

경사식방파제 제두부에 거치된 Tetrapod의 안정중량 및 피복범위에 관한 수리실험: 비쇄파 조건 Hydraulic Experiments on Stable Armor Weight and Covering Range of Round Head of Rubble-Mound Breakwater Armored with Tetrapods: Non-breaking conditions

김영택* · 이종인**
Young-Taek Kim* and Jong-In Lee**

요 지 : 본 연구에서는 상치콘크리트가 설치되어 있고, 주피복재로 테트라포드(Tetrapod)가 거치된 제두부 구간에 대하여 피복재 안정중량 재분석 및 피복중량의 할증 범위에 대해 검토하였다. 결과 분석을 위하여 3차원 수리실험을 수행하였다. 수리실험 결과에 의하면 항만 및 어항설계기준 · 해설(MOF, 2014), 미국의 CEM(USACE, 2005) 등에 제시된 제두부 구간에서의 피복재 할증 중량은 적절한 것으로 검토되었다. 테트라포드가 거치된 경사식구조물 제두부 구간 피복재의 할증중량 피복범위는 제두부 기준선을 중심으로 설계파고의 약 5배 범위를 항내측과 항외측에 피복하는 것이 적절한 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 경사식 구조물, 안정성, 제두부, 테트라포드, 3차원 수리실험

Abstract : The re-analysis on the stable weight of the concrete armor unit (CAU) at the roundhead and the suggestion of the covering range at the roundhead with the increased weight of CAU were conducted. Tetrapods were applied to the tests and the three dimensional hydraulic tests were performed. The test results for the stable weight at the roundhead area were similar to the guides from Korean Design Standard for Harbour and Fishery Port (MOF, 2014) and Coastal Engineering Manual (USACE, 2005). The investigation of covering range at the roundhead of rubble mound structures armoured with Tetrapods was suggested that the length of five times of the design wave height from the tip of the superstructure was needed and appropriate. Both sides of the superstructure should be covered with increasing weighted CAU to satisfy the stability at roundhead area.

Keywords : rubble mound structure, stability, round head, Tetrapod, three-dimensional hydraulic experiment

1. 서 론

항만의 운영 및 보호를 위하여 외해에서 입사파는 파랑을 1차적으로 막기 위한 방파제의 건설은 필수적이다. 방파제는 경사제, 직립제, 혼성제, 소파블록 피복재 등으로 구분할 수 있으며(MOF, 2014), 가장 많이 설계에 적용되고 건설되어 있는 형식은 경사제이다. 항만 및 어항설계기준 · 해설(MOF, 2014)에 제시된 경사제의 가장 기본적인 형상은 Fig. 1과 같다. 속채움 사석이 설치되고, 주피복재인 콘크리트블록과 속채움재 사이에 중간피복재가 거치되며, 상치콘크리트가 설치되어 있다. 파랑 작용에 대한 체제 보호를 위해서는 피복재의 안정중량 산정은 매우 중요한 설계단계중 하나이다. 피복재 안정중량 산정을 위하여 우리나라의 항만 및 어항설계기

준 · 해설(MOF, 2014)에는 Hudson식(Hudson, 1959) 및 van der Meer식(van der Meer, 1987)이 제시되어 있다. Hudson식과 van der Meer식과 같이 구조물에 직각으로 입사하는 조건에 대한 연구는 현재까지도 활발히 진행 중이다(Iribarren, 1965; Thompson and Shuttler, 1975; Broderick, 1983; USACE, 1984; Melby and Kobayashi, 1998; Van Gent et al., 2003; Vidal et al., 2006; Maria et al., 2017; van der Meer, 1988; De Jong, 1996; Suh and Kang, 2012 et al.).

본 연구에서는 경사제의 제두부 구간 안정중량 산정과 관련된 기존 연구의 재검토와 제두부 구간 피복재의 거치 범위에 대하여 검토하고자 한다. 제두부 구간에서의 안정중량 산정과 관련된 기존 연구자료는 국내외에서 항만구조물 설계에 활용되고 있는 설계기준서를 근거로 비교하고자 한다. 국내

*한국건설기술연구원 수자원 · 하천연구소(Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

**전남대학교 공학대학 해양토목공학과(Corresponding author: Jong-In Lee, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam 59626, Korea, Tel: +82-61-659-7321, Fax: +82-61-659-7329, jilee@chonnam.ac.kr)

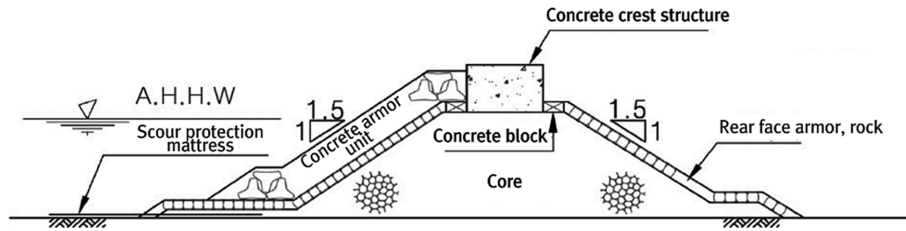


Fig. 1. Typical cross section of rubble mound type breakwater (MOF, 2014).

항만구조물 설계기준서인 항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2014)에서는 제두부 구간에 대하여 제간부에서 계산된 안정 중량의 1.5배 이상을 적용하도록 제시되어 있으나, 제두부 구간의 피복범위에 대해서는 제시된 내용이 없다.

BS Code(BS, 2000)에서는 경사재의 피복재 안정중량 산정을 위하여 Hudson식과 van der Meer식을 적용할 것을 제시하고 있으며, 제두부 구간의 안정중량 산정을 위해 피복석에 대한 K_d 값을 제시되어 있으나, 콘크리트블록에 대한 자료는 제시되어 있지 않다. BS Code에서는 다음과 같은 이유로 제두부 구간에 대하여 보강이 더 필요하다고 제시되어 있다. 일반적으로 방파제 제두부는 다른 구간에 비하여 상대적으로 수

심이 깊고, 다양한 방향에서 파랑이 내습하며, 항입구부의 다른 방파제에 의한 반사, 굴절, 회절로 인하여 파랑의 동요가 클 것으로 예상되고, 조류가 상대적으로 다른 구간에 더 크기 때문에 보강이 필요하다. 이와 같은 문제에 대응하기 위하여 제두부 피복재의 중량을 제간부에 비하여 할증하거나, 경사를 완만하게 적용할 것을 제시하였고, 두가지 방법의 조합 또는 피복층의 두께를 두껍게 하여 공극을 키우는 방법, 제체 상부 어깨폭을 확폭하는 방법을 제시하고 있다. 그리고 제두부의 피복범위는 방파제 제두부 구간의 전체 높이(설치 수심에서 상치콘크리트 등의 최상단까지 길이)의 1~2배 길이를 고려하도록 제시하였다(Fig. 2 참조).

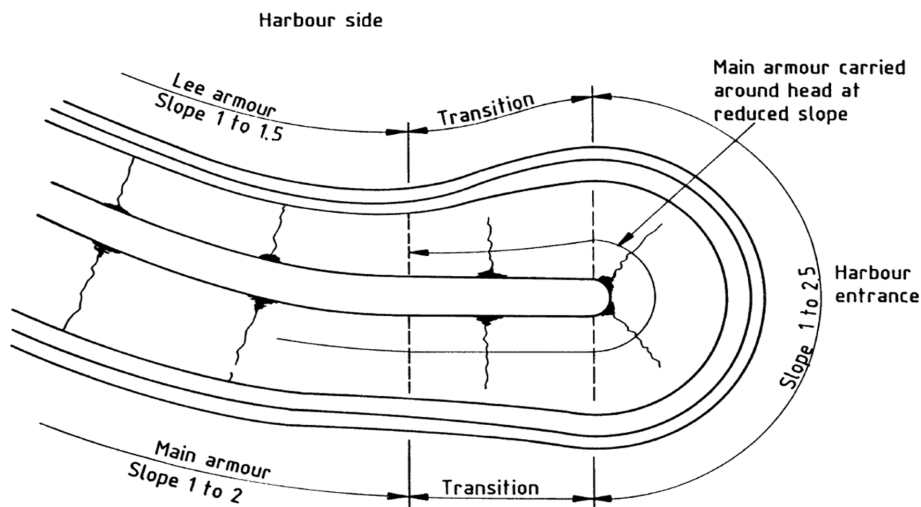


Fig. 2. Typical layout of breakwater roundhead (BS, 2000).

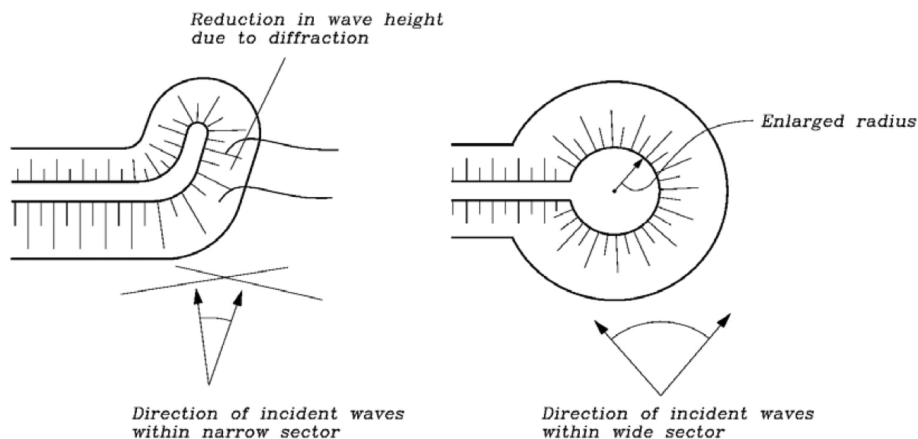


Fig. 3. Improvement of roundhead stability by change of geometry (USACE, 2005).

Shore Protection Manual(USACE, 1984)의 개정판인 Coastal Engineering Manual(USACE, 2005)에는 Hudson식을 근간으로 Tetrapod의 경우에 사면경사 1:1.5인 경사제에 대해 제간부 구간의 중량산정을 위해 쇄파와 비쇄파 조건에서 각각 $K_D = 7$ 과 $K_D = 8$ 을 제시하고 있으며, 제두부 구간에는 $K_D = 5$ 와 $K_D = 6$ 을 제시하였다. 또한 제두부 구간의 보강을 위해 제두부를 원형으로 구성하고 제두부 반경을 크게 하도록 제안하고 있으며, 추가적으로 제두부에 부가적인 방파제(tail breakwater)를 설치하면 취약구간의 피해를 저감할 수 있다고 제시되어 있다(Fig. 3 참조). 그러나 SPM(USACE, 1984)에 제시되어 있던 ‘제두부 구간의 피복범위는 제두부 기준선에서 15~45 m로 한다’와 같은 지침은 제시되어 있지 않다.

Rock Manual(CIRIA, 2007)에서는 제두부 구간을 제간부 구간과 동일한 안정성을 확보하기 위해서는 피복재의 중량 또는 비중을 키우도록 제시하고 있으며, 중량이 부족할 경우에는 경사를 완만하게 할 것을 제시하였다. 제두부 구간에 Tetrapod를 설치할 경우에 안정중량 산정을 위한 K_D 값은 CEM(USACE, 2005)과 동일하다. 단, 제두부 구간의 설계에서 가장 중요한 부분은 제두부의 반지름과 경사로 제시하였다. 블록간의 결속력(interlocking)으로 안정성을 유지하는 콘크리트 블록(Tetrapod, Dolos, Acropod 등)은 설계파고의 3배 길이를 제두부의 반지름으로 설계해야 하며, 자중으로 안정성을 유지하는 블록(피복석, cube 등)은 설계파고의 1.5~2배 길이의 제두부 반지름을 적용해야 하는 것으로 제시되어 있다. Fig. 4는 Rock Manual에 제시된 제두부 구간 설계 사례이다. 제간부의 경우에 10 m^3 (약 23 ton)의 Tetrapod가 1:1.33의 경사로

거치되며, 제두부의 경우에는 16 m^3 (약 36.8 ton)의 Tetrapod가 1:1.33의 경사로 거치되며, 제두부의 형상은 원형이다.

국내 설계기준인 항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2014)과 CEM(USACE, 2005)에는 제두부 구간의 피복재 할증조건은 제시되어 있으나, 제두부 구간의 적용범위에 대한 기준은 제시되어 있지 않다. 반면, BS Code(BS, 2000)과 Rock Manual(CIRIA, 2007)에는 제체높이와 원형 콘(cone)의 반지름 길이를 이용하여 제두부 범위를 제시하고 있다.

본 연구에서는 평면 수리모형실험을 통하여 제두부 구간의 피복재 할증비를 검토와 제두부 구간의 피복범위를 제시하고자 한다.

2. 수리모형실험

제두부 구간의 안정중량 산정과 관련된 연구를 수행하기 위하여 한국건설기술연구원의 수조에서 평면실험이 수행되었다. 실험에 적용된 평면수조 및 수조 단면형상은 Fig. 5에 제시되어 있다. 평면수조의 제원은 폭 36 m, 길이 42 m, 깊이 1.2 m이며, 폭 20 m의 일방향 불규칙파 조파기가 설치되어 있다. 수조벽면은 자갈을 이용한 경사면을 설치하여 구조물 및 수조 내에서의 반사를 최소화하였다. 평면수조 내에는 1/40의 경사면이 만들어져 있으며, 실험모형은 수평부와 경사면의 선단에 설치하였다.

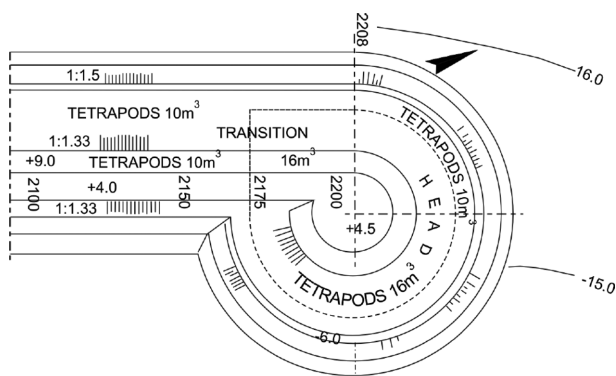


Fig. 4. Typical layout of breakwater roundhead with tetrapods (CIRIA, 2007).

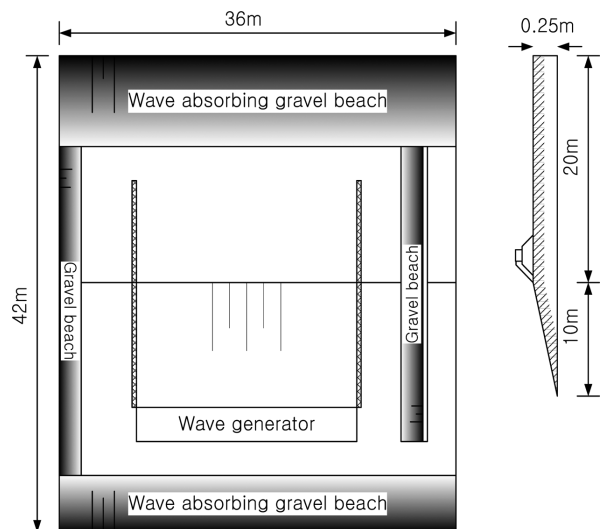
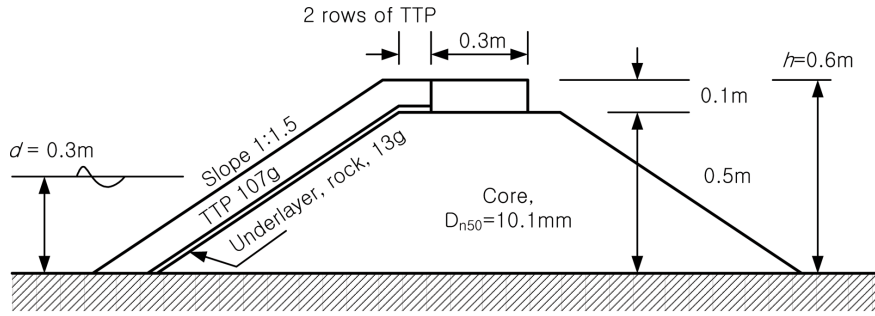


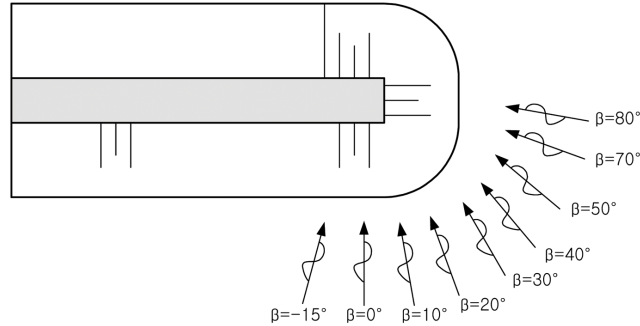
Fig. 5. Schematic sketch of wave basin and wave generator.

Table 1. Summary of test conditions

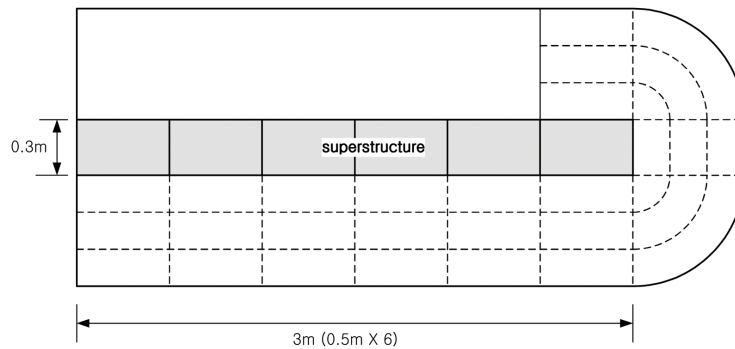
Parameters	Properties (unit)
Target incident wave height ($H_{s,i}$)	0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14 (m)
Target incident wave period ($T_{s,i}$)	1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5 (s)
Water depth at toe (d)	0.3 (m)
Width of superstructure (B)	0.3 (m)
Height of rubble mound structure from sea bottom to crest (h)	0.6 (m)
Incident wave angle (β)	-15, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 80 ($^\circ$, degree)
Weight of Tetrapod	107 g



(a) definition of cross section for rubble mound structure with Tetrapod



(b) incident wave direction for stability tests



(c) layout of Tetrapod for each test section

(d) photos for test model ($\beta=0^\circ$)**Fig. 6.** Model installation for stability tests.

실험파는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한 일방향 불규칙파를 사용하였다. 실험파 및 실험조건은 Table 1과 같다. Table 1에 제시된 실험파 조건은 구조물 선단(toe) 위치에서의 목표 실험파 조건이며, 구조물 설치전 구조물 위치에서의 입사파고를 계측하여 분석파고로 사용하였다. 실험에 적용된 단면형상 및 배치는 Fig. 6과 같다. 구조물의 제체높이(h)는 $h = 0.6$ m, 구조물 선단 위치에서의 수심, 즉 설치수심(d)은 $d = 0.3$ m, 주피복재인 테트라포드(Tetrapod)의 중량

은 107 g/EA, 제체 속채움 사석의 크기는 $D_{50} = 10.1$ mm이다. 입사각에 따른 안정성 검토를 위하여 모형을 회전시키며 실험을 수행하였으며, Fig. 6(b)와 같이 다양한 입사각(β)을 적용하였다. 피복재의 이탈확인을 위하여 Fig. 6(c, d)와 같이 0.5 m의 등간격 및 서로 다른 색으로 도색된 Tetrapod를 거치하였다. 상치콘크리트는 고중량으로 설치하여 피복재가 이탈하더라도 상치콘크리트의 활동피해가 발생하지 않도록 하였다.

실험은 유의주기 기준으로 1,000파를 연속조파 한 후, 피

복재의 이탈 등을 조사하여 분석하였다. 피복재 이탈이 발생한 경우에 동일 조건에 대하여 2회 반복실험을 수행하였으며, 피복재의 피해가 발생한 경우에는 원상태로 복구한 후 실험을 진행하였다.

3. 실험결과

3.1 결과분석 방법

피복재의 안정성 분석을 위하여 Hudson식을 적용하였다.

Table 2. Test results after wave attack for $\beta = 0^\circ$























$H_{s,l}$ (m)	$T_{s,l}$ (s)	
	1.5	1.75
0.06		
0.07		
0.08		
0.09		
0.1		
0.11		

Table 2. Continued

$H_{s,t}$ (m)	$T_{s,t}$ (s)	
	2.0	2.25
0.06		
0.07		
0.08		
0.09		
0.1		

Hudson식의 적용에 있어 본 연구에서는 피복재의 중량, 각종 설계된 계수 값을 알고 있는 상태에서 피해율 5%의 피해가 발생하는 파고를 계측하여 안정계수 K_D 를 산정하였다(식 1 참조).

$$W = \frac{\gamma H_D^3}{K_D (S_\gamma - 1)^3 \cot \alpha} \Rightarrow K_D = \frac{\gamma H_D^3}{W (S_\gamma - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

식 (1)에서 W 는 피복재 중량, γ 는 피복재 비중(t/m^3), S_γ 은 피복재의 해수에 대한 상대비중, K_D 는 안정계수, H_D 는 피해발생

파고이다. K_D 는 피해율 5%에 해당하는 피해 발생시 W 와 H_D 에 의하여 계산된 값이다. 피복석으로 거치된 경사재의 경우 피해율 5% 및 van der Meer식의 초기피해(initial damage)는 유사한 의미로 볼 수 있다. 즉, D_{n50} 의 폭을 갖는 경사면에서 피복재가 1~3개 이탈될 때의 피해를 의미한다(van der Meer, 1987; BS code, 2000). 본 실험에서는 제두부 구간을 4개 층 및 각각 2개의 곡선 및 1개의 직선구간으로 피복재의 색깔을 달리하여 거치하였으며, 각 구간별 피복재 거치 개수를 산정한 후 이탈 피복재의 피해율이 약 5%가 되는 조건을 피해로 간

주하여 피해발생 파고로 결정하였다. Table 1에 제시된 각각의 목표입사파 주기($T_{s,i}$)에 대한 목표 입사파고($H_{s,i}$)를 조파하여 상기 피해가 발생하는 조건에 대한 유의파고를 계측한 후, 이를 피해발생 파고(H_D)로 하여 안정계수 K_D 를 산정하였다.

3.2 제두부 구간 안정성 실험 분석

3.1절에서 언급한 바와 같이 H_D 는 초기피해(피해율 5%)가 발생하는 파고를 대상으로 하였다. Table 2는 $\beta=0^\circ$ 인 조건에 대한 실험결과를 각각의 입사파 주기 및 파고별로 도시한 것이다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 입사파고가 증가하고, 주기가 증가함에 따라 피복재의 이탈이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 초기 피해의 시작점은 Fig. 7과 같이 기존 연구에서도 언급된 입사각 기준($\alpha=0^\circ$)으로 $\alpha=+135^\circ$ 인 것을 확인할 수 있다(Jensen, 1984; USACE, 2005). 그리고 입사파고가 증가함에 따라 초기피해가 발생한 후 속채움재가 노출되는 피해가 발생하며, 피해발생 위치는 파랑진행 방향으로 확대되는 것을 알 수 있다.

Table 2에서 각각의 실험파 조건에 대한 H_D 는 목표주기 $T_{s,i}=1.5$ s에서 $H_D=9.39$ cm($H_{s,i}=9$ cm), $T_{s,i}=1.75$ s에서 $H_D=9.26$ cm($H_{s,i}=9$ cm), $T_{s,i}=2$ s에서 $H_D=9.24$ cm($H_{s,i}=9$ cm), $T_{s,i}=2.25$ s에서 $H_D=8.25$ cm($H_{s,i}=8$ cm), $T_{s,i}=2.5$ s에서 $H_D=8.26$ cm($H_{s,i}=8$ cm)이다. 이와 같이 계측된 H_D 를 식 (1)에 적용하여 K_D 를 계산하였다. 이와 동일한 방법으로 Table 1에 제시된 입사파향별로 안정성 실험을 실시하였으며, 이를 정리하면 Table 3과 같다. Table 3에서 평균 안정계수($K_{D,ave}$)는 제두부 구간에서 계산된 주기별 K_D 값의 평균이며, 할증비율은 제간부 안정계수($K_{D,trunk}$) 대비 평균 제두부 안정계수($K_{D,ave}$)의 비($=K_{D,trunk}/K_{D,ave}$)를 의미한다. 본 실험조건은 비쇄파 조건에 해당하므로 제간부 구간의 안정계수는 $K_{D,trunk}=8$ 이다. 입사각 및 주기별로 약간의 차이는 있으나 현재 항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2014)과 CEM (USACE, 2005) 등 국외기준에서 제시되어 있는 K_D 및 제간부 대비 제두부 피복재의 중량 할증비율은 타당한 것으로 분석되었다.

3.3 제두부 구간의 할증범위 산정

3.2절에서는 제두부 구간의 피복재 할증중량의 타당성을 검

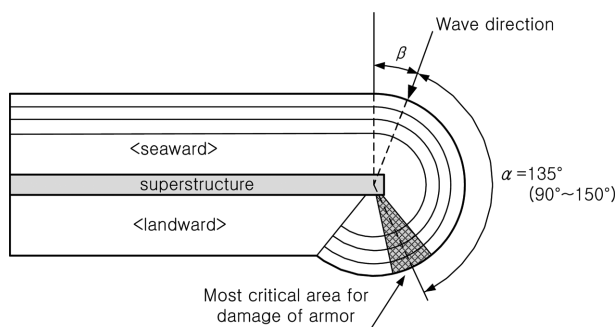


Fig. 7. Critical areas for damage to armor layers in the round head.

Table 3. Summary of test results

Incident wave angle (β , $^\circ$)	Averaged K_D ($K_{D,ave}$)	Weighting factor comparing trunk section ($K_{D,trunk}/K_{D,ave}$)
-15	5.8	1.4
0	5.5	1.5
10	5.9	1.4
20	5.5	1.5
30	5.4	1.5
40	5.0	1.6
50	5.0	1.6
55	5.5	1.5
65	5.4	1.5
70	5.6	1.4
80	5.7	1.4

토하고, 초기피해 발생 파고를 계측하여 안정계수를 산정하였다. 본 절에서는 속채움재가 노출되는 파괴가 발생한 파고 등을 분석하고, 이때 피해범위 등을 분석하여 제두부 구간의 피복재 할증범위에 대하여 제시하고자 한다. Fig. 7에 도시되어 있는 바와 같이, CEM(USACE, 2005)에서는 제두부 구간에서 $\beta=-45^\circ\sim 45^\circ$ 범위의 파랑이 입사할 때, 주요 피해 위치는 각각의 입사각에 대하여 $\alpha=+135^\circ$ 지점을 제시하였고, 피해 범위는 $\alpha=+(90^\circ\sim 150^\circ)$ 를 제시하였다. 국내 경사제 설계시 제두부의 형상은 대부분 제두부 상치콘크리트를 중심으로 반원형태로 설치하며, 제두부 상치콘크리트의 항외측 사면, 기준선 사면 및 항내측 사면에 할증된 중량의 피복재를 대칭으로 거치한다. 이에 따라 본 연구에서는 입사각이 $\beta=0\sim 40^\circ$ 조건에 대한 자료를 분석하여 제두부 구간의 피해범위를 분석하고자 한다.

제간부 및 제두부 구간에 거치된 Tetrapod의 중량은 모형상 107 g이며, Hudson식에 해당하는 제간부 구간의 대상파고는 모형상 10.1 cm이다. 제두부 구간의 피복재 할증범위는 제간부 구간의 대상파고가 내습할 경우에 발생하는 제두부 구간의 피해범위로 산정하였다.

Table 4에서 목표 유의파고 $H_{s,i}=9$ cm 내습시 초기피해 이상의 피복재 이탈이 발생한 것을 알 수 있으며, 초기피해 이상의 피해가 발생하였으나 발생위치는 Fig. 7에 제시된 위치와 유사함을 알 수 있다. 그러나 $H_{s,i}=10$ cm 내습시 입사파향별로 약간의 차이는 있으나 주피해 위치에서의 피복재 이탈과 속채움 사석의 노출을 확인할 수 있으며, 피복재의 이탈 범위는 항외측으로 확장되는 것을 볼 수 있다. 이는 Table 2의 $\beta=0^\circ$ 결과에서도 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Table 4의 결과를 이용하여 제간부 구간의 대상파 내습시에 제두부 구간에 거치된 Tetrapod의 파괴(failure) 범위를 도식적으로 나타낸 것이다. 직각입사 조건에 비하여 경사입사파 내습시에 피복재의 파괴범위가 넓어진 것을 알 수 있다. Table 4에서 알 수 있듯이 피복재의 파괴범위는 제두부 구간 기준선(제두부 끝)에서 항내측과 항외측으로 최대 약 50 cm(대상파고의 약 5배)로 나타났으며, 이는 입사파고의 약 5배 길이에 해당한다.

본 실험에 적용된 조건을 1/70의 축척을 적용하여 원형으로

Table 4. Failure at roundhead for each incident wave angle






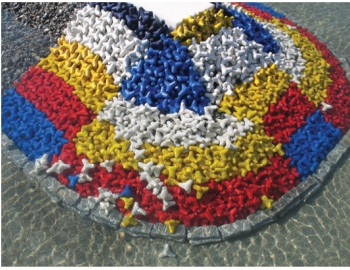












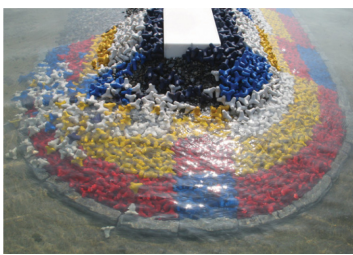

β	$H_{s,t}$	$T_{s,t}$ (s)	
		1.75	2.0
0°	9 cm		
	10 cm		
10°	9 cm		
	10 cm		
20°	9 cm		
	10 cm		

Table 4. Continued

β	$H_{s,t}$	$T_{s,t}$ (s)	
		1.75	2.0
30°	9 cm		
	10 cm		
40°	9 cm		
	10 cm		

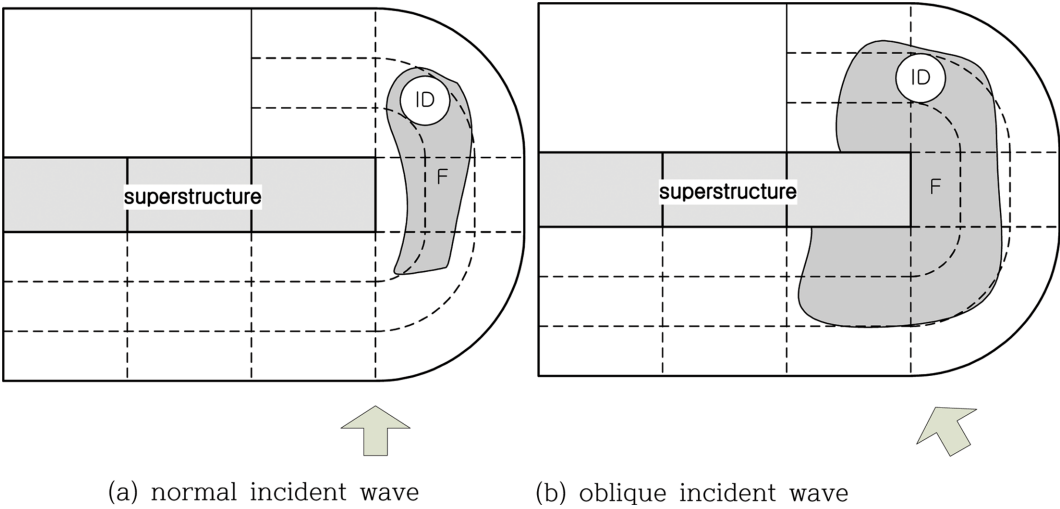


Fig. 8. Schematic sketch of area for initial damage (ID) and failure (F).

환산할 경우에 피복재는 중량은 40 ton급이며, 제간부 구간의 대상파고는 약 7 m에 해당한다. 제두부 구간의 피복재 할증범위에 대해 SPM(USACE, 1984)에서는 제두부 기준선에서 15~45 m로 제시하였고, BS Code(BS, 2000)에서는 제두부 제체높이의 1~2배, Rock Manual(CIRIA, 2007)의 경우에는 대상파고의 3배 길이를 원으로 설치할 것을 제안하였다. 본 실험에 적용된 조건으로 기존 기준서에 의한 제두부 피복재 할증범위를 계산해 보면, BS Code의 경우에 42~84 m, Rock Manual의 경우에 21 m 원형, SPM의 경우에 15~45 m이다. 본 연구에서는 월파를 거의 허용하지 않는 마루높이를 적용함에 따라 실제 설계에 적용되는 구조물 마루높이 보다 높게 설치되어 있어 BS Code를 통해 계산된 범위와는 부합되지 않는 것으로 판단된다. 본 연구결과에서는 제두부 구간의 피복재 할증범위로 대상파고의 5배(35 m)가 적절한 것으로 분석되었으며, 이는 SPM(1984)의 결과와 유사함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 제두부 구간에 거치되는 피복재의 안정중량 산정과 관련하여 평면 수리모형실험을 수행하였으며, 실험을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) Hudson식을 적용하여 제두부 구간에 거치되는 Tetrapod의 안정중량을 검토하였으며, 항만 및 어항설계기준·해설(MOF, 2014)과 CEM(USACE, 2005) 등의 결과와 유사한 경향이 나타났다.

(2) 제두부 구간의 초기피해 발생위치는 입사각을 기준($\alpha=0^\circ$)으로 $\alpha=+135^\circ$ 지점이며, 초기피해 발생파고를 초과하는 파고 내습시 피해범위는 확산되는 것을 알 수 있다.

(3) 제두부 구간 피복재의 할증범위는 제간부 구간 대상파고의 약 5배를 제두부 기준선으로부터 항내측과 항외측에 피복하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

본 연구결과는 국내 설계기준에 포함되어 있지 않은 내용으로서 연구성고가 향후 설계기준에 반영됨으로서 실무 활용 및 방파제 안정성 확보에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 연구비 지원(과제번호: 20110131)을 받아 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Allsop, N.W. (1983). Low-crest breakwaters, studies in random waves. *Proceedings of Coastal Structures '83*, ASCE. 99-107.
British Standard (2000). *Maritime Structures*.

Broderick, L.L. (1983). Riprap stability a progress report. In: *Proc. Specialty Conference on Design, Construction, Maintenance and Performance of Coastal Structures*, Arlington, VA. March 9-11, 1983. *Coastal Structures '83*, ASCE, 320-330.
CIRIA, CUR, CETMEF (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering* (2nd edition) C683, CIRIA, London.
De Jong, R.J. (1996). Wave transmission at low-crested structure, Stability of Tetrapod at front, crest and rear of a low-crested breakwater. Master thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
Hudson, R.V. (1959). Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters. *Journal of Waterways and Harbors Division*, ASCE, 85(WW3), 93-121.
Iribarren, R. (1965). Formule pour le calcul des diques en enrochements naturels on elements artificieles. In: *XXI Int. Navigation Congr. Sect. II-I*, Stockholm, Sweden, 15-46.
Jansen O.J. (1984). A Monograph on rubble mound breakwaters, Danish Hydraulic Institute.
Maria, P. Herrera, M. Esther Gomez-Martín and Josep R. Medina (2017). Hydraulic stability of rock armors in breaking wave conditions. *Coastal Engineering*, 127, 55-67.
Melby, J.A. and Kobayashi, N. (1998). Progression and variability of damage on rubble mound breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coast and Ocean Engineering*, ASCE, 124(6), 286-294.
Ministry of Oceans and Fisheries (2014). Design standards for harbour and fishery port.
Suh, K.-D. and Kang, J. (2012). Stability formula for Tetrapod. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 138(3), 261-266.
Thompson, D.M. and Shuttler, R.M. (1975). Riprap design for wind wave attack. A laboratory study in random waves. Report EX 707. Hydraulic Research, Wallingford.
USACE (1984). *Shore Protection Manual*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
USACE (2005). *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
van der Meer, J.W. (1987). Stability of breakwater armor layers design formulae. *Coastal Engineering*, 11, 219-239.
Van der Meer, J.W. (1988). Stability of cubes, tetrapod and accropode. In: *Design of Breakwaters*, Thomas Telford, London, 71-80.
Van Gent, M.R.A., Smale, A.J. and Kuiper, C. (2003). Stability of rock slopes with shallow foreshores. *Coastal Structures 2003*, Portland, 100-112.
Vidal, C., Medina, R. and Lomonaco, P. (2006). Wave height parameter for damage description of rubble-mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 53(9), 711-722.

Received 29 November, 2017

Revised 23 December, 2017

Accepted 26 December, 2017