칙파의 경우는 목표스펙트럼은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였으며 방향집중도 파라미터 $S_{max}=75$ 를 사용하였다. 그리고, 구조물의 설치 전면 기초부에서의 수심을 15cm로 하였으며, 1:1.5 사면경사에 피복석은 TTP (Tetrapod)로 피복하였으며, 중량은 20g이고, core층의 내부사석은 5~10g을 사용하였다. 실험은 천단을 높게 설치한 무월파조건이며, 대표파랑은 제두부 전면 1.5파장 거리에서 입·반사파를 분리하여 대표파고로 사용하였다. 실험은 기본적으로 3시간을 실험시간으로 하였고, 시간에 따른 기초부 세굴을 측정하기 위해 12시간 장시간 실험도 수행하였다. 제두부의 안정성의 평가를 위해 파괴의 공간적인 이동분포상황을 목시관측, 비디오촬영, 사진촬영으로 파괴율에 미치는 오차를 최소화하였다.

이와 같이 기본적으로 반복실험을 수행하여 실험에 의한 오차를 최소화하였으며, 200 case의 실험을 수행하였다.

결과 및 고찰

피복석의 안정성

피복석의 소요중량을 산정하기 위해 이용되는 Hudson식은 식 (5)와 같다. Hudson식은 1959년에 경사제 피복석의 소요중량 W 를 산정하는 식으로 제안된 것으로 많은 실험결과로부터 얻어진 우수한 식이고, 각종 피복석의 설계에 폭넓게 이용되고 있다.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{[K_D(S_r - 1)^3 \cot A]} \quad (5)$$

여기서, W 는 피복석 1개의 중량, γ_r 는 사석이나 블록의 공기중의 단위체적중량, H 는 설계계산에 이용되는 파고, S_r 는 사석이나 블록의 해수에 대한 비중, A 는 사면경사, K_D 는 피복석의 형상 및 파괴율에 의해 정해지는 정수를 각각 나타낸다.

그러나 이 설계식은 상술한 바와 같이 파고만의 함수이고, 사석 중량은 파고의 3승에 비례하고 있지만, 파의 주기의 효과는 고려하지 않았다. 그래서 사면상의 흐름특성 및 유체력의 변동특성과 사석방파제의 파괴한계를 비교한 많은 연구결과에 의거하여 사석방파제의 파괴실험 결과를 파괴율로 나타내기 위하여 다음 식과 같은 안정계수 N_s 를 도입하였다 (柳, 1984).

$$N_s = \frac{\gamma_r^{1/3} H D(\%)^{\xi}}{W^{1/3} (S_r - 1)} = f\left(\theta, \frac{H}{L}, \frac{h}{L}, \xi, D(\%), \nabla, \dots\right) \quad (6)$$

여기서 ξ 는 surf similarity parameter를 나타내며, θ 는 방파제의 법선에 수직인 방향에 대해 시계방향의 각, $D(\%)$ 는 임의 면적에 대한 파괴율을 각각 나타낸다.

Fig.3~Fig. 5는 규칙파와 불규칙파에 대한 제두부의 안정성을 평가한 것으로 이들 그림에서 나타난 파괴율 $D(\%)$ 는 柳 (1984)가 제시한 파괴율로서 검토한 것이다. Fig. 3은 제두부의 대표단면에서 규칙파에 의한 안정성의 결과를 나타낸 것이다. 그리고 종래 사석방파제의 안정성에 관한 2차원 수리모형실험 결과중 柳 (1984)의 실험데이터와 비교하였으며, 초기파괴영역 ($D=0\sim5\%$)

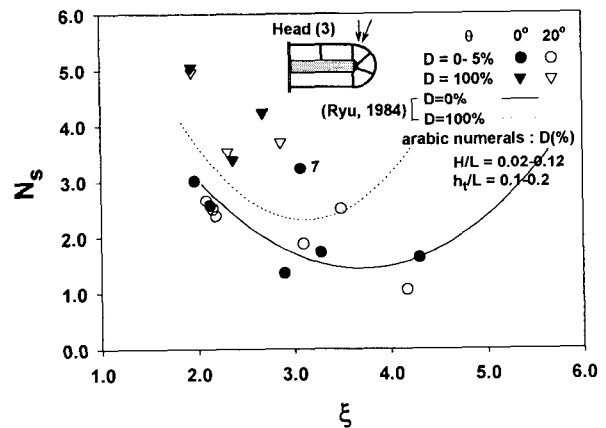


Fig. 3. Effect on the stability of the breakwater head under the directional regular waves.

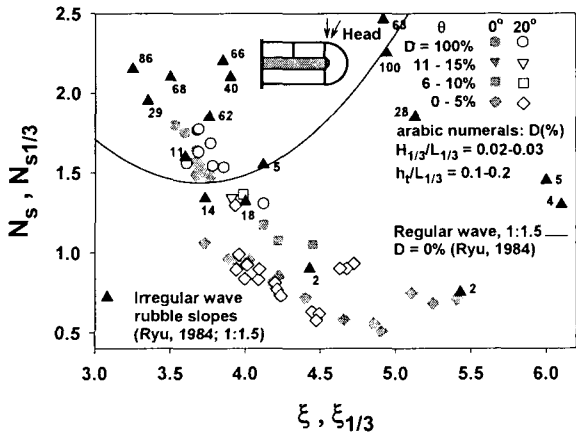


Fig. 4. Effect on the stability of the breakwater head under the directional irregular waves.

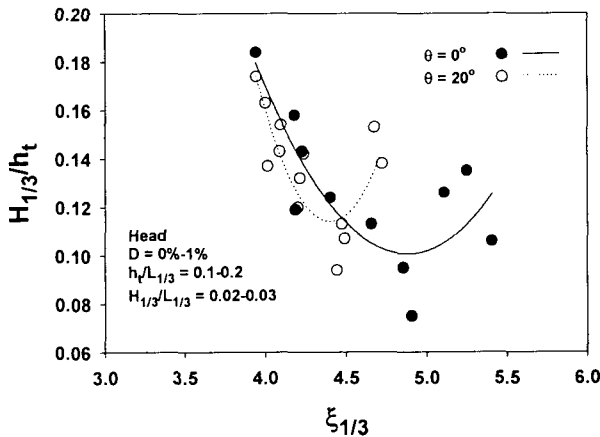


Fig. 5. Damage mode in related to the wave directionality at the head (=D_{0%-1%}).

에서는 비교적 근사하게 나타나고 있으나, $D=100\%$ 에 대한 결과를 서로 비교하면 입사파의 방향성효과에 의한 파괴율의 차이가 다소 발생하고 있다. 이는 TTP가 이동·이탈에 의해 파괴된 것으로 추측되지만, 피복층의 개체형상에 따른 영향으로 판단된다. 이 그림에서 방파제의 안정성은 입사파의 방향성에 의한 영향을 초기파괴한계로서 검토하면 입사각 $\theta=20^\circ$ 일 때 방파제는 오히려 불안정하다고 판단된다.

Fig. 4는 불규칙파에 의한 제두부의 파괴특성을 그때의 파괴율($D\%$)마다 한데모은 $\xi_{1/3} - N_{s1/3}$ 으로 나타낸 일례이다. 이 그림에서 기호 \blacktriangle 은 柳(1984)의 2차원불규칙파 실험결과이며, 숫자는 그때의 파괴율을 나타낸 것이다. 이 그림에서 규칙파의 초기파괴한계는 불규칙파의 실험결과와 상당한 차이가 있으며, 안정성 평가시 유의해야 할 사항으로 판단된다. 파괴율의 정의에 차이는 있지만, 불규칙파 실험시 사석사면보다 TTP사면이 오히려 불안정하다는 것을 알 수 있으며, 이는 stability number $N_{s1/3}$ 의 값과 초기파괴한계로서 판단할 수 있다. 또한 경사 입사파에서 큰 피해를 나타낸다는 종래의 연구결과(Matsumi et al., 1994)와 일치하고 있으나, 데이터의 분산이나 실험상의 여러 여건이 꼭 같다고는 할

수 없기 때문에 명확한 판단을 내릴 수는 없다.

Fig. 5는 안정성에 미치는 외력인자로서 생각되는 surf similarity parameter $\xi_{1/3}$ 와 상대파고 $H_{1/3}/h_t$ 를 변화시켜 방파제 제두부에서 얻어진 파괴율 1% 이하의 결과로서 초기파괴한계를 각각 나타내었는데 직각 입사하는 경우가 위험하다고 판단할 수 있다. 이들 규칙파에 의한 안정성의 목시관측 결과 $H/h_t > 0.5$ 가 되면, 사면이 불안정하게 되어 피복된 사면상의 TTP가 파괴된 부분에 군데 군데 사석층이 드러나는 spot현상과 같이 core층이 드러나게 되었으며, 더욱이 연속되는 고파랑으로 인하여 core층이 더 넓게 확장되어 상술한 파괴의 정의에 따라 완전파괴($D=100\%$ 에 해당)에 이르는 경우가 많았다.

방파제 제두부에서는 방파제의 배치형상과 연속된 고파랑으로 인하여 사면상의 굴절과 유속(수립자속도), 회절의 영향으로 인해 파괴된 TTP와 core층의 사석이 배후면에 쌓이는 현상이 두드러지게 많았다. 특히, 제두부의 구조적인 형상으로 인하여 파괴의 공간적인 분포가 다르기 때문에 이후 상세한 언급을 하기로 한다.

제두부의 공간적인 안정성을 평가하기 위해 기초부를 중심으로 반원형의 곡면제두부를 Fig. 6과 같이 직각좌표화 하였다. Fig. 6은 파향, 파고, 그리고, 주기에 따른 파괴의 공간적인 분포를 나타낸 것이다. 각 그림의 상단은 입사방향별(α) 파괴율(= $D\%$)을, 그림의 하단은 제두부를 직각좌표화 하여 피복석의 공간적인 파괴분포를 나타낸 것이다. 그림 내에서 격자를 이루고 있는 영역은 파괴가 일어나지 않은 영역이고, 격자가 없는 폐곡선 부분은 파괴된 영역이다. 음영의 농도가 짙은 경우가 초기파괴를 나타내며, 점점 얼어지면서 파괴의 발달과정을 나타낸 것이다. 격자내의 흰색 세로선은 입사파향을 나타내며, 입사하는 파향에 따른 초기파괴 위치와 공간적인 파괴패턴을 파악할 수 있다. 입사파향 $\beta=110^\circ$ 인 a)와 입사파향 $\beta=70^\circ$ 인 b)는 입사파향에 따라 파괴의 위치와 규모가 다른 것을 알 수 있고, 안정성에 미치는 주기효과도 입사파향 $\beta=110^\circ$ 인 c)와 d)의 그림을 비교하여 초기파괴 위치와 파괴의 영향범위가 다른 것을 확인할 수 있다. a)와 c)의 그림에서와 같이 파향과 주기는 같지만, 파고 값이 다른 경우에도 초기파괴 위치와 파괴의 영향범위가 다른 것을 알 수 있다. b)와 d)의 그림에서는 주기가 길어지면 사면상의 쇄파에 의한 파괴가 강해지고, 초기 파괴위치 또한 배후로 이동하는 것을 볼 수 있다. 파형경사가 안정적 인 경우에는 중복파에 의한 파괴와 사면상의 쇄파에 의한 파괴가 함께 발달하는 것을 볼 수가 있다. 따라서 파형경사와 파향에 의해서 제두부의 파괴와 발달이 달라지는 패턴으로 나타났으며, 파고는 전면 중복파 영역과 사면상의 쇄파에 영향을 미치며, 주기의 변화는 사면 중앙의 피복석과 배후면의 기초부 세굴의 발달에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 동일한 파형경사를 가지는 파랑을 입사파향이 다른($\beta=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$) 경우에 대한 제간부 및 제두부의 피복석의 공간적인 파괴형태를 나타낸 것이다. 가로축은 Fig. 2의 해당영역을 나타내며, 세로축은 전술한 파괴율이다. 피복석의 파괴는 Fig. 1과 같이 전면의 중복파에 의한 파괴, 사면상의 쇄파에 의한 파괴 그리고 와류 및 항류성분에 의한 기초부 세굴에 의한 파괴로 생각할 수 있다.

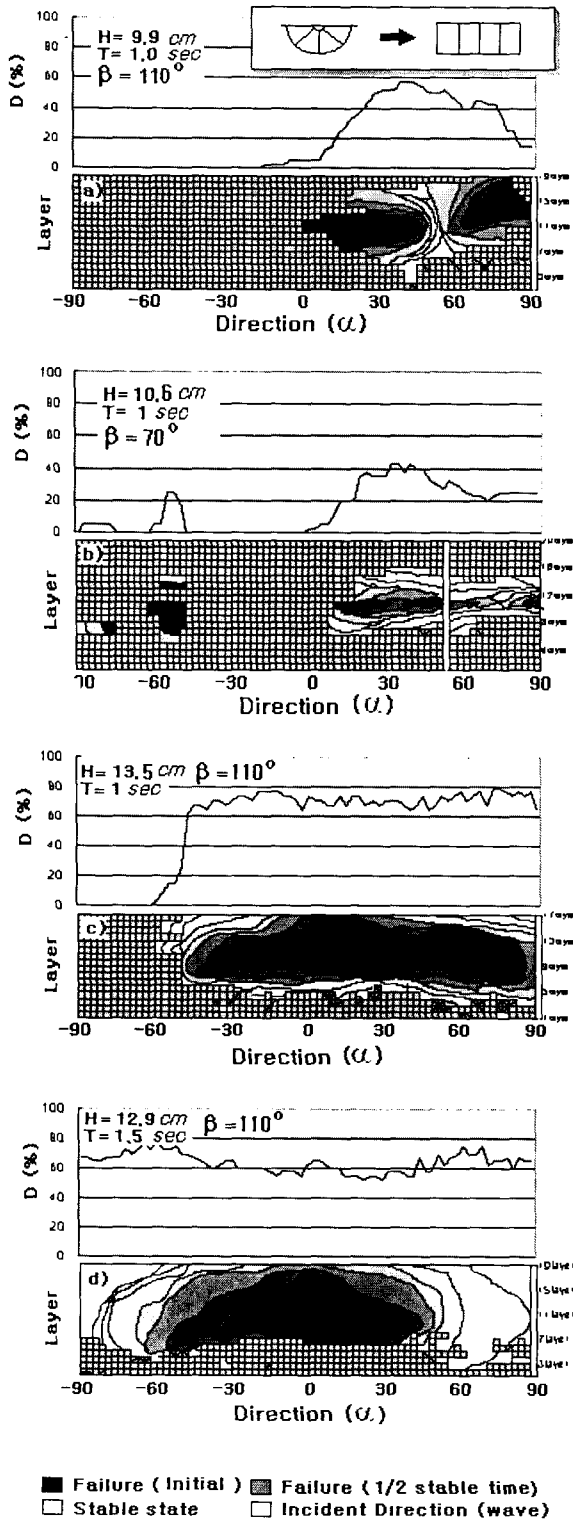


Fig. 6. Spatial distribution of the damaged pattern around the breakwater head (principal wave direction $\beta=70^\circ, 110^\circ$).

이들 그림에서와 같이 파괴는 정수면 부근에서 발생하고 있으며, 사면상의 run-up, run-down에 의해 정수면 부근의 파괴가 확

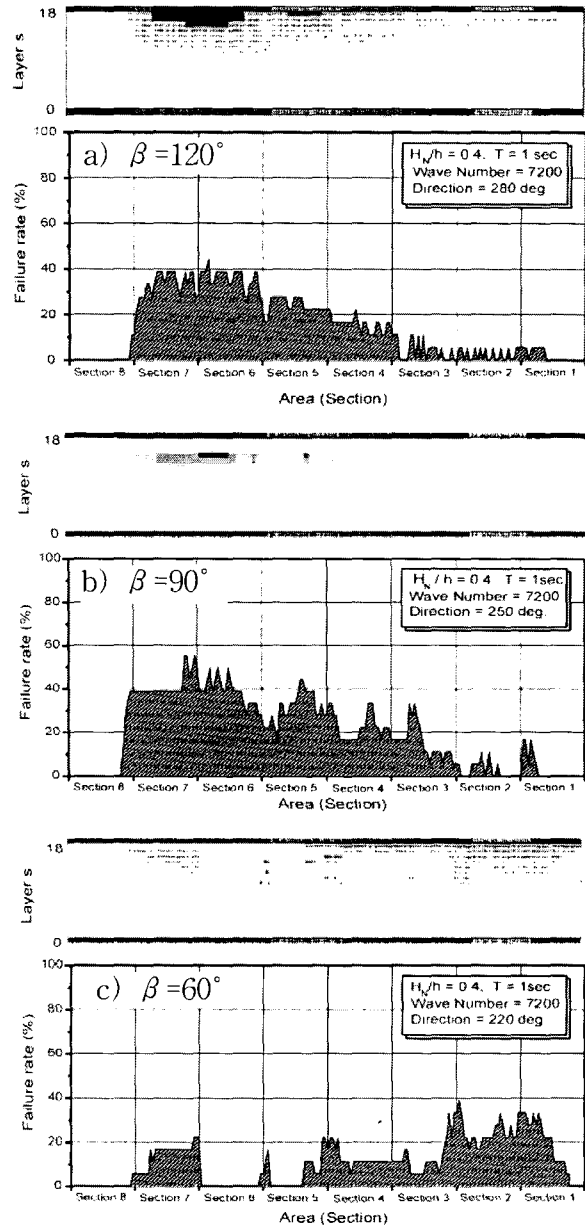


Fig. 7. Spatial distribution of the damaged pattern around the breakwater head (principal wave direction $\beta=120^\circ, 90^\circ, 60^\circ$).

대된 것으로 판단된다. 그리고, 입사파향 $\beta=120^\circ, 90^\circ$ 인 경우에는 초기 파괴위치가 달리 나타난 반면에 파괴패턴은 거의 유사하며, 입사파향 $\beta=60^\circ$ 인 경우에는 제간부에서 오히려 파괴율이 높게 나타났으며, 파괴의 패턴이 a), b)와는 아주 달리 나타났다. 이는 입사파의 방향성효과에 의해 발생하는 전형적인 피해패턴으로 생각된다.

기초부 세굴의 공간적인 분포특성

파랑에 의한 저면의 지형변화는 구조물을 따라 흐르는 정상와 동류인 정상흐름 (steady stream)의 발달로 저면 유속 및 저면

전단응력이 발달하여 저면의 모래입자를 교란하고, 저질의 이동한계를 넘어서면서 세굴 혹은 퇴적으로 발달한다 (Fredsoe and Sumer, 1997). Fig. 8에서 a)는 주기가 1초, b)는 1.2초의 일방향규칙파의 조건이다. 상대적으로 주기가 짧은 경우에는 제두부의 기초부를 따라 전면이 세굴되고 배후면이 퇴적되는 단순한 패턴을 나타냈다. 그리고 주기가 긴 경우에는 정상동류의 발달로 $\alpha=20^\circ$ 에서의 세굴이 발달하는 것을 볼 수 있다. 제두부의 중앙에서 전면까지의 영역을 중심으로 세굴과 퇴적이 교차하고 배후면은 퇴적이 발달한다. 주기 1초의 경우에 전면의 세굴은 계속 발달하여 수렴해가고 있는 것을 볼 수 있고, 1.2초의 경우는 초기 3시간까지는 세굴이 되다가 점차 퇴적되는 것을 볼 수가 있다.

Fig. 9는 방향집중도 파라메타 $S_{max}=75$ 인 다방향불규칙파를 조파시킨 경우에 기초부 세굴의 분포 특성을 검토한 것이다. a), b)의 그림은 입사파향이 각각 $\beta=70^\circ, 110^\circ$ 의 경우이다. 입사파향에 따라 최대 세굴의 위치가 주 입사방향으로 이동하고 있는 것을 a), b)의 그림에서 알 수 있으며, 배후면은 주로 퇴적되고 있다. 다방향불규칙파는 일방향규칙파에 비해 배후면 회절이 강해져서 배후면 와류를 발달시키는 것을 볼 수가 있다. 이는 파군효과로서 불규칙파랑의 입사로 인해 개개의 파랑이 선형 중첩되어 포락 파군을 형성하고 이렇게 발달한 파군은 피크주기 보다 큰 장주기효과

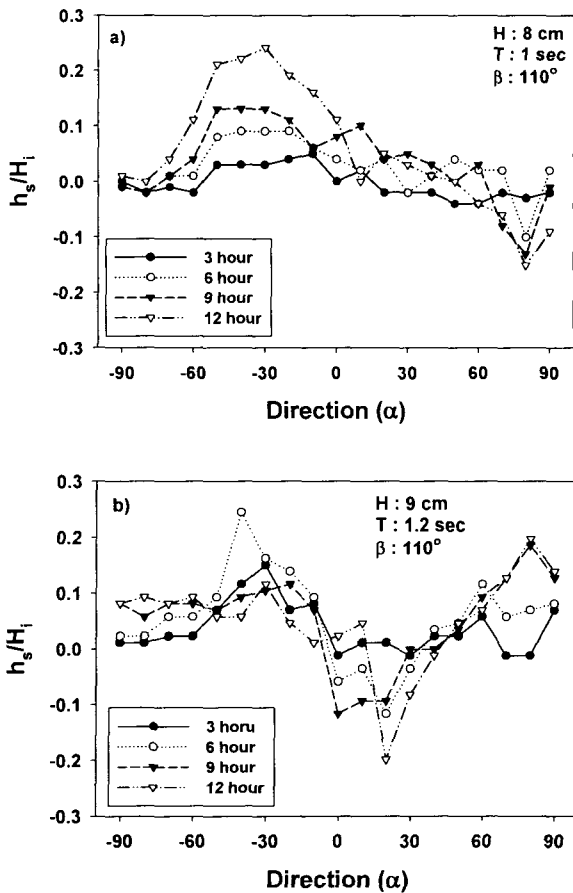


Fig. 8. Spatial distribution of scouring depth under the uni-directional regular waves ($\beta=110^\circ$).

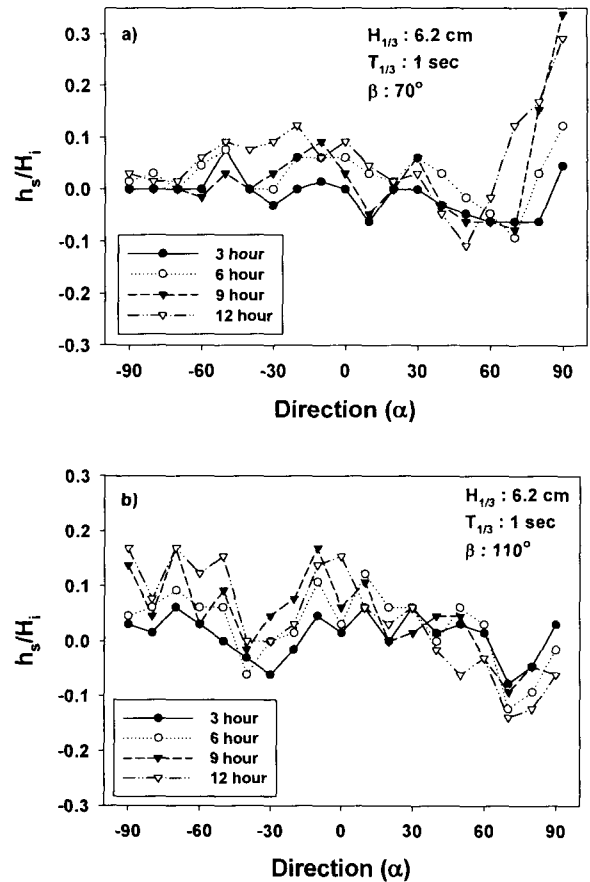


Fig. 9. Spatial distribution of scouring depth under the multi-directional irregular waves ($\beta=70^\circ, 110^\circ$).

로 배후면까지 회절 및 와류를 발달시키고 배후면의 저면을 교란하여 사면 및 기초부 세굴을 발달하게 한다.

제두부의 유속분포

저면의 세굴은 중복파의 영향과 구조물과의 상호작용으로 생성된 흐름에 지배적으로 발달되며, 피복석의 파괴 또한 사면상의 쇄파에 의한 강한 유속의 발달로 증대된다. 따라서 제두부 부근의 유속장과 기초부 저면의 변형을 함께 고려하여야 하며 배후면의 유속 또한 중요한 영향인자가 된다. Fig. 10은 제두부로 입사하는 파랑에 대한 지점별 평균유속의 분포이다. 유속의 분포는 입사하는 파향에 따라 전면의 중복파와 구조물을 연행하는 와류에 의해 유속이 발달하여 있는 것을 알 수가 있고, 회절파의 발달도 확인할 수 있다.

이 그림에서 a), b) 그리고 c)에서 평균류는 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)는 천단고가 낮은 경우이며, 사면상의 유속보다는 구조물을 우회하여 진행되는 현상이 나타나고 파고가

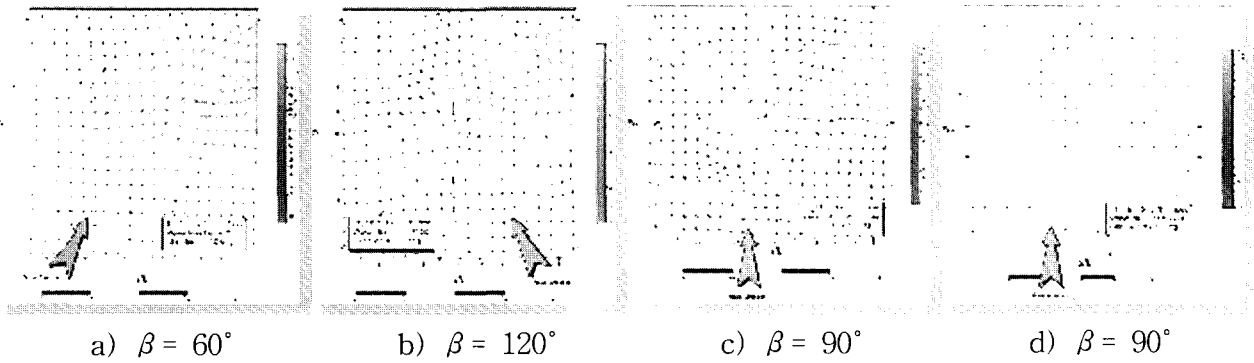


Fig. 10. Distribution of current field around the breakwater head.

증가되었으므로 앞의 a), b), c)와 비교할 때 전면의 유속장은 구조물의 파괴로 인해 감소하였고, 쇄파에 의한 배후면의 유속이 강하게 발달하는 것을 알 수가 있다.

요 약

본 연구에서는 입사파의 방향성효과에 의한 방파제 제두부의 파괴모드 중 파력에 의한 사면상의 피복석 (블럭)의 파괴와 기초부 세굴에 의한 파괴의 특성을 시·공간적으로 해석하였다. 본 연구의 각 단계별로 얻어진 중요한 결과를 정리하면 아래와 같다.

안정성에 미치는 외력인자로서 생각되는 surf similarity parameter $\xi_{1/3}$ 와 상대파고 $H_{1/3}/h_t$ 를 변화시켜 방파제 제두부에서 얻어진 파괴율 1% 이하의 초기파괴한계와 $N_{s1/3} - \xi_{1/3}$ 의 초기파괴한계로부터 직각 입사하는 경우가 피해를 많이 받는 전형적인 결과를 얻었다. 사면상의 쇄파는 제두부의 안정성에 가장 큰 영향을 주었으며, 쇄파는 유속장과 더불어 제두부 중앙부 사면상의 피복석을 파괴하는 주된 외력인자인 것으로 확인되었다. 제두부의 파괴율은 전면영역에서 중복파영역의 영향을 많이 받고, 배후면에서 파괴의 영향을 많이 받았다. 기초부 세굴에 의한 파괴는 장시간의 정상흐름에 의해 일어났다. 기초부 세굴은 파랑에 의해 발달된 전면의 정상파 영역의 수평류가 강한 절점 부근과 제두부에서 발생하는 정상와동류의 흐름이 강한 곳에서 발달하였다. 이는 입사방향에 따라 변하며, 정상와동류의 세굴이 구조물을 연행하여 일어나는 것을 세굴깊이의 시간적 변동특성으로부터 알 수 있었다.

감사의 글

수리실험에 협조해주신 부경대학교 해양공학과 해안·항만공학 연구실의 대학원생 및 학부생들에게 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

C.E.R.C. 1984. Shore Protection Manual, 7-202~7-260.
 Fredsøe, J. and B.M. Sumer. 1997. Scour at the round head of a rubble-mound breaker. ASCE, coastal Engineering Vol. 29, 231~262.
 Goda, Y. 1985. Random sea and design of marine structures. University of Tokyo Press, pp. 1~323.
 Matsumi, Y., E.P.D. Mansard and J. Rutledge. 1994. Influence of wave directionality on stability of breakwater heads. Coastal Engineering, ASCE, 1397~1411.
 Ryu, C.R. and B.K. Sohn. 1999. Stability criteria of rubble mound structures under the irregular sea conditions. In *Proceedings of the international conference coastal structures '99*, ASCE, pp. 223~230.
 Van der Meer, J.W. and J.J. Vedman. 1992. Singular points at berm breakwater: Scale effects, rear, round head longshore transport. Coastal Eng., 17, 153~171.
 柳青魯, 金憲泰, 孫炳奎, 李泰煥. 1999. 捨石護岸의 斷面的·平面的安定性と水理特性. 海岸工學論文集, 46, 886~889.
 柳青魯. 1984. 捨石防波堤의 水理學的最適設計에 關する 基礎的研究. 日本大阪大學博士學位論文, 165pp.

2001년 9월 8일 접수
 2001년 11월 30일 수리