

식생 활착 여부에 따른 식생 매트-망태형 호안재료의 수리학적 성능 평가

이찬주*, 김명환, 김성중, 김동구
한국건설기술연구원 수자원하천연구본부(하천실험센터)

Hydraulic Assessment of Mat-Gabion Type Rivetment According to Vegetation Establishment

Chanjoo Lee*, Myounghwan Kim, Sung-Jung Kim, Donggu Kim
Department of Hydro Science and Engineering Research (River Experiment Center),
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 최근 친수성, 경관, 생태계 보전 등의 목적으로 자연 녹화 기능을 가진 다양한 친환경 호안 제품이 활용되고 있다. 호안을 포함하여 하천공사에 적용되는 자재들은 설계홍수시의 유수력에 대한 안정성이 보장되어야 하므로 이를 고려한 실험 기반의 안정성 평가가 필수적이다. 식생 호안의 경우 녹화 효과 외에도 식생 활착으로 인해 호안 표면이 보호되고 뿌리 발달로 인한 토양의 응집력과 내침식력 강화 효과가 있어 최근 그 활용이 증가하고 있다. 하지만 무식생 조건에서의 홍수 발생을 감안하면 무식생 조건에서의 허용 소류력 역시 중요하게 취급되어야 한다. 본 연구는 식생 매트형 돌망태 호안 재료를 대상으로 ASTM에서 제시된 시험법을 기반으로 동일한 시험체에 대해 식생 활착 여부에 따른 수리학적 안정성을 평가하였다. 실험 결과 시험체는 무식생, 식생 조건 모두 3회의 실험 유량 범위에 안정성을 보여주었으며, 토양 손실 역시 기준값 이하로 측정되었다. 식생 조건 실험의 경우 무식생보다 최대 1.4배의 소류력을 적용한 조건에서도 안정성을 유지하였다. 식생 시험체는 무식생에 비해 동일 유량에서 토양 유실이 적고 변형도 거의 발생하지 않았다. 본 연구의 결과는 식생 호안의 경우 그 효과를 극대화하기 위해서는 식생의 안정적인 활착을 고려하여 적절한 시공 시기가 중요함을 시사한다.

Abstract Various eco-friendly revetment products with natural greening functions have recently been used for amenity, landscape, and ecosystem preservation. Materials applied to river construction are required to ensure stability against design floods, so stability evaluations based on experiments are essential. The use of vegetation revetment is increasing because, in addition to the greening effect, the bank surface is protected by the vegetation establishment and the cohesiveness and erosion resistance of the soil due to root development. On the other hand, the allowable shear stress in non-vegetated conditions should also be considered important, considering floods before vegetation establishment. In this study, the hydraulic stability of the vegetation mat-type gabion revetment material was evaluated based on the ASTM test method. The specimen showed stability in the three experimental discharge conditions in both non-vegetated and vegetated conditions, and soil loss was below the reference value. Under vegetated conditions, stability was maintained even when an up to 1.4-fold flow discharge was applied. Soil loss and deformation were less than in the non-vegetated cases. These results suggest that considering the vegetation establishment, proper construction time is important to maximize the effect of vegetation revetment.

Keywords : Real-Scale Experiment, Mat-Gabion Type Revetment, Vegetation Condition, Hydraulic Stability, Tractive Force

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업의 연구비 지원(2023-0171)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Chanjoo Lee(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: c0gnitum@kict.re.kr

Received April 14, 2023

Revised May 31, 2023

Accepted June 2, 2023

Published June 30, 2023

1. 서론

호안은 제방 사면이나 하안을 유수에 의한 침식으로부터 직접 보호하기 위해 설치하는 하천 시설물로 홍수로부터의 수리 안정성이 확보되어야 한다. 근래에 들어서는 친수성, 경관, 생태계 보전, 탄소 저감 등을 추구함에 따라 종래의 콘크리트 블록 위주의 시공이 자연 녹화 등의 기능을 가진 다양한 친환경 호안블록의 시공으로 변화하고 있다. 이러한 상황은 호안블록에 관한 수리적 연구와 안정성 검토의 필요성을 증가시키고 있다[1].

호안공법과 관련한 지침으로 국토교통부에서 제시한 하천공사시설계실무요령[2]은 하도 상황에 따른 적절한 공법들을 제시하고 있으며, 공법 적용에 따른 수리학적 인자(허용유속 및 소류력)의 적정 범위 등을 제시하고 있다. 개별 기관이나 업체가 개발한 호안제품이나 공법의 적정성을 평가하기 위해서는 유속, 소류력 등이 반영된 수리 안정성 검토가 필요하다. 실무적으로 활용 가능한 표준 실험 방법은 아직 마련되어 있지 않지만 미국표준 재료시험법(ASTM)을 준용하여 실규모 실험 하천 시설을 통해 호안공법에 대한 실험이 활성화 되고 있다[3].

여러 가지 호안제품 중 식생 기반의 제품의 경우 자연적인 식생의 활착을 유도하여 이를 통해 친환경성과 동시에 호안의 안정성을 높이려는 목적으로 많이 활용되고 있다. 호안에 조성된 식생은 토양의 전단 강도를 증가시키고 높은 유속의 흐름을 굴절시킴으로써 호안의 안정성을 높이는 효과를 가진다[4]. 이와 관련하여 이두한 등[5]은 식생 매트 제품에 대해 실규모 실험을 통해 무식생 조건과 ASTM을 준용한 식생 활착 조건에서의 시험 기법을 제안한 바 있으며, 한국건설기술연구원[6]에서는 식생 매트형 호안 제품의 실험을 수행한 바 있다.

하천에서 사용 중인 동일한 식생 호안 재료를 이용하여 무식생과 식생 조건에서의 실험을 수행한 사례는 거의 없는 실정이다. 외국에서는 McCulah와 Howard[7]가 천연섬유 매트에 대한 사면 토양 유실 실험을 수행했는데, 유식생 조건에서 81%의 토양 유실 감소 효과를 확인하였지만 이는 유수에 의한 침식에 의한 것으로 하천의 유수력에 의한 유실과는 다르다. 한편, 김성중과 김명환[8]은 생분해성 호안 재료를 이용하여 식생 여부에 따른 특성을 비교하였는데, 무식생 조건의 시험체가 낮은 초기 공급유량에서 파손이 발생하면서 높은 소류력 범위에서의 비교는 충분하지 않았다. 하지만 식생 호안 제품에서 식생 활착의 여부는 홍수시 급류에 의한 침식에 대한 저항성을 좌우한다는 점에서 여러 시험체에 대한 실험

결과가 누적되는 것이 실무적으로 중요하다.

철선 망태형 제품의 경우 국내에서 호안재료로 널리 쓰이고 있다. 이들 대부분은 자갈을 채움재로 이용하고 있으나 식생 활착을 위해 표층에 현장토를 채운 제품의 경우 토양 유실에 의해 호안재료 기능성에 영향을 미치므로 이에 대한 평가가 필요하다.

본 연구에서는 식생 매트리스형 돌망태 호안 재료를 이용하여 동일한 시험체를 제작하고 무식생과 식생 활착 상태에서의 수리 안정성을 비교하기 위해 실규모 수리 검토 실험을 수행하였다. 이를 통해 식생 활착에 의한 호안 재료의 수리적 안정성 향상 효과를 평가하고자 하였다.

2. 식생 매트리스 돌망태

식생 매트-망태형 호안재료는 철선으로 꼬아서 제작한 육각형 매트리스 개비온 틀 속에 현장의 토석을 채움재로 사용하므로 자연을 훼손하지 않고 자재수급이 용이하며 공사비가 절감되는 공법이다. 채움재인 토석이 기반층을 제공하며 그 상부에 토사층이 있어 식생 뿌리를 활착시키는데 사용된다. 그 위에는 필터매트(부직포)가 있어 토사층을 보호한다. 그 위를 덮고 있는 식생매트에는 종자가 포함되어 있으며, 이에 따라 발아 후 녹화 식물은 부직포 층을 거쳐 토사층으로 침투하게 되고 그곳에서 뿌리 활착이 활성화되어 식생 매트를 보호한다. 이렇게 하여 식생 매트리스의 주요 채움재인 하부의 토사층의 유실과 침하를 방지하도록 설계되어 있다(Fig. 1)[9].

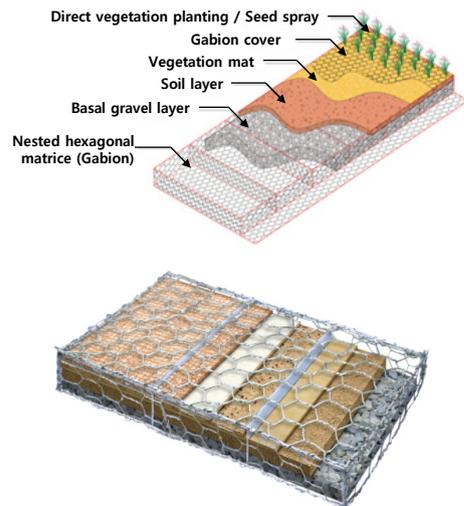


Fig. 1. Mat-Gabion Type Rivetment [9]

이렇게 제작된 식생 매트리스형 돌망태 제품은 하천의 제방에서 유수의 직접적인 접촉이 발생하는 앞쪽 비탈에 설치되어 제방 법면을 보호하는 기능을 한다. 필요에 따라서 호안은 저수부 수면 이하의 고도까지 설치될 수 있으며, 가장 하부에서는 수평으로 설치되어 위쪽에 설치된 호안을 지탱하는 역할을 하게 되어 있다(Fig. 2)[9].

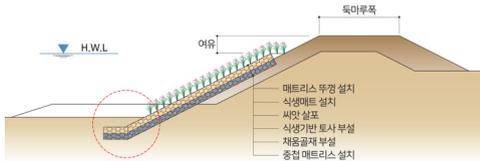


Fig. 2. Cross-section profile of the Mat-Gabion Type Rivetment [9]

3. 실험 및 분석 방법

3.1 실험 장소 및 시험체 설치

본 연구의 실험은 경북 안동시에 소재한 한국건설기술연구원 하천실험센터의 실험용 수로인 A1 수로에서 수행하였다(Fig. 3). 이 수로는 사면경사 1/2인 사다리꼴 형상을 갖고 있으며, 바닥폭 3 m, 마루폭 11 m, 깊이는 2 m이다. 수로 경사는 1/70 이며, 최대 10 m³/s 의 유량 공급이 가능하다. 실험 구간은 I 구간 하류의 직선 구간이다(Fig. 3).

식생 매트-망태형 시험체의 제작 및 설치 과정은 Fig. 4와 같다. 먼저 실험용 트레이(길이 10 m, 폭 1.4 m, 깊이 0.2 m)에 시험체를 현장 제작한다. 먼저 바닥에 육각 철망을 설치하며, 그 위에 골재를 넣고 부직포를 깔고 복토하여 채움을 마감한다. 여기에 식생 종자를 포함하는 식생 매트로 덮은 후 상부 육각 철망을 조립하면 시험체가 완성된다(Fig. 4(a)~4(f)). 시험체는 트레이의 깊이 제한(0.2 m)으로 인해 실제 제품과 달리 실험장에서 별도로 제작, 가공한다.

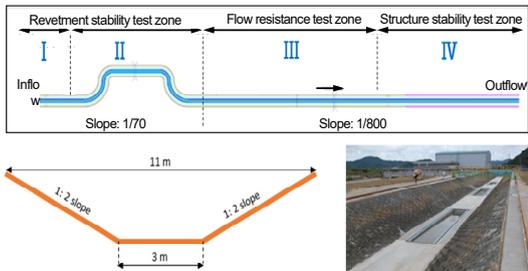


Fig. 3. The experimental channel

본 연구에서는 시공시 하천제방 사면을 대상으로 하는 것과는 달리 수로 바닥에 설치하여 실험을 수행한다. 이는 사면 설치시 제품에 작용하는 소류력이 위치별로 달라서 제품의 성능을 정확히 분석할 수 없기 때문이다[8]. 제작된 시험체는 야적장으로부터 크레인으로 옮겨서 급경사 수로의 실험용 공간에 설치한다. Fig. 4는 무식생 시험체에 대한 것이지만 유식생 시험체도 동일한 과정으로 제작하며, 다만 매트에 포함된 종자가 발아하고 성장하여 식생으로 무성해지도록 관수, 양분 공급 등 관리한 것이다.



Fig. 4. Installation of the vegetation matrix rip-rap (a) base mesh layer, (b) base gravel filling, (c) Soil filling, (d) vegetation mat covering, (e) finished product, (f) installation

3.2 ASTM D6460 시험 방법

국내에는 현재까지 블록이나 돌망태 유형의 호안제품에 대해 유수의 침식저항을 평가하는 방법이 정립되어 있지 않다. 따라서 실험 제품과 유사한 미국의 롤형 침식방지 매트 제품류의 시험법인 ASTM D6460[10]의 방법을 준용하여 실험을 수행하였다. 시험체의 크기와 제작 비용을 고려하여 모든 유량 조건마다 시험체를 바꾸지 않고 심각한 변형이 생기기 전까지는 유량을 증가시키면서 동일한 시험체로 반복적으로 실험을 수행한다. 실험

과정은 아래와 같다.

- ① 레이저 레벨을 이용하여 실험 전 제품의 현 상태를 기록하는 지형 측량을 실시한다.
- ② 5분간 0.2 m³/s 유량으로 예비방류를 진행하고 곧이어 실험방류를 진행한다.
- ③ 방류되는 동안 제품의 파손에 의한 흐름변화 여부를 관찰하고 주요 측선에서 유속과 수심을 측정한다.
- ④ 방류가 끝난 이후 눈에 보이는 파손 여부를 확인하고, 실험 후 제품의 변형 상태를 평가하기 위해 레이저 레벨을 이용하여 지형 측량을 실시한다.
- ⑤ 시험체의 변형 정도가 적을 경우 유량을 증가시키고 ①~④의 과정을 반복한다.
- ⑥ 실험을 모두 마친 후 유량, 유속, 수심 등을 이용하여 평균유속 및 소류력을 계산하고, 지형 측량 결과를 분석하여 시제품의 토양 유실, 손상 등을 평가하여 한계 소류력을 계산한다.

3.3 실험 조건

본 연구에서 식생 매트리스 돌망태 제품에 대한 실험 조건은 Table 1과 같다. 각각의 조건에 따라 3가지 유량 조건을 선정하였다. 흐름의 안정화를 위해 안정화 유량을 5분간 시험체를 통과시키며 이후 ASTM D6460 방법 [10]을 준용하여 무식생 조건에서는 30분간, 식생 조건에서는 1시간 동안 목표유량을 지속적으로 공급하면서 수리량을 계속하고 유황 및 시제품 상태를 관찰하였다. 무식생 조건 실험의 유량은 1.42~4.11 m³/s이고, 유식생 조건의 경우 공급유량은 2.0~4.97 m³/s이다. 유식생 실험의 경우 보다 높은 침식 저항성이 예상되므로 무식생 실험과 비교하여 케이스별로 약간씩 더 큰 유량을 공급하였다.

Table 1. Summary of the experiments

Case	Date of experiment	Water supply duration (min)	Discharge (m ³ /s)	Depth (m)	
Without vegetation	N01	2021-10-26	30	1.42	0.160
	N02	2021-10-27	30	2.99	0.250
	N03	2021-10-28	30	4.11	0.300
With vegetation	V01	2022-07-12	60	2.00	0.234
	V02	2022-07-13	60	3.72	0.311
	V03	2022-07-14	60	4.97	0.341

3.4 수리량 측정

유량을 공급하는 동안 시험체 직상류의 접근부(X-1)

및 직하류(X11) 등 2개 지점과 시험체 구간 상하류 5개 지점(X1~9) 등 중방향 7개 지점에서 수심과 유속을 측정하였다(Fig. 5). 수심은 대차에 부착되어 있는 포인트 게이지로 하상과 수면고를 측정한 후 둘의 차이로 계산한다. 유속은 최대 8 m³/s까지 측정 가능한 1차원 전자기 유속계(Kenek LPT-500-25F, 로거 LP1100R8)를 이용하여 수면에서 0.6d 위치에서 10초 이상 평균하여 측정하였다(Fig. 6).

유식생 실험의 경우 실험시간 동안의 흐름이 일정하게 유지되는지 확인하기 위해 시험체 설치 위치로부터 약 5 m 상류에서 압력식 수위계(OTT, Orpheus Mini)와 전자파유속계(뮤트로닉스, MU2720)를 이용하여 수심과 표면유속을 연속 측정하였다. 측정 간격은 수심은 1분이고, 유속은 1초이다.

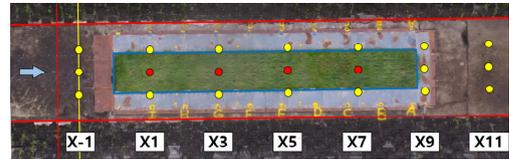


Fig. 5. Measuring locations for water depth and velocity (red dots are only for velocity measurement)



Fig. 6. A picture of hydraulic measurements

3.5 소류력 계산

호안의 수리안정성 평가에 필요한 기본적인 수리량은 유량(Q), 평균유속(V), 수심(y), 에너지경사(S_f), 조도계수(n), 소류력(τ) 등으로 이는 Fig. 7과 같다. 수심은 수위와 표면고의 차이로 정의되며 Eq. (1)을 이용하여 수로 경사 θ 로 보정한다.

$$y_i = (h_i - z_i) \cos \theta \quad (1)$$

여기서, y_i 는 i 지점의 수심, h_i 는 i 지점의 수위, z_i 는 i 지점의 하상고, θ 는 수로의 경사이다.

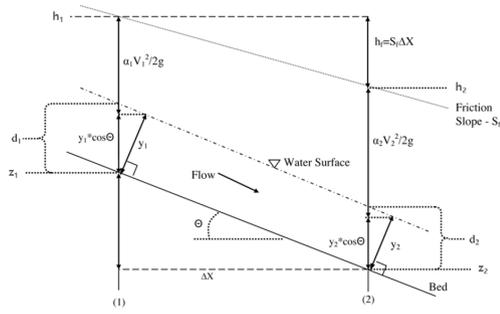


Fig. 7. Variable definition of tractive force calculation [10]

수위는 표준 측차법(Standard Step Method)에 의해 상류단 또는 하류단의 수위를 이용하여 Eq. (2)에 의해 하류 또는 상류의 수위를 계산한다. 상류(subcritical)인 경우에는 하류기점에서 상류로 수위를 계산하고 사류(supercritical)인 경우에는 상류 기점에서 하류 방향으로 계산을 수행한다.

$$h_2 = h_1 + \frac{1}{2g}(v_1 + v_2)(v_1 - v_2) - \frac{L}{2}(S_{f1} + S_{f2}) \quad (2)$$

여기서 h_1, h_2 은 각각 상류 및 하류 지점에서의 수위이며, v_1, v_2 은 각각 상류 및 하류 지점에서의 유속, L 은 1번 측정 및 2번 측정 사이의 경사면 거리, S_{f1}, S_{f2} 는 각각 상류 및 하류 지점에서의 에너지경사이다.

총수두(EGL, Energy Grade Line elevation)는 각 측정점에서 Eq. (3)으로 계산한다. 에너지 경사 계산에서는 시험 구간의 경사를 대표하는 자료에 대해서 분석하여야 한다.

$$EGL_i = z_i + y_i \cos \theta + \frac{V_i^2}{2g} \quad (3)$$

하상에서의 소류력은 Eq. (4)와 같이 계산한다. γ 는 물의 단위 중량으로 9,810 N/m³이며, 수심 y 는 하상에서 연직 방향의 수심이다. 에너지경사 S_f 를 계산하기 위해서는 2개 이상 측정점에서의 자료와 대표 수심이 필요한데 에너지경사 S_f 는 일반적으로 측정 자료의 선형회귀분석을 통해서 결정되며, 대표 수심은 측정 수심을 평균하여 사용하였다.

$$\tau_0 = \gamma y S_f \quad (4)$$

직사각 단면의 수로에서 시험체를 설치한 바닥면의 조도에 비해 측벽의 조도는 매우 낮으므로 벽면 전단응력을 무시할 수 있으며, 이러한 조건에서 시험구간의 바닥 소류력은 아래의 Eq. (5)로 계산할 수 있다[10].

$$\tau_0 = \frac{\gamma}{2}(y_1 + y_2) \sin \theta + \frac{1}{L} \left[\frac{\gamma}{2}(y_1^2 - y_2^2) \cos \theta - \rho g^2 \left(\frac{1}{y_2} - \frac{1}{y_1} \right) \right] \quad (5)$$

3.6 토양유실량 및 변화량 산정

본 실험에서는 공급된 유량에 의해 실험 전/후 변화되는 시험체의 토양유실량을 산정하기 위해 레이저레벨(SOKKIA LP410)과 검출기(LR200)를 이용한 수준 측량을 수행하였다. 이 때 매회 시험체 주변 콘크리트 바닥의 기준점 측량을 동시에 수행하여 기준고도를 유지하고 시험체만의 하상 변동을 측정하였다. 수준 측량은 돌망태의 육각 철선 매트릭스 부분을 피하여 총 288개 지점에서 수행하였다. 이는 시제품의 표면적(13.16 m²)을 고려할 때, 1 m² 당 약 22개이며, 측정 사이의 평균 간격은 약 21.7 cm이다.

측량된 자료를 이용하여 Surfer 23에서 Kriging 기법으로 공간적 내삽을 실시하여 하상고 분포도를 작성하였다. 그리고 체적 계산 기능을 활용하여 실험 전후 하상고 변화를 비교함으로써 각 케이스의 유량 공급에 따른 토양유실량을 산정하였다.

3.7 유식생 시험체 준비

유식생 조건의 실험을 위해 2021년 9월부터 별도의 트레이를 준비하여 무식생 시험체와 동일하게 시험체를 제작하였다. 유식생 시험체는 2021년 10월에 양잔디 종자를 살포하였으며, 동절기 관리 후 생육을 위해 2022년 봄부터 일 3회, 회당 1시간씩 스프링클러로 관수하였다. 식생 성장과 뿌리 발달 촉진을 위해 2~3회 정도 시비를 하고 영양제를 공급하였다. 이렇게 9개월간 생육 후 대략 키가 20 cm가 넘는 상태에서 2022년 7월에 실험을 수행하였다.

실험 종료 후 시험체에서 가로세로 약 20 cm 크기로 잎과 줄기 그리고 뿌리를 포함하여 3개의 시험체 표본을 채취하였다(Fig. 8). 표본은 습윤 토양을 포함한 총중량을 측정하였다. 이후 수작업으로 토양을 제거한 후 생중량을 측정하였으며, 마지막으로 시료를 신문지에 포장하여 건조기에서 105 °C로 24시간 건조 후 건조중량을 측정하였다. 채취한 시료의 총중량은 11.55~14.1 kg이며, 생중량은 199.9~324.8 g으로 식생은 총중량의 1.5~2.4%를 차지하였다. 건조중량은 47.2~62.1 g으로 생중량의 17.8~25.2%였다.



Fig. 8. Vegetation and soil condition

4. 결과 및 고찰

4.1 유속 특성

호안공법의 안정성을 평가하는데 있어 유속은 매우 중요한 수리학적 요소이다. 유속은 방류량을 증가시키에 따라 비례하여 증가하였다. Fig. 9는 5초 내외의 수표면 평균유속을 나타낸 것으로 실험 시간에 따른 유속 변화를 보여준다. 이는 유식생 실험에서만 측정된 것이지만, 하천실험센터의 유량 공급 현황을 고려할 때 무식생 실험에서도 유사할 것으로 판단된다. V01 케이스에서는 초기 10분간 결측이 발생하였다. 처음 5분은 안정화 유량을 공급하는 시간이며, 실제 유량은 시작 후 10~70분 기간에 방류되었다. 그러나 실제 유량이 공급된 이후에도 최대 유속에 도달할 때까지는 약 5분 내지 12분(V01 케이스) 정도의 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 안정된 유속에 도달 이후에 유량 조건별 평균 유속은 3.05~4.57 %로 나타났다. 각 케이스별로 유속의 최소-최대 편차는 -3.31~2.69%로 나타나 실험 유량 공급 중에는 비교적 일정하게 유속이 유지되고 있음을 알 수 있다(V03 케이스의 파동 제외).

시험체의 B-1 단면을 기준으로 유속은 무식생 조건에서는 1.40~4.11 m³/s의 유량에서 2.67~3.81 %로 나타났으며, 유식생 조건에서는 유량 2.00~4.97 m³/s에서 3.02~3.93 %로 측정되었다(Fig. 10). 이는 시험체로 인한 교란이 없는 접근부 수표면 유속(3.0~4.6 m³/s)에 낮은 값이다. 무식생 조건에 비해 유식생 조건에서는 유량에 비해 유속이 약간 낮았는데, 이는 식생에 의한 흐름 저항 증가로 수심이 증가한데 따른 것으로 판단된다. 무식생 및 유식생 실험 모두에서 3차 케이스에서 가장 큰 유속이 발생하였으나 외견상 시험체의 변화가 발생하지 않았다.

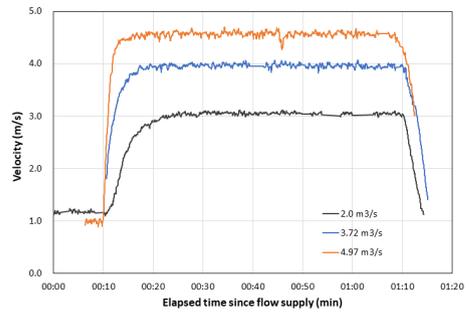


Fig. 9. Approaching velocity during the experiments (with vegetation case)

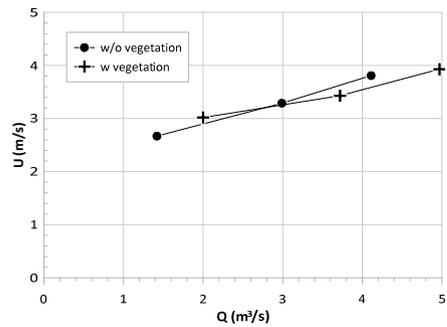


Fig. 10. Relationship between average velocity and discharge

4.2 소류력

측정된 수심과 에너지 경사를 이용하여 계산된 소류력은 무식생 실험에서는 1.40~4.11 m³/s의 유량에서 20.1~49.6 N/m²이었으며, 유식생 실험에서는 유량 2.00~4.97 m³/s에서 24.1~70.2 N/m²로 나타났다(Fig. 11).

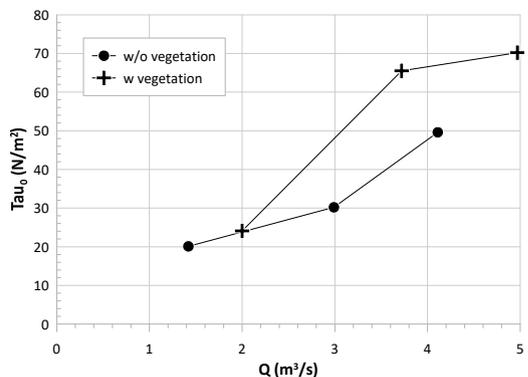


Fig. 11. Relationship of tractive force and discharge

4.3 토양 침식

무식생과 유식생 3차 실험 이후의 변화는 Fig. 12와 같다. 두 조건 모두에서 외관상 현저한 변화는 관찰되지 않는다. 하지만 무식생의 경우 상류부 1 m 구간에서 국부적인 토양 유실이 발생하였고 유실된 토양은 하류로 밀려 이동하여 철형으로 솟아오른 형태로 변형되었다 (Fig. 12(a) 타원 내부). 이러한 변화는 고유속의 흐름에 의해 매트 내부의 채움재 토양이 하류로 이동하면서 발생한 것이다. 이러한 결과는 Fig. 13의 하상고 변화에도 잘 반영되어 있다.



Fig. 12. Appearance of the non-vegetated (a) and vegetated (b) specimens after the 3rd run of the each experiment.

무식생 조건과는 달리 유식생의 경우 외형적으로 뿐만 아니라 실험 전후의 하상 측량 결과를 봐도 시험체의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다(Fig. 14). 하상고의 등고선은 1차 실험 전이나 3차 실험 후나 상류부터 하류까지 대체로 일정한 패턴을 나타내고 있다.

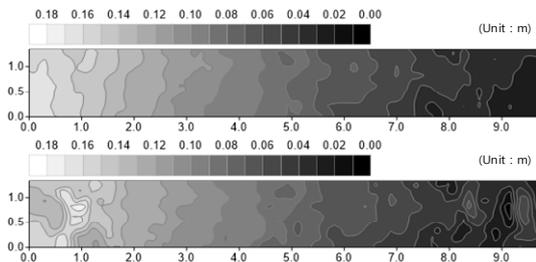


Fig. 13. Bed elevation distribution (without vegetation). Upper: before, lower: after case N03.

무식생과 유식생 실험에서 각각 세 번의 실험 전후에 실시한 하상측량을 기반으로 체적 계산을 통해 토양 유실량을 산정하였다. 무식생과 유식생의 모든 유량 조건에서 유실된 토양 체적은 0.1 m^3 미만이었다. 유량별로 보면, 무식생 조건에서는 $0.03 \sim 0.07 \text{ m}^3$ 이 유실된 반면, 유식생 조건에서는 $0.02 \sim 0.07 \text{ m}^3$ 의 유실량을 보여서 비슷한 결과를 나타내고 있다. 시험체의 전체 표면적(9.76

m^2)을 고려하여 산정한 Clopper 토양손실지수(CSLI, 단위면적당 손실 깊이)는 무식생에서는 $0.26 \sim 0.52 \text{ cm/m}^2$ 이며, 유식생에서는 $0.13 \sim 0.52 \text{ cm/m}^2$ 로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 소류력에 따른 토양유실량은 Fig. 15와 같다. 이러한 토양 손실량은 ASTM에 제시된 CSLI 기준값[10]인 1.27 cm/m^2 보다 낮은 것으로 적용된 모든 수리 조건에서 식생 매트-망태형 호안은 안정적인 것으로 나타났다.

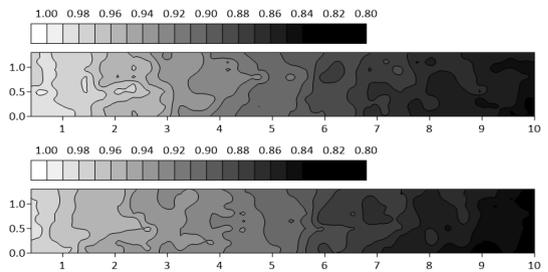


Fig. 14. Bed elevation distribution (with vegetation). Upper: before, lower: after 3rd experiment

무식생과 유식생 조건의 실험 결과를 비교해 보면 두 실험의 결과는 대체로 유사한 기울기를 나타내고 있으며, 유식생 결과는 무식생에 비해 동일한 토양 손실이 나타나는 소류력이 약 20 N/m^2 높게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과만으로는 식생의 어떤 효과가 소류력에 대한 저항성을 높이는지를 정량적으로 판단할 수 없으나 식생에 의한 호안제품의 보호와 내침식성은 뚜렷함을 알 수 있다. 유식생 조건에서 2배 긴 실험 시간이 제공된 점을 고려하면 유식생 조건은 무식생 조건보다 큰 소류력에서 장시간 토양 침식에 저항하고 제품의 형상을 유지할 수 있음을 의미한다.

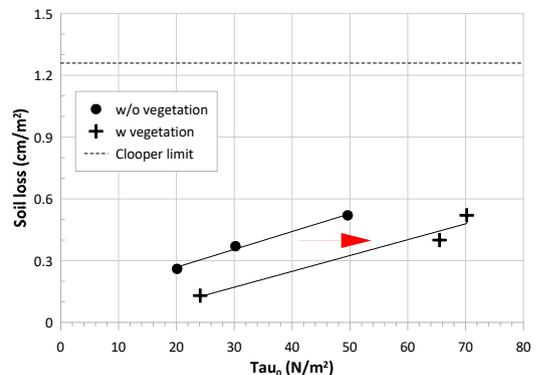


Fig. 15. Relationship of shear stress and soil loss depending on the presence or absence of vegetation

5. 결론

본 연구에서는 실규모 실험수로에서 식생 매트-망태형 호안 제품 시험체에 대해 무식생과 유식생 조건으로 각각 3회씩 유량을 공급하면서 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 식생 매트-망태 호안제품은 무식생, 유식생 실험 조건 모두에서 기준 이하의 토양 유실이 발생하였다. 유식생 시험체는 무식생에 비해 1.4배 높은 소류력에서도 동일한 토양 손실을 보임으로써 동일한 호안 제품이라도 식생으로 인한 수리 안정성이 향상됨을 확인하였다.

하천에서 식생의 안정적인 활착을 위해서는 충분한 기간이 필요하다. 식생 호안 제품의 시공 시기와 시공 후 안정적인 운영 및 그로 인한 경제적 효과를 고려하면 식생 호안의 시공은 시기적 적절성이 중요할 것으로 판단된다.

본 연구는 실제 하천에 가까운 준실규모 실험수로를 기반으로 한 것으로 실제 실험에 비해 반복 실험이 어렵고 실험 횟수가 적으며, 동일 시험체로 다회의 실험을 수행하는 한계가 있다. 향후 이를 개선하여 실험의 더 신뢰성을 높이고 이를 기반으로 실험의 표준화와 호안 재료의 인증 등으로 발전시킬 필요가 있다.

References

- [1] Kim, M. H., Lee, D. H., Rhee, D. S., "Full Scale Hydraulic Experiment and Analysis for Hydraulic Characteristics of Revetment Blocks", *Proceedings of 2012 Conference of Korean Water Resources Association*, pp. 667-667, 2012.
- [2] Ministry of Land Infrastructure and Transport, "River Construction Design Standard", Publishing Registration No. 11-1613000-001847-01, Korea, pp.135-138, 2016.
- [3] Kim, S-J. "Evaluation of Hydraulic Stability of Stone-Based Revetment Methods", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 22, No. 12, pp.411-418, 2021.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.12.411>
- [4] Lee, S., Yu, K. "Development of Environmental River Improvement Techniques in the Urban River", Korea Institute of Construction Technology, Report ID KICT/95-WR-1201, 1995.
- [5] Lee, D. H., Kim, D. H., Kim, M. H., and Rhee, D. S., "A Real Scale Experimental Study for Evaluation of Permissible Shear Stresses on Vegetation Mats", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 12, pp.6151-6158, 2012.

DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.6151>

- [6] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, "2021 River Research Center Hydraulic Experiment Project-Report on Hydraulic Stability for Vegetation Mat Using Bamboo Tree", Report ID KICT 2021-284, 2022.
- [7] McCuloh, J., and Howard, V., "Shasta College erosion control blanket study, research quantifies erosion from slopes", *Land and Water*, Vol. 44, No.5, 2000.
DOI: http://www.landandwater.com/features/vol44no5/vol44no5_2.html
- [8] Kim, S-J., Kim, M. H., "Evaluation of Hydraulic Stability of Biodegradable Vegetation Revetment Block", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 23, No. 12, pp.23-31, 2022.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.12.23>
- [9] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, "2021 River Research Center Hydraulic Experiment Project-Report on Hydraulic Stability Experiment for Disaster Mitigation Using Eco-friendly Greening Mat", Report ID KICT 2021-284, 2021.
- [10] American Society for Testing and Materials, "ASTM D6460-07 Standard Test Method for Determination of Rolled Erosion Control Product Performance in Protecting Eathen Channels from Stormwater-Induced Erosion", ASTM, USA, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1520/D6460-19>

이 찬 주(Chanjoo Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 서울대학교 대학원 지리교육과 (교육학석사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 서울대학교 대학원 지리교육과 (교육학박사)
- 2002년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

하천지형학, 하천실험, 흐름계측

김 명 환(Myounghwan Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 가천대학교 공과대학 화학공학과 (공학사)
- 2010년 8월 : 연세대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

수리학, 전산유체

김 성 중(Sung-Jung Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 상지대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 상지대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2018년 8월 : 한국교통대학교 공과대학 토목공학과 (박사수료)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

하천공학, 하천방재

김 동 구(Donggu Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 1999년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 경북대학교 공과대학 토목공학과 (박사수료)
- 1999년 1월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

하천공학, 하천방재, 수문관측