

실규모 하천 실험을 통한 하안침식 방지 Eco-hybrid 롤링매트 공법 개발 및 검증

Development and Verification of Eco-hybrid Rolling Mat for Preventing Bank Erosion Based on Large-scale Experiments

지운^{1,2*} · 장은경³ · 안명희⁴ · 김원⁵

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원, ²과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 부교수,

³한국건설기술연구원 국토보전연구본부 전임연구원, ⁴한국건설기술연구원 국토보전연구본부 신진연구원,

⁵한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

Un Ji^{1,2*}, Eun-Kyung Jang³, Myeonghui Ahn⁴ and Won Kim⁵

¹Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

²Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

³Research Specialist, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

⁴Budding Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

⁵Senior Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 23 October 2019, revised 18 November 2019, accepted 18 November 2019, published online 31 December 2019

ABSTRACT: Optimum engineering methods for bank protection were classified based on steepness of bank slope and an existence of waterfront facility in the floodplain, and a new concept of eco-hybrid rolling mat method which could be applicable for the unfitted cases with previously developed countermeasures was suggested in this study. The eco-hybrid rolling mat method can be constructed while maintaining the river environment and ecosystem that does not interfere with the ground and slopes, when bank erosion occurs, it is an economical and efficient construction method that can protect the revetment and the bank slope immediately. The developed eco-hybrid rolling mat method was verified for the designed structure, system, function and effect based on large-scale river experiments including field exposure and decomposition test. As a result, the normal operation and effect of the rolling mat ted under low and high velocity conditions were confirmed with respect to bank protection. The effect of bank erosion prevention was quantitatively validated by sediment concentration monitoring and analysis, and the product specification of the eco-hybrid rolling mat was presented based on the standardized mat applied in real-scale tests.

KEYWORDS: Bank Erosion, Eco-hybrid Rolling-Mat, Large-scale Experiment, Revetment

요약: 본 연구에서는 하천의 하안 경사와 친수시설 유무에 따라 적절한 하안 보호 공법을 유형화하였으며, 특히 기존의 호안 공법으로 하안침식 방지 대책 적용이 적절하지 않은 유형에 대해 적용 가능한 신개념 Eco-hybrid 롤링매트 공법을 제시하였다. Eco-hybrid 롤링매트 공법은 지반과 사면의 교란없이 하천 환경과 생태 조건의 변화를 최소화하는 사공이 가능하고, 하안침식이

*Corresponding author: jiun@kict.re.kr, ORCID 0000-0003-0061-0098

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발생할 경우 즉각적으로 호안이나 제방 사면을 보호할 수 있는 경제적이고 효율적인 공법이다. 개발된 Eco-hybrid 롤링매트 공법은 실규모 하천 실험을 통해 공법의 구조 및 시스템, 기능과 효과를 검증하였다. 현장에서 발생할 수 있는 여러 변형 및 부패 테스트를 포함한 실규모 하천 실험 검증을 수행하였으며, 저유속과 고유속 조건에서 롤링매트의 작동과 하안침식 방지 효과를 확인하였다. 하안침식 방지 효과는 유사 농도 분석을 통해 정량적으로 검증하였으며, 실험에 활용한 롤링매트를 기준으로 규격화하여 Eco-hybrid 롤링매트 공법의 제품의 사양 (안)을 제시하였다.

핵심어: 하안침식, 친환경 롤링매트, 실규모 실험, 호안 공법

1. 서 론

태풍이나 홍수 등이 내습하였을 때 하천의 유속이 증가하여 하안에 침식 현상이 발생한다. 하안침식은 하천의 흐름 변화 및 하류구간의 유사 퇴적, 제방 붕괴, 저수지의 저류량 감소 등의 문제를 야기한다(Couper 2004, Gomi et al. 2002). 특히, 하안침식은 하도형태의 변화와 하천의 근접한 주거 시설의 안전을 위협할 수 있으며(Jang et al. 2018, Ji and Jang 2016), 하천의 홍수터나 둔치에 시공되어 있는 친수 시설에도 영향을 미치게 된다(Dave and Mittelstet 2017). 이러한 하안침식으로 인한 문제점들을 방지하기 위해 호안블록, 식생호안, 토목섬유, 수재 등을 설치하여 하안을 보호하는 공법이 개발이 되어왔다(Shields Jr et al. 1995, Lawson 1992, Rhee et al. 2007). 그러나, 이러한 공법은 시공에 따른 지반과 사면의 교란으로 인해 생태환경적으로 안정되어 있는 하천 환경에 악영향을 미칠 수도 있다. Kim et al. (2011)은 호안블록 공법이 식생분포 및 수생태계에 미치는 영향을 분석한 바 있으며, 급류부, 급경사 등을 제외한 구간은 기존의 콘크리트 호안블록보다 생태환경적 영향을 고려한 공법을 적용하는 것이 바람직하다는 결론을 제시하였다. Florsheim et al. (2008)은 하안침식을 대처하는 과정은 하천 생태계와 직결되므로 매우 중요하며, 하천 환경과 수생태계를 보존하고 지속 가능한 호안 공법 개발이 필요하다고 언급한 바 있다. 기존에 적용하고 있는 호안 공법의 경우 하천 생태학적인 측면뿐만 아니라 경제적인 문제점도 존재한다.

하안유형을 고려하지 않고 기존의 호안 공법을 적용할 경우, 하안의 안정성은 확보되나 공법 적용에 많은 비용이 요구되고 기능적인 측면에서도 효율성이 현저하게 저하된다. Dave and Mittelstet (2017)은 12곳의 하안 유형과 6가지의 호안 공법의 경제성과 효율성에 대해 검토한 후 하안침식을 관리하기 위한 적절한 안정화 기술을 선택하는 것이 중요하다고 강조하였다. 따라

서 지금까지 적용되는 호안 공법은 하안 유형과 하천 환경에 따라 적용하지 못하는 한계점이 있다. 특히, 국내 하천에서 하안 특성을 고려하지 않고 기존의 호안 공법을 적용하였을 경우, 고비용 문제가 발생하고, 기능적인 측면에서 효율성이 현저하게 떨어진다. 또한, 하안 사면 환경을 유지할 필요가 있는 구간에 대해 인위적인 사면 교란으로 생태환경적인 문제도 발생할 수 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 하안 특성 유형에 따라 하안침식이 발생했을 경우에만 즉각적으로 대처 가능한 저비용의 친환경적인 공법 개발이 필요하다.

본 연구에서는 국내 하안 특성 유형을 고려하여 하안 특성 및 대책 유형화를 제시하였으며, 제시한 유형에 따라 기존 호안 공법의 적용이 어려운 유형에 하안침식이 발생했을 경우 즉각적으로 대처 가능한 신개념의 Eco-hybrid 롤링매트 호안 공법을 개발하였다. Eco-hybrid 롤링매트 공법은 여러 차례의 실규모 하천 실험을 통해 롤링매트 작동성과 공법의 기능 및 효과를 검증하였으며, 특히 롤링매트의 작동 유무에 따른 하안침식으로 인한 유사농도 측정을 통해 롤링매트의 하안 보호 효과를 검증하였다. 최종적으로는 검증 테스트에 적용한 롤링매트 시제품을 규격화하여 Eco-hybrid 롤링매트 제품 사양 (안)을 제안하고자 한다.

2. 하안침식 방지를 위한 Eco-hybrid 롤링매트 개발

2.1 하안침식 및 대책 유형화

본 연구에서 하안 특성 유형을 고려한 호안 공법을 개발하기 위해 하안의 사면 경사와 친수 시설의 유무, 하안침식의 가능성 및 하안 보호 필요성을 고려하여 하안 특성을 4가지 형태로 분류하였다(Fig. 1). 하안 특성 유형 중 급경사에 친수 시설이 있는 경우에는 하안침식이 발생할 경우 즉각적인 대처가 필요하며, 기존 호안

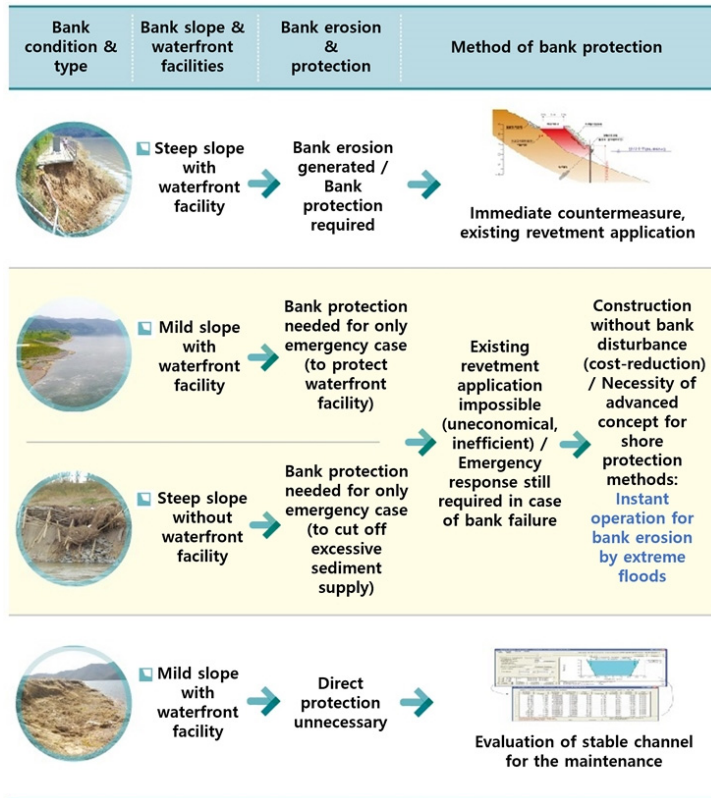


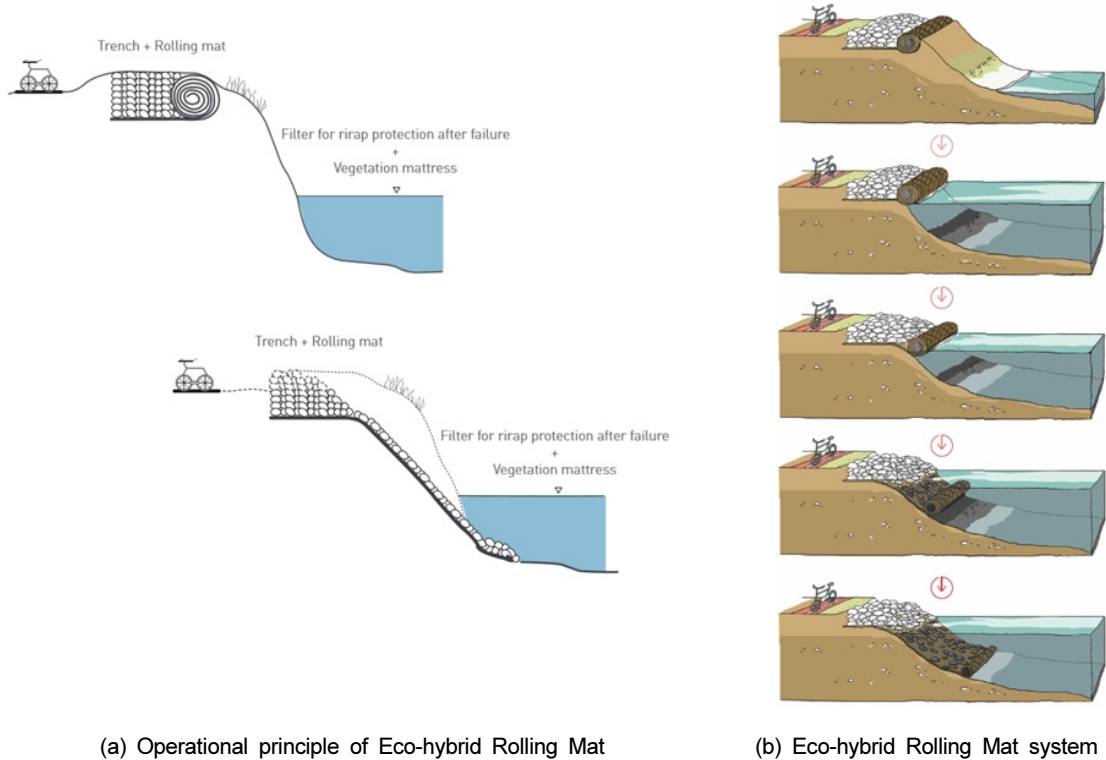
Fig. 1. Classification of bank erosion and solutions for bank protection.

공법을 적용하는 것이 효과적이다. 반면에 완경사에 친수 시설이 있는 경우와 급경사에 친수 시설이 없는 경우에는 하안 보호가 필요하나 기존 호안 공법을 적용할 경우 비용이 많이 소요되며 효율성이 떨어진다. 또한, 사면이 완만하고 친수 시설이 있는 경우, 친수 시설 보호 목적으로 호안 공법이 필요하지만 광범위한 구간에 기존의 호안 공법을 적용할 때 많은 비용이 요구된다는 문제점이 있다. 하안이 급경사이고 친수 시설이 없는 경우에는 유사 공급원 차단 및 하상퇴적 방지 목적으로 하안을 보호해야 할 필요성이 있으나 기존의 호안 공법을 적용하면 기능적 측면에서 효율성이 저하된다. 기존의 호안 공법은 이미 안정된 하안 사면과 하도를 교란하므로 생태환경 및 지반공학적으로 문제점이 있다. 따라서 이러한 복합적인 문제점을 해결할 수 있는 솔루션으로 신개념 호안 공법인 ‘Eco-hybrid 롤링매트(Eco-hybrid Rolling Mat)’를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 Eco-hybrid 롤링매트는 트렌치 공법으로 사면 교란없이 시공이 가능하며 (Julien 2018), 극한의 상황에서 발생하는 하안침식에 대해서 즉각적인 하안 보호가 가능

하도록 슬라이딩 기법을 도입하였다. 호안 공법에 활용한 롤링매트는 친환경 재료를 활용하여 생태환경적 문제를 최소화할 수 있는 이점이 있다. 또한, 본 공법은 생태환경적으로 안정되어 있는 하안 및 제방에 대하여 하안침식으로 인한 급격한 붕괴를 방지함으로써 하안이나 제방에 대한 추가적인 보호 조치를 수행할 때까지 시간을 확보할 수 있는 장점이 있다. 뿐만 아니라 시공 과정이 비교적 매우 간단하고, 트렌치 공법의 형식과 필터 매트 적용하므로 시공 비용을 크게 절감할 수 있다.

2.2 Eco-hybrid 롤링매트의 구조

Eco-hybrid 롤링매트 공법은 친환경 소재의 롤링매트를 홍수터 또는 둔치 상단에 사석 트렌치와 함께 포설하여 고정하고, 하안 상부에 롤(roll) 형태로 감겨진 매트를 매립하는 구조이다. 하안침식이 발생하면 사면이 침식 혹은 붕괴되기 시작하여 매립되어 있던 롤링매트는 자동으로 슬라이딩 되고, 롤링매트 슬라이딩 후 트



(a) Operational principle of Eco-hybrid Rolling Mat

(b) Eco-hybrid Rolling Mat system

Fig. 2. Conceptual diagram of Eco-hybrid Rolling Mat.

렌치 사석이 슬라이딩 되어 사석층 밑에서 필터 역할을 수행한다 (Fig. 2 (a)). 따라서 하안 또는 제방 사면을 덮음으로써 보강 공사를 수행할 때까지 사면의 붕괴를 신속하고 효율적으로 방지하는 형태이다.

Eco-hybrid 롤링매트 공법에서 활용한 롤링매트는 친환경 소재이며, 기존의 식생매트, 등산로, 산책길 등에 활용되고 있는 코코넛 섬유 (coco fiber)의 친환경 재질로 제작하였다. 코코넛 섬유의 롤링매트는 인장강도가 10 KN/m로 사석으로 인한 무게, 홍수로 인한 고속 흐름을 충분히 지지할 수 있다. 매트 선정 과정에는 매트의 공극을 최소화하여 유사 투과를 방지하고 물은 투과시켜 매트가 양력으로 인해 부유하지 않는 장점이 고려되었다. 또한, 매트 끝단을 주머니 형태로 제작하여 사석을 채워 넣고 수중에서 매트를 고정하는 역할을 할 수 있도록 제작하였다.

기존의 사석 트렌치 기법과 롤링매트 구조를 융합하여 하안침식 발생시 즉각적인 대처를 할 수 있는 신개념의 롤링매트는 기존의 사석보호공이나 호안 공법이 갖고 있는 한계를 극복하면서 사면 및 하도의 교란없이 시공할 수 있는 공법으로 저비용 친환경 하안침식 방지 공

법이다. 이에 따라, 친환경성과 재해 대응력을 동시에 만족할 수 있다는 특징이 있다.

2.3 Eco-hybrid 롤링매트 시스템

하천에 급격한 수위 상승 및 유속 증가로 하안침식이 발생하면 하천의 주변 주거 및 친수 시설에 큰 피해를 방지하기 위해 빠른 대처가 필요하다. 이러한 상황에서 홍수터나 둔치에 롤링매트공법이 적용된 경우에 Fig. 2 (b)와 같이 하안침식을 즉각적으로 대처할 수 있다. 먼저, 하안의 침식으로 인해 매립되어 있던 롤링매트가 노출되면 중력에 의해 사면을 따라 매트가 펼쳐지게 된다. 이때 함께 매립되어 있던 사석도 사면으로 함께 슬라이딩 한다. 롤링매트가 하도까지 완전히 펼쳐지면, 매트 끝단의 사석주머니는 사석 무게로 인해 안정적으로 고정된다. 이러한 단계로 Eco-hybrid 롤링매트가 작동되어 하안이나 제방 사면을 보호하고 추가적인 붕괴를 효율적으로 방지할 수 있다. 붕괴되기 시작한 하안 사면에 롤 매트와 표면포설 골재가 덮이게 되므로 하안이나 제방 사면으로 물이 용출하더라도 매트가 필터

역할을 함으로써 하안 사면의 토사가 흡출되는 것을 효과적으로 방지하게 된다. 또한, 하안 사면의 붕괴가 발생하게 되면 롤 매트와 표면포설 골재에 의해 사면 붕괴의 진행을 신속하게 정지시킬 수 있게 된다. 하안의 사면과 친수 시설의 붕괴 방지, 복구를 위한 추가적인 작업 내지 본격적인 보호 작업이 시작되기 전까지 제방을 안정적으로 보호할 수 있는 충분한 시간을 용이하게 확보할 수 있게 된다. 따라서 하안침식에 대해 생태환경을 교란시키지 않고 신속하게 하안이나 제방 사면의 붕괴를 효율적으로 방지할 수 있는 효과가 있다.

3. 실규모 하천 실험을 통한 Eco-hybrid 롤링매트 검증 실험

3.1 검증 실험의 개요

본 연구에서 개발한 Eco-hybrid 롤링매트 공법 검증을 위해 한국건설기술연구원 하천연구센터의 실규모 하천 실험수로에서 총 4회에 걸쳐 검증 테스트를 수행하였다. 본 검증 실험에 앞서, 롤링매트의 구조 및 시스템에 검증을 위해 실내 및 실규모 실험이 수행된 바 있다. 고무매트를 이용하여 롤링매트 구조 및 작동 검증이 이루어졌으며, 검증 결과를 통해 슬라이딩 불균형 및 매트 길이 조절, 설계 유속에 따른 사석 무게 결정 등에 대한 문제점을 도출하였다. 따라서 본 검증 실험에서는 앞서 도출된 문제점들을 개선하여 Eco-hybrid 롤링매트 공법의 검증 테스트가 Table 1과 같이 수행되었다.

본 검증 실험은 하천연구센터의 복단면 수로 홍수터 구간과 급경사 수로 만곡부 구간에서 각각 2회씩 수행되었다. 검증 실험에서는 친환경 소재인 코코넛 섬유의 롤링매트를 적용하였다. 복단면 수로 홍수터 구간에서 진행한 검증 실험은 저유속 조건에서의 작동 및 시공법을 검증하였고, 급경사 수로 만곡부 구간에서 진행한 실험은 고유속 조건에서의 롤링매트 작동 검증 및 롤링매트 작동에 따른 유사농도 분석을 수행하였다. 검증

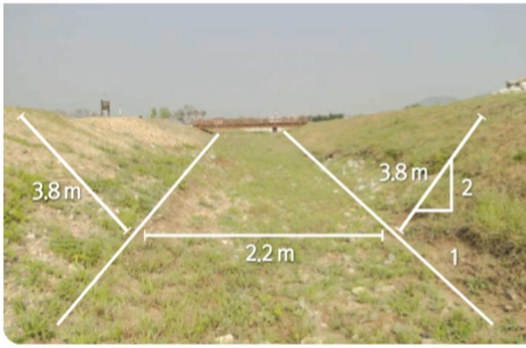
실험에서 활용한 롤링매트는 ‘2.2 Eco-hybrid 롤링매트의 구조’에서 설명한 바와 같이 코코넛 섬유의 롤링매트 끝단 주머니에 사석을 채운 후 매트를 롤링하여 트렌치 공법으로 설치하였다.

3.2 실규모 하천수로 실험

Eco-hybrid 롤링매트 공법 작동 검증을 위해 하천연구센터 복단면 실험수로의 홍수터 약 10 m 구간에서 2차례 실험을 수행하였으며, 실험 대상구간은 바닥 폭 2.2 m, 사면 경사 1:2, 사면 길이 3.8 m인 사다리꼴 형태의 단면이다 (Fig. 3 (a)). 실험을 위해 폭이 1.2 m인 롤링매트를 제작하였으며, 2개의 롤링매트를 트렌치 공법으로 홍수터에서 사석으로 고정된 후 매트 끝단 사석 주머니에 사석을 채우고 롤링하여 하안 상부에 설치하였다. 롤링매트의 작동 여부를 판단하기 위해 1차 실험에서는 유량을 1.98 m³/s에서 2.59 m³/s의 범위에서 점진적으로 증가시키면서 공급하였고, 2차 실험에서는 롤링매트가 작동한 최대유량 2.6 m³/s을 공급하였다. 롤링매트 작동 검증 1차 실험 시 1차원 프로펠러 유속계를 이용하여 접근 유속과 롤링매트가 설치된 단면의 유속을 측정하였다. 유속 측정 위치는 롤링매트 설치구간에서 상류방향으로 약 5 m 떨어진 위치, 매트가 시작되는 위치의 단면, 매트의 중앙 단면에서 측정하였다. 초기 유량 1.98 m³/s일 때 실험구간의 접근 유속은 수로 중앙에서 0.829 m/s로 나타났으며, 매트가 시작하는 단면에서는 0.804 m/s, 매트 중앙 단면에서는 0.848 m/s의 유속이 측정되었다. 롤링매트는 유량 2.59 m³/s일 때 작동하였으며, 롤링매트 작동 시 매트가 시작되는 단면과 중앙 단면에서의 유속은 1 m/s에서 1.3 m/s로 측정되었다. 1차 실험에서는 롤링매트 작동을 유도하는 실험이므로 유량을 증가시키면서 사면에 유사 침식이 발생시켰고, 침식이 진행됨에 따라 Fig. 3 (b)와 같이 롤링매트가 중력에 의해 슬라이딩 하여 하안침식을 즉각적으로 대처하였다.

Table 1. Large-scale experiment cases

Experiment Cases	Flow Discharge	Measured Velocity	Validation
Straight Channel 1 st	1.98 – 2.59 m ³ /s	0.8 – 1.3 m/s	Rolling Mat Sliding
Straight Channel 2 nd	2.6 m ³ /s	1 – 1.3 m/s	Rolling Mat Sliding
Steep and Bending Channel 1 st	4 m ³ /s	2.7 m/s	Sediment Concentration
Steep and Bending Channel 2 nd	4 m ³ /s	2.79 m/s	Sediment Concentration

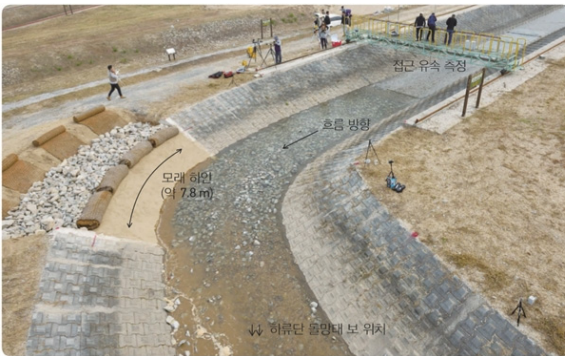


(a) Cross-section of experiment channel



(b) Operation test of rolling mat

Fig. 3. Large-scale experiment channel and operation tests.



(a) Experiment in steep and bending channel



(b) Rolling Mat installation in bending channel

Fig. 4. Large-scale experiment in steep and bending channel.

롤링매트 작동 검증 2차 실험은 1차 실험 후 동일한 실험 구간에서 사면을 재정비하여 진행하였다. 2차 실험에서의 유량 조건은 1차 실험에서 롤링매트가 작동했을 때의 유량인 $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 유량을 공급하여 롤링매트 작동 검증 실험을 수행하였다. 유량 공급 후 1차 실험과 동일하게 유속을 측정하였고, 롤링매트 설치구간의 접근유속은 1.2 m/s , 롤링매트 설치 구간 단면의 유속은 1 m/s 에서 1.3 m/s 로 측정되었다. 1차 실험과 동일하게 사면에 침식이 발생하면서 하안 상부에 설치된 롤링매트가 슬라이딩 하여 즉각적으로 사면 보호하는 것을 확인하였다.

3.3 실규모 급경사 만곡부 실험

저유속 조건에서의 롤링매트 작동 검증 후, 고유속 조건에서의 롤링매트 작동 검증과 롤링매트 작동으로 인한 하안침식 대처 및 효과에 대한 검토를 위한 실규모

검증 실험을 하천연구센터 급경사 수로의 만곡부 구간에서 2회의 검증 실험을 수행하였다. 급경사수로의 만곡부는 하상경사 0.00552 이므로 고유속의 수리조건을 재현하기에 적합하였고, 실험 대상구간은 호안 블록이 설치된 사면이므로 하안침식이 발생할 수 있는 사면으로 교체하여 실험을 진행하였다. 실험 대상구간의 수심 확보를 위해 만곡부가 끝나는 하류단에 돌망태로 0.5 m 높이의 투과성 보를 설치하였다. 롤링매트는 Fig. 4 (a)에 나타난 바와 같이 만곡부 7.8 m 구간에 폭 1.2 m 인 롤링매트 4개를 설치하였다. 실험 구간이 만곡부이므로 롤링매트가 슬라이딩 되었을 때 매트 끝단의 주머니가 중첩되지 않도록 시공 과정에서 롤링매트 간의 이격을 두어 설치하였다. 만곡부 구간의 1차 실험이 끝나고 완전 배수된 상태에서 롤링매트를 3개월 존치한 후 2차 실험에 그대로 활용하여 현장의 자연조건에 의해 롤링매트가 부패되거나 작동에 문제가 없는지를 검토하기 위한 하천 폭로실험(field exposure and decomposition

test)을 수행하였다. 롤링매트를 설치하고 매트가 설치된 위치까지 수심이 확보되는 수리조건에서 실험이 진행되었으며, 1차와 2차 실험에서 유량 4 m³/s를 공급하여 검증 실험을 수행하였다. 첫 번째 롤링매트가 설치된 곳에서 상류방향으로 약 10 m 떨어진 곳에서 1차원 마그네틱 유속계로 접근 유속을 측정하였다.

1차 실험의 경우 4 m³/s의 유량을 공급한 후 하안침식이 진행됨에 따라 순차적으로 매트가 슬라이딩 하였고, 매트의 들림 현상이나 사면 위로 유사이탈이 되는 현상은 관측되지 않았다. 최대 접근 유속은 2.7 m/s로 측정되었으며, 롤링매트가 고유속 조건에서도 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다. 또한, 하안침식이 발생함에 따라 사면 근처의 유사 농도가 매우 높다는 것을 육안으로 확인하였으며, 롤링매트가 슬라이딩 되어 하안을 보호하기 시작하면서 유사 농도는 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 2차 실험은 1차 실험 후 약 3개월 후에 동일한 실험구간에서 진행하였다. 2차 실험에서 최대 접근 유속은 2.79 m/s로 측정되었으며, 하안침식이 발생하면서 침식 정도에 따라 Fig. 4 (b)에 표기한 A와 B 위치의 롤링매트가 슬라이딩 하고 C 위치의 롤링매트가 슬라이딩 하였다. 1차 실험에서 관측된 유사 농도의 급격한 증가와 감소 현상을 정량적인 값으로 제시하기 위해 2차 실험에서는 유사를 샘플링하여 농도를 분석하였다. 유사 샘플링 위치는 접근수로와 Fig. 4 (b)에 표기된 A와 B에서 롤링매트 작동 전에 1회, 롤링매트 A와 B 작동 후 1회, 롤링매트 A, B, C 작동 후 1회로 총 3회의 유사 샘플링을 수행하였다.

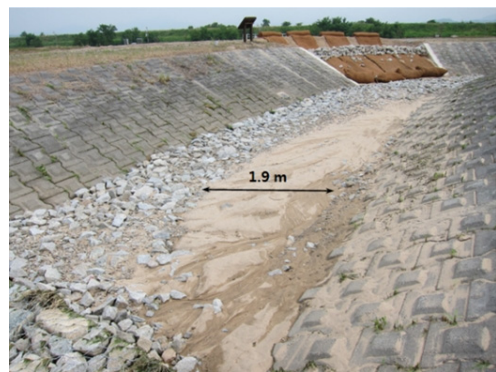
4. 검증 실험 결과 및 고찰

4.1 Eco-hybrid 롤링매트 작동 검증

본 연구에서 개발된 Eco-hybrid 롤링매트 공법은 실규모 하천 실험을 통해 검증 테스트를 수행하였다. 롤링매트 작동 검증을 위해 저유속과 고유속 조건에서 각각 2회씩 실험을 진행하였으며, 최대 2.7 m/s 유속에서 적용가능함을 검토하였다. 실규모 검증 실험을 통해 하안의 침식이 진행됨에 따라 롤링매트가 즉각적으로 슬라이딩하여 하안침식을 방지하는 것을 확인할 수 있었으며, 롤링매트 작동 후 사면 위로 유사 이탈 현상이 없다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 롤링매트 끝단의 사석주머니는 수중에서 빠른 유속으로부터 롤링매트를 고정하고 하안을 보호하는 역할의 효과가 있었다 (Fig. 5 (a)). 또한, 사석주머니가 하도나 수로에서 흐름 방향을 전환시키는 역할을 하면서 동시에 하안이나 하상을 보호하는데 활용하는 베인 (vane)의 역할을 했을 것으로 추측된다. 흐름 방향 전환에 대한 구체적인 근거는 제시할 수 없지만 에너지 소모 장치로서의 역할은 충분했을 것으로 판단된다. 이와 더불어, 롤링매트가 작동하기 전까지 하안에서 침식된 유사는 유속이 상대적으로 빠르지 않은 하류 구간에 퇴적된 것을 알 수 있었다. 만곡부 구간 실험에서 돌망태로 설치한 보 상류에 퇴적된 것을 확인할 수 있었고, 침식된 유사의 일부는 부유사의 형태로 보 하류로 이동했을 것으로 판단되며 일부 유사는 약 1.9 m의 하폭에 해당하는 범위로 하류 구간에 퇴적되었다 (Fig. 5 (b)). 또한, 친환경 소재를

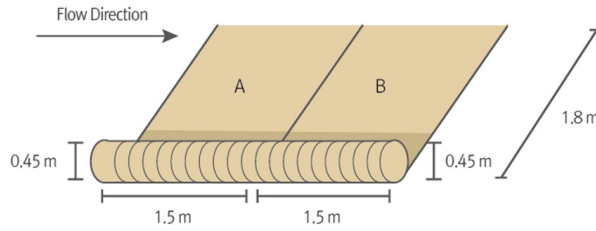


(a) Rolling Mat condition after the experiment



(b) Sediment deposition at the downstream section

Fig. 5. Final condition in steep and bending section after the large-scale experiment.



Contents	Prototype specification	General product specification	Others
Mat L-size (W*L)	1.5 m * 1.8 m	1.5 m * the length of the side slope	Mat width decreases with meandering (Pocket size of the end of the mats)
Riprap weights at the end of mats	123 kg Upstream mat A: 122.85 kg Downstream mat B: 122.6 kg	Design velocity ≤ 2 m/s : 100 - 200 kg Design velocity > 2 m/s : Validation test required	Design velocity standard
Mat weight in dry condition	28 kg	30 kg - 43 kg (Length of the side slope: 1.8 m)	Up to the length of the side slope
Mat weight in wet condition	63 kg	65 kg - 80 kg (Length of the side slope: 1.8 m)	Up to the length of the side slope
Mat tension strength	> 10 KN	> 10 KN	Coir net standard
Lifetime	> 5 to 7 years	> 5 to 7 years	Natural decomposition after 7 years (Coir net standard)
Allowable velocity	Validated up to 2.79 m/s	Target allowable velocity 3 m/s	Validation test required (if needed)
Trench riprap design	General riprap design	General riprap design	-

Fig. 6. Specification and standard of Eco-hybrid Rolling Mat.

적용한 롤링매트가 수중에서 부력과 양력에 안정적인 것을 확인하였다. 롤링매트 공법에서 매트가 슬라이딩 된 후에 둔치에 포설되어 있는 사석들도 연달아 슬라이딩 되는 구조로 공법을 개발했으나, 많은 양의 사석이 매트와 함께 슬라이딩 되지는 않은 것으로 관측되었다. 이러한 결과는 하안 사면의 경사 혹은 트렌치 사석이 포설되어 있는 위치 및 형상에 따라 사면에 떨어지는 사석의 양에 차이가 있는 것으로 판단된다.

Eco-hybrid 롤링매트 공법은 실규모 하천 실험을 통해 하안침식을 즉각적으로 대처할 수 있는 것을 검토하였으며, 실무에서 하안 유형에 따른 호안 공법으로 적용할 수 있다고 사료된다. 범용적으로 적용할 수 있는 호안 공법으로 제안하기 위해 실규모 하천 검증실험에서 활용한 롤링매트를 규격화하여 Fig. 6과 같이 Eco-hybrid 롤링매트 제품 시방 (안)을 제안하고자 한다.

4.2 현장 폭로실험 (Field Exposure and Decomposition Test) 및 유사농도 분석 결과

만곡부 실험 1차에서 사용한 롤링매트를 현장에 그대로 존치하여 약 3개월 동안 자연에 노출시킨 후 2차 실험에 사용하였다. 자연조건에서 3개월 동안 존치된 코코넛 섬유의 롤링매트는 최대 접근 유속 2.79 m/s에서 하안침식으로부터 사면을 보호하고 유사 농도를 저감시키는 기능을 정상적으로 발휘하는 것으로 나타났다. 또한, 만곡부 1차 실험이 끝나고 자연 상태에 존치하였을 때 부패 현상은 없었으며, 만곡부 1차와 2차 실험을 통해 롤링매트의 견고함과 작동성에도 문제가 없는 것으로 확인하였다. 따라서 롤링매트 현장 적용시 자연환경 및 현장조건에 의한 친환경 소재 매트의 부패 여부 확인 및 상태 변화에 따른 롤링매트 성능을 검증하였다.

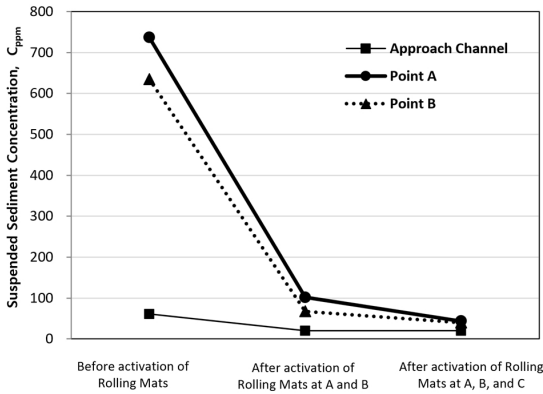


Fig. 7. Analysis result of sediment concentration measurements.

만곡부 2차 실험에서 롤링매트 작동에 따른 하안침식 방지 및 효과를 검토하기 위해 정량적인 유사 농도를 분석한 결과, Fig. 7에 나타난 바와 같이 하안침식이 발생하는 조건에서는 하안 근처의 유사 농도가 매우 높았으며 롤링매트가 슬라이딩 되어 하안을 보호하기 시작하면서 유사 농도는 급격하게 감소하였다. 롤링매트가 작동하기 전에 A 지점에서 하안침식으로 인해 발생하는 유사의 농도는 737 ppm로 나타났으며, 하루단 첫 번째와 두 번째 (하안의 A와 B 상단에 위치하고 있는 롤링매트) 매트가 슬라이딩 된 후의 유사 농도는 101 ppm으로 급격히 감소하였다. 그리고 세 번째 매트 (C 지점 상단에 위치하고 있는 매트)가 작동한 후에는 유사 농도가 44 ppm까지 감소하는 경향이 나타났다. 이는 롤링매트가 위치하고 있는 지점에서 상류로 15m 떨어진 접근수로에서 동일한 시간에 채취한 유사 샘플의 농도가 34 ppm인 것과 거의 유사하게 나타났다. 롤링매트가 작동한 후에는 상류에서 유입되는 유사 농도와 비슷한 수준의 유사 농도가 관측되는 것으로 나타나 하안침식이 더 이상 발생하지 않음을 확인하였다. 본 연구에서 수행한 실규모 하천 실험과 같은 규모에서는 하안침식으로 인해 발생하는 유사의 농도가 접근수로에서의 농도보다 최대 17배나 높게 발생할 수 있으며, Eco-hybrid 롤링매트의 선제적인 작동으로 이러한 과도한 유사발생을 방지할 수 있음을 정량적인 유사 농도 변화 분석을 통해 검증하였다. 그러나 본 연구에서 수행한 실규모 하천 실험의 하안을 구성하고 있는 하상재료는 주로 모래로 구성되어 있으며 하상재료에 따른 유사 유출차단의 효과는 하상재료에 따라 차이를 보일 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 하천 유형 특성에 따른 즉각적인 하안 침식 대처가 가능한 Eco-hybrid 롤링매트 공법은 개발하였다. 개발한 Eco-hybrid 롤링매트 공법은 실규모 하천 실험을 통해 검증 테스트를 완료하였으며, Eco-hybrid 롤링매트 공법의 개발 및 검증 실험을 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 하안 특성에 따른 효과적인 호안 공법 적용을 위해서는 하안 특성에 따른 대책 유형화가 필요하며, 본 연구에서는 사면 경사 및 친수시설의 유무, 하안침식의 가능성, 하안 보호 필요성을 고려하여 4가지의 하안 특성 유형을 제시하였다. 모든 하천구간 및 하안 유형에 대해 강성 호안 공법을 적용할 경우 고비용 및 비효율성의 문제점이 발생하므로 하안 유형별 대책 공법을 적용하여 보다 경제적이고 효율적인 호안 공법의 필요하다.
- 2) 하안침식 및 제방 붕괴에 즉각적으로 대처 가능한 Eco-hybrid 롤링매트 공법을 개발하였고, 실규모 하천수로에서 롤링매트 공법 검증 실험을 수행하였다. 롤링매트 시제품을 제작하여 실규모 하천 실험을 통해 검증을 수행한 결과, Eco-hybrid 롤링매트는 기존 공법의 여러 요소기술 및 장점들을 효과적으로 융합한 공법의 형태이며, 친환경적이고 경제적인 공법으로 실무에 적용 가능한 공법으로 검증되었다.
- 3) 본 연구에서 개발한 Eco-hybrid 롤링매트 공법의 실용화를 위해 실규모 하천 실험 검증에 적용한 롤링매트 제품의 시방(안)을 최종적으로 제안하였다. 검증 실험을 통해 롤링매트의 구조 및 성능, 현장 변형 및 부패 테스트를 충분히 검토하였으며, 기존 호안 공법으로 대처가 불가능하거나 친환경 공법으로 하안침식 발생시 응급대처가 필요한 하천 구간에 Eco-hybrid 롤링매트의 현장 적용을 제안하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (18AWMP-C140166-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Couper, P.R. 2004. Space and time in river bank erosion research: A review. *Area* 36: 387-403.
- Dave, N. and Mittelstet, A. 2017. Quantifying Effectiveness of Streambank Stabilization Practices on Cedar River, Nebraska. *Water* 9: 930.
- Florsheim, J.L., Mount, J.F. and Chin, A. 2008. Bank erosion as a desirable attribute of rivers. *BioScience* 58: 519-529.
- Gomi T, Sidel RC, Richardson JS. 2002. Understanding processes and downstream linkages of headwater systems. *BioScience* 52: 905-916.
- Jang, E.K., Ahn, M. and Ji, U. 2018. Channel-forming discharge calculation and stable channel section evaluation for downstream reach of Yeongju dam in Naesung stream. *Journal of Korea Water Resources Association* 51: 183-193. (in Korean)
- Ji, U. and Jang, E.K. 2016. Numerical analysis of lateral geomorphology changes by channel bed deposition and bank erosion at the river confluence section. *Journal of Korea Water Resources Association* 49: 391-398. (in Korean)
- Julien, P.Y. 2018. *River mechanics*. Cambridge University Press.
- Kim, W.S., Kwak, J.I., Lee, K.J. and Han, B.H. 2011. A Study on Characteristics of Vegetation Distribution according to Revetment Techniques of Riverbank in Han River, Korea. *Korean Journal of Environment and Ecology* 25: 17-30. (in Korean)
- Lawson, C.R. 1992. Geotextile revetment filters. *Geotextiles and Geomembranes* 11: 431-448.
- Rhee, D.S., Ahn, H.K., Woo, H.S. and Kwon, B. 2007. Application and assessment of new vegetation revetment techniques considering safety against flood and environmental performance. *Journal of Korea Water Resources Association* 40: 125-134. (in Korean)
- Shields Jr, F.D., Bowie, A.J. and Cooper, C.M. 1995. Control of Streambank Erosion due to Bed Degradation with Vegetation and Structure 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 31: 475-489.