

소파블록 Eco-TTP의 성능평가를 위한 수리모형실험 Hydraulic Experiment on the Performance of the Eco-TTP Armor Block

오상호¹, 오영민², 안창섭³, 박성훈⁴
Sang-Ho Oh¹, Young Min Oh², Chang Seob Ahn³ and Sung Hun Park⁴

1. 서 론

경사식 방파제의 피복재로는 과거에는 채석재를 주로 사용하였지만 최근에는 대부분 인공 콘크리트 소파블록을 사용하고 있다. 지금까지 국내·외에서 다양한 형태의 소파블록이 개발되었는데, 이 중에서 테트라포드(TTP)가 가장 널리 사용되고 있으며 우리나라에서도 시공실적이 가장 많다. 그러나 테트라포드보다 소파효과 및 사면안정성이 높은 소파블록을 개발하려는 노력이 지속적으로 이루어지고 있다.

이 연구에서는 최근에 개발된 소파블록의 일종인 Eco-TTP(Fig. 1)를 이용하여 축조된 방파제의 사면안정성 및 반사특성을 검토하기 위하여 수리모형실험을 수행하였다. 또한, 기존 테트라포드에 대해서도 수리모형실험을 일부 수행하여 소파블록의 성능을 서로 비교하였다. 한편, 본 연구와 유사한 선행연구로 홍준희 등(1999) 및 전인식 등(2000)이 OTP 소파블록의 성능 평가를 위한 수리모형실험을 수행한 바 있다.

2. 수리모형실험

2.1 실험수조 및 수로 구성

실험에는 한국해양연구원의 2차원 조파수조를 사용하였다. 이 조파수조는 길이 53.15 m, 높이 1.25 m, 폭 1.0 m의 크기이다. Eco-TTP의 성능평가를 효율적으로 수행하기 위하여 수조의 종방향으로 연직분할관을 설치하여 수조를 폭 0.4 m의 협수로와 폭 0.6 m의 광수로로 분리하고, 모형은 폭 0.6 m의 광수로에

설치하였다. 협수로 후면에는 테트라포드로 사면이 완만한 소파공을 설치하였다.

2.2 모형제작 및 설치

소파블록 Eco-TTP 모형의 제작된 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 이 신형 소파블록은 인공어초 및 소파블록 겸용으로 개발된 다기능 블록으로서, 서로 일정한 각도를 유지하면서 정사면체의 꼭지점을 향해 방사상으로 형성되는 4 개의 다리로 구성되며, 블록 중심에는 정사면체 형태의 빈 공간이 있다.

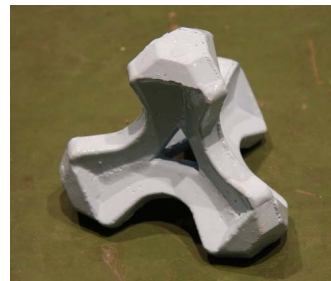


Fig. 1. Manufactured Eco-TTP model

Eco-TTP 모형은 실리콘 거푸집에 콘크리트를 타설하여 제작되었으며, 수조의 광수로 폭을 고려하여 현장 제원의 1/50 축척 모형을 제작하였다. 제작된 Eco-TTP는 표면 마찰을 줄이기 위하여 페인트로 칠하였다. 제작이 완료된 Eco-TTP 모형의 사진을 Fig. 1에 제시하였다. Eco-TTP 모형의 수중포화상태에서의 중량 평균값은 200 g이었으며, 이를 1/50축척의 현장 조건으로 환산하면 약 25 ton에 해당한다. 소파블록의 수중포화상태에서의 비중은 2.25로 계산되었다.

1 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 연수연구원
2 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부 책임연구원
3 한국중합기술 향만부 이사
4 (주)태성건설 어초사업부 과장

2.3 실험 단면

모형 실험단면이 놓이게 될 해저면은 콘크리트 불투과면으로 제작하였다. 실험 단면은 소단을 포함하는 경사식 방파제 단면으로서, Table 1에 보인 것처럼 네 가지로 변화시키면서 실험을 수행하였다. Table 1에서 S 는 실험단면 전면의 경사, N 은 사면 전체에 걸쳐 설치된 소파블록의 총 개수, n 은 공극률을 각각 나타낸다. Table 1에 보인 것처럼 Eco-TTP의 경우 1:1.5 경사에 대해서는 두 차례(S-1 및 S-2) 실험을 수행하였으며, 두 경우에 Eco-TTP의 총개수 및 공극률은 약간 달랐다. Eco-TTP 난적 거치의 의미는 피복층의 1층은 TTP정적파 유사한 방법으로 설치하고, 2층은 Eco-TTP의 다리 한 개가 아래로 향하게 하여 1층에 설치된 블록들 사이 공간 근처에서 자유낙하시켜 거치한 방식을 의미한다. Fig.2 및 Fig. 3에 수조 내에 설치된 S-2 실험단면의 모습을 제시하였다.

Table 1. Experimental conditions

ID	Type & Setup	S	N	n
S-1	Eco-TTP 2층난적	1:1.50	327	66.7%
S-2	Eco-TTP 2층난적	1:1.50	348	64.5%
S-3	Eco-TTP 2층난적	1:1.33	317	65.0%
S-4	TTP 2층정적	1:1.50	391	48.0%

일반적으로 특정 설계단면이 제시되지 않은 상태에서 수리모형실험에서는 모형방파제 마루에 상치구조물을 설치하지 않지만, Fig. 2에 보인 것처럼 본 연구에서는 Eco-TTP가 실제 현장에 시공되었을 때의 방파제 단면 형태의 예시를 보이기 위해서 방파제 마루에 임의의 상치구조물을 설치하고, 그 때의 마루높이는 최대 실험파 작용시 월파가 거의 발생하지 않는 높이로 설정하였다. 한편, 소파블록과 방파제 체 사이에는 현장 조건으로 약 2 ton 정도에 해당하는 중간피복 사석을 2층으로 피복하였고, 방파제 후면 항내측에는 별도의 소파공을 설치하지 않았다. 실험 수위는 방파제 소단 전면에서 48 cm로 하였다. 본 실험에서 소파블록이 현장의 1/50 축척으로 제작된 점을 고려하면 현장환산 수심은 24 m에 해당된다.

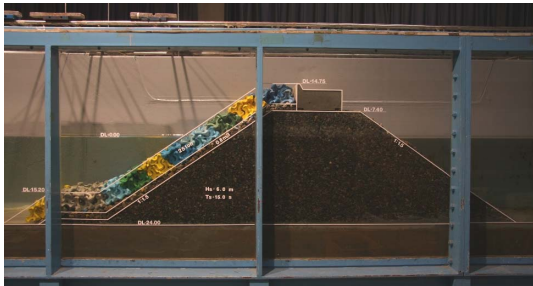


Fig. 2. Cross-sectional view of the S-2 setup



Fig. 3. Front view of the S-2 setup

2.4 실험파

실험파는 우리나라 연안해역의 파랑을 잘 대표한다고 평가되는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하여 작성하였다. Table 2에 보인 것처럼 현장 조건으로 주기 15 s 파에 대하여, 파고가 6 m에서 9 m까지 변화하도록 실험파를 결정하였다. 조파 시간은 실험실 조건으로 26분이었고, 조파 후 1분이 경과한 후부터 25분간의 자료를 분석에 이용하였다. 이 조파시간은 현장 조건으로는 3시간 정도에 해당된다.

Table 2. Experimental wave conditions

T_s (s)	H_s (m)						
15.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0

한편, 소파블록을 쌓은 후에 현장 조건으로 주기 15 s, 파고 3.5 m에 해당하는 파를 실험파 조파시간과 동일한 시간 동안 2회 반복 조파하여 사면에 설치된 피복재가 어느 정도 맞물릴 수 있도록 한 후에 Table 1에 보인 실험파를 차례로 조파하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 사면 변형

3.1.1 사면변형 분석 방법

경사식 방파제의 사면변형은 통상적으로 사면에 설치된 피복재가 파력에 의해 짜맞춤이 진행되는 과정에서 피복재 사이의 공극이 감소되면서 서서히 진행된다. 본 수리모형실험에서는 피복층의 미끄러짐을 정량적으로 평가하기 위하여 사면상에 걸쳐서 7개의 기준점을 설정하고, 실험파를 조파한 후에 피복층이 사면을 따라 미끄러져 내려간 누적 거리를 자료 측정하였다.

3.1.2 사면변형 분석 결과

Fig. 4에는 4가지 단면에 대한 미끄러짐 양을 서로 비교하였다. Fig. 4에서 수평축은 작용시킨 파의 파고 (H_s)를 나타내며, 연직축은 사면의 7개 기준점에서 측정된 소파블록 미끄러짐 양의 평균값(ΔL)을 소파블록의 특성길이(l_c)로 나누어 무차원화한 값을 나타낸다. 본 실험의 경우 Eco-TTP의 평균 중량은 200g, 비중은 2.25였으므로 특성길이는 $(200/2.25)^{1/3} \approx 4.5$ cm이며, 테트라포드의 평균 중량은 248g, 비중은 2.24였으므로 특성길이는 $(248/2.24)^{1/3} \approx 4.8$ cm이다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 파고가 증가할수록 사면의 미끄러짐 양은 증가하였다. 네 가지 실험단면 중에서 S-1단면의 사면 미끄러짐이 가장 크게 발생하였다. 특히 $H_s = 6.0$ m에서의 최초 미끄러짐 양이 매우 컸으며, 그 이후에도 지속적으로 미끄러짐이 발생하였다. S-2단면의 경우에는 S-1단면과 마찬가지로 Eco-TTP를 1:1.5 사면에 난적으로 피복한 경우인데, 이 때에는 S-1단면에 비해서 $H_s = 6.0$ m에서의 최초 미끄러짐 양이 작게 발생하였고 파고의 증가에 따라서 미끄러짐 양이 선형적으로 증가하는 비율은 거의 비슷하였다. 이것은 Table 1에 제시된 것처럼 S-2단면의 경우에 피복된 Eco-TTP의 개수가 더 많아서 공극률이 작기 때문에 파의 작용에 따라 블록이 짜맞춰지면서 발생하는 최초 미끄러짐 양이 작았던 것으로 판단된다.

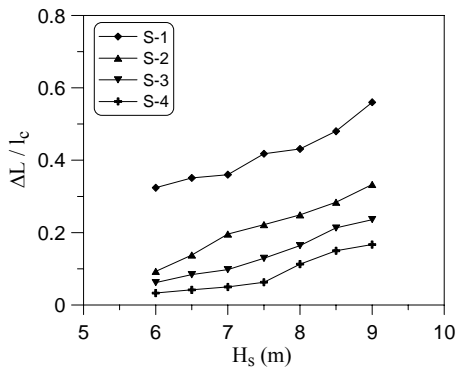


Fig. 4. Normalized sliding distance along the slope

S-3단면의 경우에는 사면의 경사가 1 : 1.33으로 더 급경사인 경우인데, 사면의 경사가 1 : 1.5인 S-1 및 S-2 단면에 비해서 최초 미끄러짐 양 및 이후에 발생한 미끄러짐 양이 더 적었다. 이것은 S-3단면의 경우 사면의 경사가 더 급하여 초기 설치시에 블록이 더 잘 짜맞춰지게 놓여짐으로써 미끄러짐양이 더 적었던 것으로 추정된다.

한편, 테트라포드를 정적으로 피복한 S-4단면의 경우에는 실험 단면 중에서 사면 미끄러짐양이 가장 적

었는데, 이것은 테트라포드의 공극률이 Eco-TTP에 비해서 작기 때문에 상대적으로 설치 직후의 짜맞춤이 더 잘 이루어졌기 때문인 것으로 보인다.

3.2 피해계수

3.2.1 피해계수 분석 방법

주어진 파고에 대하여 사면에서 안정한 피복재의 중량을 예측하기 위해서는 일반적으로 다음 Hudson 식을 사용한다.

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

여기서, W = 피복재의 소요 중량, γ_r = 피복재의 단위 중량, S_r = 피복재의 해수에 대한 비중, H = 파고, K_D = 피복재의 피해계수, α = 사면이 수평면과 이루는 각도이다. 식(1)에서 피해계수 K_D 란 주어진 파고에서 피복층의 피해율(damage level)이 5% 보다 작게 발생하는 피복재의 소요 중량에 상응하는 Hudson 식의 계수를 의미한다. 따라서 피복재의 피해계수 K_D 값이 클수록 주어진 파에 대하여 안정한 피복재의 중량은 작게 된다.

식(1)을 K_D 에 관한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$K_D = \frac{\gamma_r}{W (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (2)$$

피해율을 계산하기 위하여 Table 2에 제시된 실험 파를 파고가 작은 것부터 순서대로 작용시켰다. 해양수산부(2001)에 제시된 바와 같이 피해율을 평가할 때에는 피복재가 파 작용 종료 후에 특성길이 이상 완전히 이탈한 개수는 물론, 제자리에서 회전 및 Rocking이 심하게 발생한 피복재 및 원래 위치에서 이탈되었다가 다시 복원된 피복재의 개수를 모두 고려하였다. 특히, 피복재의 제자리 회전 및 Rocking 현상에 따른 피해를 평가하는 데 일반적으로 통용되는 정량적인 기준이 없기 때문에, 본 수리모형실험에서는 피복재가 제자리에서 순간적으로 180° 이상 회전하는 현상이 반복적으로 발생하는 경우에는 그 피복재의 파괴가 발생하였다고 간주하였다 (해양수산부, 2001). 또한, 원래 위치에서 이탈되었다가 복원된 피복재가 최종적으로 이탈된 경우 이를 피해로 중복 계산하지 않도록 유의하였다. 그리고 모든 경우에 사면의 양측면에서의 피해는 피해로 간주하지 않았다.

3.2.2 피해계수 분석 결과

본 실험에서는 해양수산부(2001)의 방법을 따라 피복재의 피해가 발생하기 시작하는 파고를 한계파고

로 간주하여 피해계수를 산정하였다. Table 3에는 파고별로 발생한 피복재의 누적 피해량을 제시하였다.

Table 3. Cumulated number of damaged Eco-TTP blocks

H_s	S-1	S-2	S-3	S-4
6.0 m	0	0	0	0
6.5 m	0	0	0	0
7.0 m	1	0	0	1
7.5 m	1	1	1	2
8.0 m	2	2	2	3
8.5 m	4	4	3	5
9.0 m	5	5	6	7

S-1단면의 경우 피해가 $H_s = 7.0$ m부터 발생하기 시작하였고, 식(2)에 $W = 25$ ton, $\gamma_r = 2.25$ ton/m³, $S_r = 2.25$, $\cot\alpha = 1.5$ 의 값을 대입하여 계산하면 $K_D = 10.5$ 의 값이 얻어진다. 한편, S-2단면의 경우에는 피해가 $H_s = 7.5$ m부터 발생하기 시작하였기 때문에 피해계수의 값은 $K_D = 13.0$ 이며, 이 두 값의 산술평균은 $K_D = 11.8$ 이 된다. S-2단면의 경우 Table 1에 제시된 것처럼 사면에 피복된 Eco-TTP의 개수가 21개 더 많아서 블록이 서로 더 촘촘하게 맞물리도록 쌓아졌기 때문에 S-1단면보다 더 큰 파인 $H_s = 7.5$ m부터 피해가 발생한 것으로 추정된다.

위에서 산정된 Eco-TTP의 피해계수의 값을 실해역에서 적용할 경우에는 다소 보수적으로 판단하는 것이 바람직하다. 왜냐하면, 예를 들어 S-1단면의 경우에는 $H_s = 6.5$ m에 대해서는 안정하였지만 $H_s = 7.0$ m에 대해서는 피해가 발생하였기 때문에 $6.5 \text{ m} < H_s \leq 7.0 \text{ m}$ 의 범위에서 피해가 발생하기 시작할 수 있으며, 그에 따라 피해계수가 더 작게 산정될 가능성이 있기 때문이다. 따라서 1 : 1.5 사면에 난적으로 피복된 신형 소파블록의 피해계수는 $K_D = 11.8$ 을 기본적으로 사용하되, 실제 현장에 적용할 때에는 이러한 점을 고려하여 피해계수 값을 약간 작게 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

한편, 테트라포드를 이용하여 사면을 피복한 S-4단면의 경우에는 $W = 31$ ton, $\gamma_r = 2.24$ ton/m³, $S_r = 2.24$ 의 값을 식(2)에 대입하면 $K_D = 8.7$ 의 값이 구해지며, 이 값은 해양수산부(2001)에 제시된 테트라포드의 피해계수 값과 같다.

3.3 반사율

Table 4에 제시된 것처럼 수리모형실험이 오직 하나의 주기($T_s = 15$ s)에 대해서만 이루어졌기 때문에 파고가 서로 다른 7개의 파 조건에 대하여 반사율(K_r)을 계산하고 그 평균값을 구하였다. Table 4에는 각 단면별로 반사율의 평균값을 나타내었다.

Eco-TTP를 난적으로 피복하였을 때의 반사율은 1:1.5 사면의 경우 0.33~0.35였고, 1:1.33 사면의 경우 0.37이었다. 한편, 테트라포드를 정적으로 피복한 S-4의 반사율은 0.40으로 가장 높았다.

Table 4. Values of reflection coefficient

	S-1	S-2	S-3	S-4
K_r	0.33	0.35	0.37	0.40

위 결과로부터 Eco-TTP로 경사식 방파제의 사면을 피복하게 되면 테트라포드를 사용하는 경우에 비해 반사율이 10~18% 저감되는 효과가 있음을 알 수 있다. 실제로 Eco-TTP로 피복된 사면에 파가 부딪칠 때에는 테트라포드에 비해 쇄파가 더 활발하게 일어나며 유체 내부에 기포가 많이 발생하는 것을 육안으로 관찰할 수 있었으며, 소파효과가 더 우수한 것으로 판단된다. 그러나 본 수리모형실험에서는 모형방파제 후면에는 중간피복석 및 피복블록을 거치지 않았기 때문에 Table 4에 제시한 반사율 값을 절대적인 값으로 평가해서는 안되며, 각 단면별 상대적인 비교 자료로 이해하는 것이 바람직하다.

4. 결 론

소파블록 Eco-TTP에 대한 수리모형실험 결과, Eco-TTP의 사면 미끄러짐 양은 테트라포드에 비해 다소 컸지만 블록 특성길이의 약 0.5배 이내의 범위였다. 소파블록의 안정 계산에 널리 쓰이는 Hudson 식에 따른 피해계수(K_D) 값은 약 11.8정도로 계산되어, 테트라포드보다 피해가 적게 발생할 것으로 예측된다. 또한, 반사율은 테트라포드에 비해 약 10%이상 낮아서 소파성능이 우수한 것으로 나타났다. 본 수리실험은 Eco-TTP블록이 경사식 방파제의 사면피복재로 쓰일 때의 기본 성능을 밝힌 것이며, 현장 적용시에는 구체적 설계단면에 대한 모형실험을 거쳐 소파블록의 성능을 최종 평가할 필요가 있다.

참고문헌

- 전인식, 홍근희, 박현주 (2000). 신 소파블록 OTP의 월파 특성에 대한 실험적 고찰, 대한토목학회논문집, 20(2-B), 261-267.
- 해양수산부 (2001). 경사식 방파제의 최적설계기술개발(I)
- 홍근희, 전인식 (1999). 신 소파블록 Octopus의 성능 평가 수리실험. 대한토목학회논문집, 19(II-3), 359-374.