

## 수리모형을 이용한 호안녹화기반재의 수리적 안정성 분석\*

권효진<sup>1)</sup> · 김성희<sup>1)</sup> · 구본학<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 상명대학교 대학원 환경자원학과 · <sup>2)</sup> 상명대학교

### Stability Analysis of Green Revetment Media Using Hydraulic Model\*

Kwon, Hyo Jin<sup>1)</sup> · Kim, Sung Hee<sup>1)</sup> and Koo, Bon Hak<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Sang Myung University,

<sup>2)</sup> Sang Myung University.

#### ABSTRACT

In recent years, river maintenance projects using natural methods have been continuously implemented in urban areas and methods emphasizing ecology are being developed and constructed in revetment areas. However, there is insufficient technical review on the hydraulic stability of those revetment methods during the event of flood. Therefore, a hydraulic analysis is necessary for the stream where revetments are applied.

This study was conducted to develop an objective test method for the hydraulic stability of green revetment media. For this purpose, hydraulic model tests were performed for the green base materials for revetments.

Tests were conducted using experimental devices for the hydraulic model which were installed to simulate the rapid current during the flood. Loss of soil by the hydraulic condition was compared and analyzed with that of dry green revetment media, and the evaluations were made on the corrosion resistance, tractive force, and contractile force. Test results showed that green revetment media had

---

\* 본 연구는 2011년도 상명대학교 연구비 지원으로 수행되었음.

**First author** : Kwon, Hyo Jin, Graduate School, Sang Myung University, Cheonan 330-720, Korea,  
Tel : +82-41-563-1241, E-mail : gywls03@nate.com

**Corresponding author** : Koo, Bon Hak, Dept. of Environmental Landscape Architecture, Sang Myung University,  
Cheonan 330-720, Korea,  
Tel : +82-41-550-5300, E-mail : ecoculture@smu.ac.kr

**Received** : 15 April, 2013. **Revised** : 12 July, 2013. **Accepted** : 2 July, 2013.

higher corrosion resistance in non-vegetation condition compared to dry green revetment media, and the loss of base materials by the rooting of vegetation showed significant reduction by the vegetation. In addition, results of the allowable tractive force of the base material indicated it is relatively stable in vegetation condition but scouring can occur in non-vegetation condition. Therefore, the development of vegetation in revetment areas is anticipated to be effective for the stability of revetment areas by reducing external forces interacting with the corrosion resistance and stream bank. The green revetment media is expected to contribute to the stability of revetment areas.

Key Words : *Low water revetment, Hydraulic stability, Tractive force, Contractile force, Corrosion resistance.*

## I. 서 론

최근에는 친환경적인 측면에서 하천생태계와 하천의 친수성, 경관성, 하천재생·복원 등에 대한 관심과 노력이 증가되면서 많은 호안공법들이 개발 및 시공되고 있다. 그러나 하천정비 기법의 대부분이 선형의 직선화, 하폭의 최소화, 저수로 정비 등의 획일적인 기법을 적용함으로써 하천생태계에 부정적인 영향을 주고 있다. 또한 유희공간 활용을 위한 고수부지의 이용 및 호안의 노후화 등으로 인해 홍수 시 호안 붕괴로 인한 인명 및 재산피해가 가중되고 있으며, 최근 이상홍수 발생에 따른 하천 수위의 변화 등으로 인해 다양한 조건에 알맞은 형식을 선정하는 데에 한계가 있다.

호안은 제방 또는 하안을 유수에 의한 파괴와 침식으로부터 직접 보호하기 위해 제방 비탈에 설치하는 구조물을 의미한다. 이와 같은 정의에 따르면 호안에 작용하는 외력은 호안에 직접적인 파괴를 야기할 수 있는 강수와 유수라고 할 수 있다. 대하천에서는 이와 더불어 바람이나 파랑에 의한 힘을 고려해야 한다. 즉, 호안은 이러한 침식방지 기능과 아울러 하천환경의 재생과 친수성 등의 기능을 동시에 만족시켜야 하며, 구조가 안정하도록 시공성, 경제성, 유지관리성을 고려하여 공법을 적용하여야 한다.

하지만 이러한 호안공법에 대한 홍수시의 수

리적 안정성 검토 등의 기술적인 검토가 충분치 않은 실정이다. 국내 하천설계기준(Ministry of Land, 2009a)에서는 침식방지를 위하여 호안을 설치토록 하고 있으나 확실한 안정성 평가방법이 제시되어 있지 않은 실정으로 호안공별 시공 기준이 경험에 의존하여 설계된다(Han *et al.*, 2010). 그러나 모형화가 어려운 식생 호안을 대상으로 적절한 설계 기준치를 제시하는 것은 상당히 어려운 일이며, 이미 사용되고 있는 호안 공법들도 하천조건에 적합한 지 검증되어 있지 않은 경우가 많다.

과거 하천의 제방은 1970년대부터 치수안전성, 경제성, 재료확보의 용이성 등의 이유로 돌붙임, 타원형돌망태와 모르타르 블록 등이 주로 이용되었다. 이러한 호안들은 2000년대에 들어서 친환경성의 중요도를 강조함에 따라 환경적이며, 경제적이고 동시에 수리적 안정성의 확보가 가능한 다기능적인 식생호안이 필요하게 되었다. 그러나 평떼, 식생매트의 공법은 돌망태, 콘크리트 블록 등에 비교하여 시공실적이 적어 부적합한 공법 도입사례가 발생하였다(Chae *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2010). 따라서 국내에서는 이러한 수리적 안정성과 친환경적인 호안을 구축하기 위해 자연형 호안 공법에 대한 연구가 1990년대 중반부터 시작되었는데, 환경부 선도기술개발사업의 일환으로 진행된 국내 여건에 맞는 자연형 하천공법의 개발을 기반으

로 국내에 본격적으로 자연형 호안 공법이 도입되기 시작하였다.

국내에서 수행된 호안과 관련된 연구는 크게 소류력을 산정하거나 개수로 바닥에 설치된 호안모형을 통하여 호안의 파괴에 미치는 물리적 인자 및 수리학적 안정성을 평가하기 위한 연구가 진행되었으며, 식생호안과 관련해서는 식생에 의한 흐름특성과 하도와 식생과의 상관관계 등에 대한 연구가 이루어졌다.

우선 수리모형실험을 통한 수리적안정성과 관련된 연구로 Rhee *et al.*(2007)은 국부 유속과 국부 전단 응력에 대하여 현장실험과 수로실험을 수행하여 치수안정성과 환경성의 검토 및 적용범위를 제시하였으며, Kim *et al.*(2008)은 저수호안에 작용하는 외력들에 대해 호안의 안정성을 분석하였고, Lee *et al.*(2008)은 개수로 수리모형실험을 통하여 콘크리트 식생블록의 수리적 안정성을 분석하였다. 또한 Han과 Choi(2012)은 경사를 갖는 점착성 제방 단면의 구간별 소류력 공식을 제안하여 호안의 식생밀도와 공법 재료변화에 따른 허용소류력을 산정하였으며, Chae *et al.*(2010)은 친환경적인 식생복토 공법의 유실을 평가에 관해 수리모형 실험을 통해 수리적 안정성을 연구하였고, Han *et al.*(2010)은 식생매트 설치여부에 따른 토양유실율의 비교를 통해 수리학적 조건에 따른 토양의 유실을 및 수리적 안정성을 평가하였다. 다음으로 식생호안과 관련된 연구로 Woo *et al.*(1999)은 국내 하천 환경에 적합한 생물 재료를 활용한 저수호안 공법의 개발을 연구하였으며, Chung과 Kim(1999)은 하천의 미세지형을 구분하고 각 미세지형별 식물의 분포를 파악함으로써 홍수로 인한 교란발생 후 식생 회복에 대하여 연구하였다. Cho와 Lee(1997)은 수리특성변화 해석기법을 이용하여 도시하천의 고수부지에 식생에 따른 홍수위 상승효과를 검토하였으며, Rhee *et al.*(2004)은 수로에 자연식생을 식재한 수리실험을 통하여 자연 식생의

영향을 받는 흐름에서의 유속 분포의 특성을 분석하였다.

국외의 경우 하천 내 흐름저항과 관련하여 식생이나 수직 유속 분포 등을 산정하는 연구가 주로 이루어졌으며, Darby(1999)는 수위-유량 관계를 모의할 수 있는 1차원 수리 모형을 통해 식생 피복 면적과 현장에서 직접 관측한 주요 식생 줄기의 특성을 이용하여 홍수위를 예상하도록 하였으며, Fiuza와 Skogerboe(1983)는 홍수조절수로에 안정성 실험을 통해 수리학적 흐름조건에 따른 유속, 소류력, 변형 등에 대한 안정성을 검토하였고, Richard Jeffries *et al.*(2003)은 홍수 시 범람원에 분포하는 Large woody debris(LWD)의 효과를 보기위해 실내 모형실험을 진행하였으며, 범람원의 지형, 식생, 유속 등과의 상호작용을 검토한 결과 부착물의 높은 변수패턴은 범람원 표면에 지형 및 유기물질의 결합효과에 의해 설명되어진다고 하였다.

이와 같이 국내 및 국외에서 진행되고 있는 호안과 관련된 연구는 하천의 흐름특성에 따른 식생이나 수직 유속 분포 등을 산정하는 연구가 진행되어 왔으며, 기반재의 기능개선에 따른 수리특성 및 토양유실의 양상을 체계적으로 분석한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 즉, 현재까지 수리적 안정성을 이유로 실무에서 식생매트나 블록 설치 공법이 아닌 주기반재의 네트화로 인한 호안녹화시의 수리적 안정성에 관하여 연구된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 내침식성이 있는 호안녹화기반재의 수리적 안정성 연구와 식생 활착 유무에 따른 토양 유실율을 검토하고자 한다. 이에 저수호안에 작용하는 외력들에 의한 호안의 안정성을 보기 위하여 유속에 따른 소류력과 수충력을 예상하였으며, 식생의 활착 유무에 따른 세굴영향을 비교하여 유실율에서 취약 부분을 평가 및 분석하고자 하였다.

## II. 이론적 고찰

### 1. 유형별 외력의 특성 및 적용

하천호안에 작용하는 외력들은 하천의 수리적 안정성을 결정하는데 가장 중요한 요소로서, 외력들 중에서 유수에 의한 소류력과 항행하는 선박에 의한 항주파는 호안의 안정성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 항목들이다(Kim *et al.*, 2008).

본 실험에서는 수조에서 회전자(rotor)를 회전시켜 회전방향의 흐름( $V_1$ ), 중앙에서 벽체방향의 흐름( $V_2$ ) 등을 발생시켰으며, 각각의 흐름

에 의해 발생하는 외력을 산출하기 위한 힘의 조건 및 유형은 Table 1과 같다.

이와 같이 본 실험에서는 수조에서 발생할 수 있는 4가지 조건의 외력 중에서 실측에 의해 유속을 측정하여 산출한 F1과 F3을 적용하였다. F1은 유속에 의한 운동에너지로서 호안에 작용하는 소류력의 원인이며, F3은 바람이나 배에 의해 발생하는 파랑으로 인한 수충력의 원인이다.

본 실험은 물의 무게와 속도, 중력이 동시에 작용하는 실험으로서 유속에 의한 소류력과 수충력을 함께 고려하였다. 즉, 수충력은 수리모

**Table 1.** A force generated by the experiment and a position of base materials in laboratory equipment.

Force (F)	Calculation grounds	Applied formulas	A position of base materials in laboratory equipment
F1	<ul style="list-style-type: none"> <li>A force generated by the complex force (<math>V_1</math>) occurring at specific point of base material by the flow of water in rotational direction.</li> <li>A force generated by the water velocity in actual rivers</li> <li>In this test, it was estimated by measuring actual velocity (<math>V_1</math>) at a specific location of the base material</li> </ul>	$F1 = 1/2 M V_1^2$	
F2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Centrifugal force. An outer (toward wall) side force occurring at a specific location of the base material by the flow of water in rotational direction.</li> <li>A force that can occur at the curve of actual river</li> <li>In this test condition, it was estimated by measuring <math>V_1</math></li> </ul>	$F2 = M V_1^2/r$	
F3	<ul style="list-style-type: none"> <li>A force interacting toward wall from the center of the experimental tank</li> <li>In actual river, it is a force interacting with the revetment by the ship wave occurred by the movement of wind or ship</li> <li>In this test, F3 was estimated by assuming measured <math>V_2</math> as the ship wave.</li> </ul>	$F3 = 1/2 M V_2^2$	
F4	<ul style="list-style-type: none"> <li>An external force generated by reflection of F3 at the wall of the experimental tank.</li> <li>In this study, it was excluded as it is blocked by the protective frame of the base material.</li> </ul>	exclusion	

형실험의 수압계에서 측정되는 동수압과 같은 값으로써, 수압계에서 측정된 수치(동수압)는 순간적인 압력을 본 것이므로 수충력과 연관 지을 수 있다. 그러나 수충력의 경우 물의 외력방향, 온도, 재료, 각도 등의 요인에 따라 달라질 수 있기 때문에, 소류력과 같이 기준을 표준화시키기 매우 어렵다. 따라서 실무에서도 계산에 의한 정확한 소류력 및 수충력의 산출이 곤란하기 때문에 경험치 등으로 산출하게 되며, 본 공법에서도 수리모형실험의 한계에 의하여 상사법칙을 고려하지 않고 실험결과에 대한 경향성으로 판단하였다.

## 2. 평균유속 및 평균 소류력 산정

일반적으로 국내 호안 설계는 평균 유속과 평균 소류력을 이용하여 이루어진다. 유속이 커지면 하천호안의 토사와 자갈을 밀어내리는 소류력이 더 크게 작용하므로 이 둘의 상관관계를 이해하여 본 실험에 적용하고자 하였다.

호안에 미치는 소류력을 예상하기 위하여 식 (1.1)과 같이 수면으로부터 측정수심까지의 비가 0.2, 0.8인 지점의 유속을 측정하여 평균유속을 도출하였다.

$$V_m = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2} \quad (1.1)$$

여기서,  $V_m$  은 평균유속,  $V_{0.2}$ ,  $V_{0.8}$ 은 각각 수면아래 수심의 20% 및 80% 지점의 유속이다. 일반적으로 수심이 60cm 이상 1m 이하의 범위에서 사용되며(Ceon *et al.*, 2010), 수심 1m 미만인 본 실험에서는 위의 공식을 적용하였다.

## III. 연구재료 및 방법

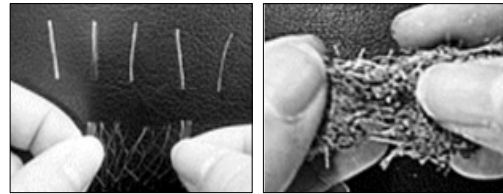
### 1. 연구재료

본 연구의 호안녹화기반재는 황토, 토탄, 우드칩 등의 자연재료에 균열저감, 내알칼리성을 향상시키는 네트화이버(PVA섬유)를 첨가하여

**Table 2.** Physical properties of the Netfiber.

Articles	Properties
Density(g/cm <sup>3</sup> )	0.91
Diameter(mm)	0.07
Length(mm)	19
Melthing point(°C)	162
Toughness(MPa)	450
Acid resistance	good
Alkali-resistance	good
Tensile strength(MPa)	560
Elastic modulus(MPa)	3600~18000

Source : Xu, N. *et al.*, 2003.



**Figure 1.** A structure(left) and bonding strength(right) of the Netfiber.

기반재를 개선하였다(Table 2). 본 재료를 기반재에 적용하기 전에 기존 호안녹화기반재와 비교하여 물성치의 개선정도를 파악하고자 하였으나, 유사재료를 활용한 공법의 부재로 인하여 특정 기반재와 비교하는 것은 어려우므로 네트화이버의 물성치만을 제시하였다.

네트화이버는 합성고분자로서 생분해성, 생물학적 적합성 그리고 물리적 특성 때문에 다양한 용도로 활용이 가능하며, 주로 광산이나 터널의 숏크리트에 사용되는 재료이나 본 실험에서는 이를 적용하여 호안용 녹화기반재의 안정성을 검토하고자 하였다(Shan *et al.*, 2011).

Figure 1과 같이 네트화이버 섬유는 굵어지거나 물결 모양의 독특한 구조적 특징은 수소반응을 통해 토양 내 금속이온과 부착하여 결속력을 강화하고(Xiaozhi *et al.*, 2011), 비식생의 토양과 결합하여 단단히 고정시키는 역할을 하므로 PVC 코팅망, 천연섬유네트 등의 보조

재료없이 하천호안에 취부 가능할 것이라고 판단하였다.

**2. 실험개요 및 과정**

모형실험은 충남 천안시 상명대학교 온실에서 실시하였으며, 2011년 8월부터 11월까지 4개월에 걸쳐 진행하였다. 실험구는 0.3m×0.3m×0.12m 크기의 스테인레스 단위셀에 제작하였으며, 식생상태의 실험구는 양잔디(Perennial Rygrass)를

파종한 후 3개월 동안 재배하였다. 국토해양부의 ‘도로비탈면녹화공 설계 및 시공지침(Ministry of Land, 2009b)’에 의하여 각 실험구는 식물의 근계생장에 적당한 18~23mm의 동일한 경도를 나타내고 전체 피복율이 80% 이상이 될 때까지 평균기온 18~21°C를 유지하여 자연 상태로 그늘에서 24시간 건조하였다.

홍수 시 급류를 모방한 원형모형실험장치의 수심은 1m 미만으로 설정하고 하천호안의 역할을 하는 실험구는 경사도 45°로 설치한 후 토양 유실율의 변화를 관찰하였다(Figure 2, 3). 동수압 및 유속은 1시간 단위로 수압계 및 유속계를 이용하여 측정하였다. 실험은 기반재만 취부된 비식생상태와 잔디가 피복된 식생상태에서 두 차례에 걸쳐 진행하였으며, 토양의 유실율은 실험 사진 촬영 후 가로, 세로 각각 10칸으로 나누어 전체 Grid를 구성하고 침식정도(토양의 유실율)를 계산하였다.

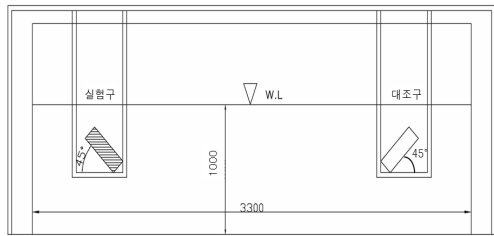


Figure 2. A position of base materials in laboratory equipment.

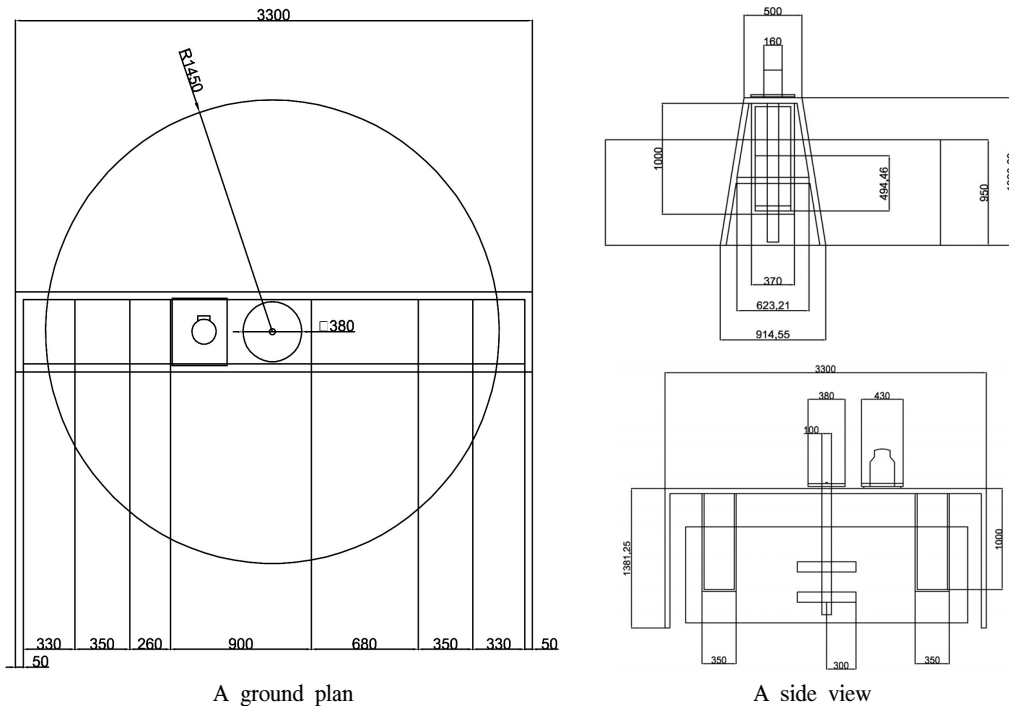


Figure 3. A diagram of laboratory equipment.

### 3. 실험조건

실제 자연 현상을 실험실에서 재현시키려면 물리 모형은 기본적으로 원형과 모형의 길이 비율이 모두 같아야 하는 기하학적 상사와 원형에 작용하는 힘과 모형에 작용하는 힘의 비율이 모두 같아야 한다는 역학적 유사성을 동시에 만족시켜야 한다. 그러나 대부분의 경우 기하학적 상사는 비교적 쉽게 달성할 수 있으나, 역학적 상사는 원형과 모형에 작용하는 힘의 종류가 많을수록 달성하기 어렵고 그 결과의 해석도 많은 변수에 의해 신뢰성과 타당성이 낮아지는 경우가 많다(Woo, 1999).

특히 수로 실험은 수로의 규모가 일반적인 하천에 비해서 작으므로 하천의 평균 유속이나 평균 소류력에 의한 영향을 실험을 통해 실질적으로 확인하기는 어렵다(Rhee *et al.*, 2007). 대신 수로 실험을 통하여 산정되는 평균 유속을 이용하여 실제 하천에 대한 국부 유속(local velocity)과 국부 소류력(local tractive force)의 영향을 확인하였다. 일반적인 호안 실험은 상사 이론에 기초하여 모형실험을 수행하지만, 본 연구에서는 실제 식생에서의 모형과 원형 사이의 상사를 구현하는 것이 실질적으로 어렵기 때문에 원형 실험을 수행하였다.

즉, 본 실험의 목적이 내침식성 특성을 지닌 기반재가 하천에서 작용하는 일정한 유속의 급류에 대한 내침식성이 있다는 결과를 보기 위함 이므로 역학적 유사성은 고려하지 않았으며, 하천 및 호수 등의 침수조건 및 강우조건에서도 양호한 식생기반재 기능을 가짐을 증명하고자 하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 식생 유무에 따른 토양유실을 산정

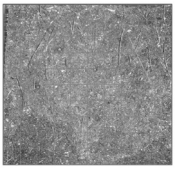
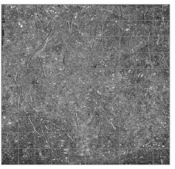
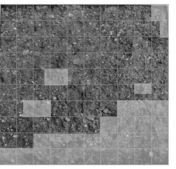
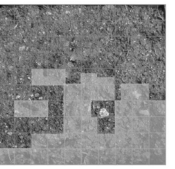
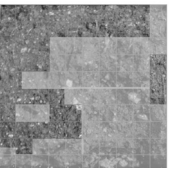
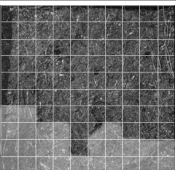
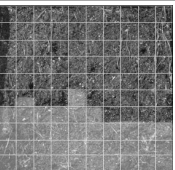
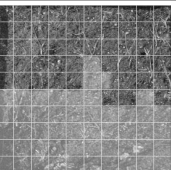
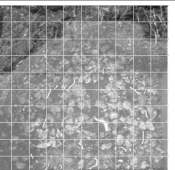
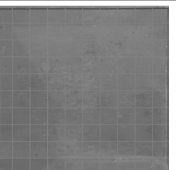
본 연구에서는 측정오차를 줄이기 위하여 회전자 작동 후 약 10분이 경과된 시점에 등류수심을 확보한 상태에서 기반재의 각 지점별 3회

를 측정하여 평균값을 구하였다. 측정된 평균값을 바탕으로 유속 및 수압변화를 분석하였으며, 이와 같은 평균 유속이 특정 지점을 대표할 수 있는 유속으로 간주하여 기반재의 유실율(호안 녹화기반재의 침식정도)을 계산하였다.

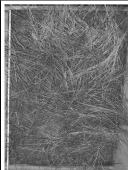
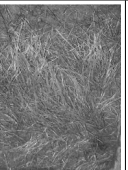
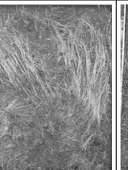
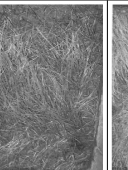
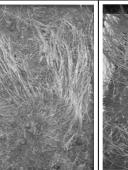
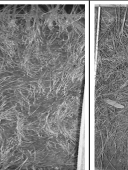


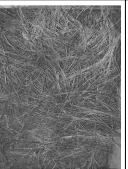
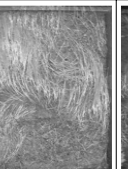
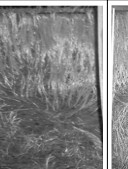
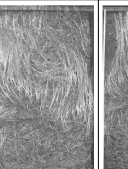
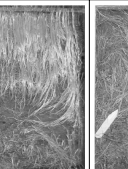
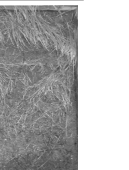
먼저 비식생상태의 호안녹화기반재와 건식녹화기반재를 대상으로 실험한 결과, 호안녹화기반재는 실험설치 이후 2일째까지 유실되지 않았고, 3일째에는 30.2%, 4일째에는 37.3%, 5일째에는 58.2%의 유실율을 나타내었다. 반면 건식녹화기반재는 실험설치 이후 1일째에는 표면이 26.5%, 2일째에는 37.5%, 3일째에는 49.5%, 설치 후 4일째에는 80.5%로 대부분이 유실되었으며, 5일째에는 완전 유실되었다(Table 3). 이는 건식녹화기반재의 토양입자 사이로 침투되는 흐름의 소류력으로 인해 불규칙적인 세굴이 발생되었음을 알 수 있다. 이와 같은 실험으로 기반재 유실 방지효과는 호안녹화기반재에서 양호한 것으로 확인되었으며, 기반재 내 네트화 이머가 토양입자와 결합하여 유속 및 수압에 저항하는 힘이 높아졌기 때문인 것으로 보여진다.

두 번째 실험은 잔디로 피복된 호안녹화기반재와 건식녹화기반재를 설치하여 기반재가 유실될 때까지 유속을 점점 높여가며 파랑을 발생시켰다. 대부분의 경우 식생은 비탈면의 안정에 기여하므로 식생을 조성하는 것이 합리적이라 할 수 있으며 이러한 사실에 근거하여 더 효과적인 결과를 도출해내기 위하여 추가실험을 진행하였다. 앞선 실험결과 호안녹화기반재는 비식생상태에서 높은 내침식성을 나타냈으므로 식생상태에서도 높은 강도를 보일 것으로 기대되었다. 실험결과, 설치 후 7일이 경과할 때까지 두기반재 모두 토양의 유실이 전혀 일어나지 않았다(Table 4). 이는 Kim *et al.*(2010)이 실제 하천에서 저수호안의 연평균 침수기간이 1년 중 약 6일로 분석한 결과와 Shin *et al.*(2012)의 연구에서 적용하안 전체가 침수된 일수가 7~9

**Table 3.** Rate of soil loss after the experiments in original ground condition.

Degree of soil loss at green revetment media					
Observation time	1st day	2nd day	3th day	4th day	5th day
Loss rate	No loss of soil	No loss of soil	30.2%	37.3%	58.2%
Degree of soil loss at dry green revetment media					
Observation time	1st day	2nd day	3th day	4th day	5th day
Loss rate	26.5%	37.5%	49.5%	80.5%	100%

**Table 4.** Rate of soil loss after the experiments in vegetation condition.

Degree of soil loss at green revetment media							
Observation time	1st day	2nd day	3th day	4th day	5th day	6th day	7th day
Loss rate	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil
Degree of soil loss at dry green revetment media							
Observation time	1st day	2nd day	3th day	4th day	5th day	6th day	7th day
Loss rate	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil	No loss of soil

**Table 5.** Degree of soil water content in green revetment media and dry green revetment media (Unit : %).

Item	Order	Primary	Secondary	Tertiary
	Green revetment media	Range	24.2 ~ 29.5	21.1 ~ 27.7
Average		28.3	24.3	21.4
Dry green revetment media	Range	22.4 ~ 27.7	10.1 ~ 18.1	5.6 ~ 7.8
	Average	24.7	12.9	6.2



일이었으며 이때의 식물의 출현종수와 피복도가 낮게 도출된 결과와 비교해보았을 때, 7일간 침식이 발생하지 않았다는 실험 결과는 두 기반재가 장기간 침수 및 강우조건에 내침식성을 지니고 있는 것으로 사료된다.

그러므로 호안녹화기반재는 비식생상태에서 건식녹화기반재와 비교하여 토사유출방지 기능을 발휘하지만, 식생이 정착한 이후에는 두 기반재의 유실을 차이는 미비한 것으로 보인다. 그러나 저수호안에서 수리적 안정성을 확보하기 위해서는 홍수기 이전에 식생의 조기정착이 요구되는바, 두 기반재의 식생정착 정도를 도출하기 위하여 취부직후 수분함량을 측정하였다. 측정결과, 호안녹화기반재에서는 1차 28.3%, 2차 24.3%, 3차 21.4%로 수분함량의 감소정도가 완만하게 진행되고 있으나, 건식녹화기반재에서는 1차 24.7%, 2차 12.9%, 3차 6.2%로 급격히 낮아지는 것으로 나타났다(Table 5). 이는 본 기반재가 수용성 고분자 수지로 재료표면에 피막을 형성시킴으로써 수분증발을 억제하여 품질이 개선된 것으로 판단된다. 일반적으로 수분함량이 낮으면 강도가 높아지는데 본 측정결과에

서는 건식녹화기반재와 비교하여 수분함량은 더 높게 나타났는데 반하여 낮은 토양유실율을 확인할 수 있었다. 이는 현장 시공지에 비해 실험구 단위셀의 두께가 상대적으로 얇은 점을 고려하면 현장 적용 시 더 높은 토양수분을 지닐 것으로 보인다. 따라서 본 호안녹화기반재는 수리적 안정성과 더불어 종자발아를 위한 수분조건 역시 양호하게 나타나 생태적 측면에서도 우수하다고 판단된다.

**2. 식생 유무에 따른 소류력 · 수충력 산정 및 상관성**

비식생상태에서 호안녹화기반재의 유속은 3일째까지는 증가하다가 다시 감소하였으며, 건식녹화기반재는 2일째를 제외하고는 유사하게 나타났다. 동수압은 두 기반재에서 거의 일정하게 유지되어 유속의 증감에 따른 동수압의 관련성은 나타나지 않았다(Table 6).

반면 식생상태에서 유속 및 동수압과의 연관성을 분석한 결과, 두 기반재의 유속은 5일째 다소 감소하였으나 전반적으로 유속이 증가할수록 동수압은 다소 증가하는 경향을 보였다

**Table 6.** Change of velocity and dynamic fluid pressure at green revetment media and dry green revetment media in original ground condition.

Classification		1st day	2nd day	3th day	4th day	5th day
Velocity (m/sec)	Green revetment media	0.64	0.68	0.71	0.69	0.68
	Dry green revetment media	0.71	1.04	0.77	0.74	0.75
Dynamic fluid pressure(kg/cm <sup>2</sup> )	Green revetment media	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	Dry green revetment media	0.13	0.13	0.14	0.14	0.14

**Table 7.** Change of velocity and dynamic fluid pressure at green revetment media and dry green revetment media in vegetation condition.

Classification		1st day	2nd day	3th day	4th day	5th day	6th day	7th day
Velocity (m/sec)	Green revetment media	0.70	0.75	0.80	0.85	0.72	0.88	0.80
	Dry green revetment media	0.74	0.80	0.88	0.89	0.76	0.80	0.88
Dynamic fluid pressure(kg/cm <sup>2</sup> )	Green revetment media	0.40	0.47	0.53	0.58	0.64	0.67	0.70
	Dry green revetment media	0.44	0.40	0.52	0.52	0.64	0.64	0.67

(Table 7). 그러나 토양의 유실은 일어나지 않았으며, 유속이 증가할수록 토양의 유실율도 증가할 것이라는 기존의 연구와는 다른 결과를 나타내었다. 또한 토사사면일 때 보다 식생이 있는 블록에서 59.7%~75.4%의 유속저감효과와 토사 유출저감 효과가 있었다는 Yang *et al.*(2006)의 연구와도 비슷하였다. 따라서 식생이 발달한 경우 뿌리조직의 발달로 인하여 유속에 대한 저항력이 높아지므로 하천호안 조성 시 식생이 활착된 상태를 유지하여 홍수 시 침수에 대비하여야 할 것이라고 생각된다.

소류력과 관련해서는 Fortier와 Scobey(1926)는 수로의 설계에서 허용유속(permissible velocity)이라는 개념을 도입하여 사립자의 입경별 침식되지 않는 최대유속 자료를 제시하였는데, 잔모래로 된 수로의 허용 유속은 0.45m/s이고, 잔자갈의 경우 허용유속은 유사 이송이 없으면 0.75m/s로 제시하고 있다.

이와 비교해 보았을 때 실트질모래(SM) 및 점토질모래(SC)로 구성된 호안녹화기반재는 비식생상태에서 0.68m/s, 식생상태에서 0.79m/s로서 잔모래 기준보다 빠른 유속에서도 내침식성을 나타내었다. 그러나 소류력과 관련하여 사용된 수리실험의 조건들이 서로 상이하고 어떤 연구자의 식이 보다 합리적인지에 대한 일치된 견해는 찾을 수 없었다.

그러므로 본 연구에서 실측된 유속으로 소류력을 분석해보았을 때, 본 기반재는 식생상태에서 소류력에 대해서는 안정하다고 판단할 수 있으나 비식생상태에서는 작은 소류력에 대해서도 세굴이 발생할 수 있으며, 실제 하천호안에서는 다른 외력과 중첩되어 더 큰 침식이 발생할 수 있을 것이라고 예상된다. 또한 동수압은 기반재에 순간적으로 압력을 주는 수충력으로서 식생상태에서 시간이 경과할수록 일정하게 증가한데 반하여 토양의 세굴현상은 일어나지 않았다. 그러므로 본 실험에 적용한 기반재는 물의 흐름에 의한 소류력과 수충력에 대하

여 수리적 안정성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 저수호안에 네트화이버를 첨가한 녹화토 취부기술에 대한 수리적 안정성을 분석하기 위해 수리모형실험을 실시하였다. 실험을 통해 공법의 취부 여부 및 식생의 유무에 따른 토양의 상대적 유실율의 차이를 확인할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 식생이 존재할 경우 유속저감효과에 효율적이었으며, 비식생상태일 때 본 호안녹화기반재를 적용한 경우에는 토사유출 방지효과가 상대적으로 양호하게 나타났다. 다만 건식녹화기반재와 비교하여 식생상태일 때 본 기반재의 효율성은 크게 나타나지 않았는데, 실제 하천 적용에 있어서 홍수기 이전의 식생 조기정착에 따른 호안 안정성을 고려하면 수분함량은 더 높게 나타난데 반하여 낮은 토양유실율을 나타낸 호안녹화기반재가 호안의 안정성을 향상시킬 것으로 기대된다.

둘째, 식생 유무에 따른 토양의 유실율은 식생상태에서 기반재의 유실이 발생하지 않은 것으로 보아 유속 및 동수압에 저항성을 지니고 있는 것으로 보이며, 하천호안 조성 시 식생이 활착된 상태를 유지하여 홍수 시 소류력과 수충력에 대한 저항력을 증가시켜 호안부의 안정화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 실험결과로 미루어 볼 때, 자연형 하천호안에 공법적용 시 수리적 특성 및 식생특성을 고려하여 설계하는 것이 호안의 안정과 환경 친화적인 면에 있어서 효과를 극대화시킬 수 있을 것이다.

이와 같이 실내실험을 통하여 수리적 안정성을 검토하였으나, 본 연구에서와 같이 소규모의 실내실험에서는 구현할 수 있는 흐름 조건의 한계와 실험에 사용한 재료들이 모형이었다는 점에서 실제 하천호안에서 일어나는 현상과는 차

이가 날 수 있다. 즉, 실험실에서 얻을 수 있는 흐름 조건의 한계 때문에 실제 홍수시의 하천 유속에 대하여 안정성이 보장된다고 할 수는 없다. 그러나 설계 유속 재현이 가능한 초대형 수리 실험장에서의 실험을 통하여 보완이 가능할 것으로 판단되며, 본 연구에서 수행된 실험결과를 활용하여 저수호안의 설계에 있어 홍수 시 빈번히 발생하는 식생호안의 이탈을 방지하는 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 인 용 문 헌

- Ceon, I. K. · Kim, G. S. · Nam, I. G. · Park, S. C. and K. Y. Lee. 2010. management practice of stream. donghwapub.
- Chae, D. S. · Kim, Y. D. · Park, J. H. and Kim, C. 2010. An experimental study on soil loss rate of recovery soil technique at high water revetment. The journal of korean society of hazard mitigation. 10(2) : 135-141.
- Cho, H. J. and Lee, J. Y. 1997. Analysis of the Flood level changes by the vegetation on the floodplain of urban river. Koran society of civil engineers, The collection of dissertations 17(2-4) : 309-318.
- Chung, K. J. and Kim, D. Y. 1999. Effects of microphotography on the development of riparian vegetation in stream corridors. The journal of korean institute of landscape architecture. 27(4) : 39-49
- Darby, S. E. 1999. Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(5) : 443-454.
- Fiuzat, A. A. and Skogerboe, G. V. 1983. Comparison of open channel conriction ratings. *J. of Hydraulic Engineering*. 109(12) : 1589-1602.
- Fortier, S and Scobey, F. C. 1926. "Permissible Canal Velocities", Transactions, ASCE, 89 (1588).
- Han, E. J. · Hwang, S. D. · Kim, Y. D. · Park, J. H. and Kim, C. 2010. A study on hydraulic stability of vegetation mat method on high water revetment. The journal of koran wetlands society. 12(2) : 75-89.
- Han, M. S. · Choi, G. W. and Kim, W. J. 2010. Study for analysis of hydraulic characteristic of close-natural revetment technique. The collection of dissertations in conference of korea water resources association. 2010(5) : 704-708.
- Han, M. S. and Choi, G. W. 2012. A suggestion of formulae to calculate sectional tractive force on the slope of cohesive river bank and its application. The journal of korea water resources association. 45(6) : 583-596.
- Kim, C. · Park, N. H. · Kim, D. Y. and Kim, Y. H. 2008. Stability analysis of low flow revetments on external forces. The Journal of korean society of hazard mitigation. 8(5) : 147-153.
- Kim, N. W. · Chung, I. M. · Lee, J. W. · Yoo, S. Y. and Kang, S. H. 2010. Analysis on Ecohydrological component for natural riparian restoration. The conference of korea water resources association. 2010(10) : 1365-1369.
- Lee, J. P. · Park, E. J. · Choi, K. H. and Kim, C. 2008. Hydraulic stability analysis of revetments using hydraulic model test. The collection of dissertations in conference of korea water resources association. 2008(5) : 1867-1873.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2009a. River design standard. Korea water resources association.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

- 2009b. design and construction guide in revegetation works of the road side slope.
- Rhee, D. S. · An, H. K. · Woo, H. S. and Kwon, B. A. 2007. Application and evaluation of new vegetational revetment method considering hydrologic stability and environment effect. Jour. kor. water resources association. 40(2) : 125-134.
- Rhee, D. S. · Woo, H. S. and Kwon, B. A. 2004. An experiment research about velocity profiles of flows affected by natural vegetation. Koran society of civil engineers, The collection of dissertations. 2004(10) : 3364-3368.
- Richard Jeffries. Stephen E Darby, David A Sear. 2003. The influence of vegetation and organic debris on flood-plain sediment dynamics : case study of a low-order stream in the New Forest, England. Geomorphology 51(1-3) : 61-80.
- Shan Jiang, Sha Liu, Wenhao Feng. 2011. PVA hydrogel properties for biomedical application. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 4(7) : 1228-1233.
- Shin, B. K. · Kim, H. J. · Choi, G. W. and Han, M. S. 2012. A study on the effect of water level and inundation period on the plant coverage of revegetation methods of stream bank in the coastal reclaimed land -focus on a case of the test-bed of the simgok stream in Incheon-. Kor. J. Env. Eco. 26(3) : 437-445.
- Woo, H. S. 1999. publication productivity and current research trends of fluvial sediment in the recent decade(1). The journal of korea water resources association. 32(6) : 128-143.
- Woo, H. S. · Lee, J. W. · Lee, D. H. and Park, J. R. 1999. Evaluation of vulnerability resistance using biological materials for low flow revetments. The journal of korean society of civil engineers. 47(11) : 71-80.
- Xiaozhi Tang and Sajid Alavi. 2011. Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. carbohydrate Polymers. 85 (1) : 7-16.
- Xu, N. · Zhou, D. · Li, L. · He, J. · Chen, W. · Wan, F. and Xue, G. 2003. Physical Properties of PVA/PSSNa Blends. Journal of applied polymer science. 88(1) : 79-87.
- Yang, J. Y. · Kim, S. Y. and Kim, J. H. 2006. Hydraulic stability review of continuous block on the vegetation rooting and defense of washout. Koran society of civil engineers, The collection of dissertations. 2006(10) : 2007-2010.