

## 치수 안전성과 환경성을 고려한 새로운 식생호안 공법의 적용 및 평가

### Application and Assessment of New Vegetation Revetment Techniques Considering Safety against Flood and Environmental Performance

이 동 섭\* / 안 홍 규\*\* / 우 효 섭\*\*\* / 권 보 애\*\*\*\*

Rhee, Dong Sop / Ahn, Hong Kyu / Woo, Hyoseop / Kwon, Bo Ae

#### Abstract

The objective of this study was to investigate the applicability of new vegetation revetment techniques. The applicability of revetments was confirmed with respect to flood safety as well as environmental consideration. The safety against flood was examined through an in situ experiment at Dong-moon Stream located in Paju and a laboratory experiment. The environment-friendly characteristics of revetments were analyzed by using the results of a 2-year in situ monitoring. It was found that the revetments investigated in this study had a safety capability against floods and high vegetating capability. Application ranges of design factors were suggested for each revetment developed in this study.

**keywords** : vegetation revetment, safety against flood, environmental performance

#### 요 지

본 연구의 목적은 치수안정성을 고려하여 새롭게 개발된 식생 호안 공법들의 적용성을 검토하는 것이다. 호안의 적용성은 치수 안전성과 환경성의 두 가지 측면을 통하여 검토되었다. 치수 안정성은 파주시에 위치한 동문천에서의 현장 실험과 수로 실험을 통하여 검토하였으며, 환경성은 동문천 시험 시공 지점에 대한 2년간의 식생 모니터링 결과를 분석하여 검토하였다. 연구 결과 개발된 식생 호안 모두 적절한 치수 안전성과 우수한 녹화능력이 있는 것으로 나타났다. 실험 결과 분석을 통하여 평균 유속과 평균 소류력에 대하여 개별 호안의 최대 적용 범위를 제시하였다.

**핵심용어** : 식생 호안 공법, 치수 안전성, 환경성

\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원

Researcher, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

(e-mail: dsrhee@kict.re.kr)

\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구위원

Senior Research Fellow, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

\*\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원

Researcher, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, Korea

## 1. 서론

홍수로부터 제방을 보호하기 위하여 일반적으로 제방 사면에 호안을 설치한다. 설계 홍수량의 규모가 작거나, 상대적으로 규모가 작은 하천에는 호안이 설치되어 있지 않는 경우도 있지만, 국내에서는 호안을 설치하는 것이 일반적이다. 지금까지 호안은 치수의 목적을 위해 강도가 높은 콘크리트 호안을 많이 사용해 왔으나, 최근 사회적 요구로 인하여 자연형 호안을 급격하게 하천에 도입하고 있다. 그러나 자연형 호안은 환경성은 대체로 보장이 되지만 치수 안정성 측면에서는 그 성능이 의문시 되어온 것 또한 사실이다. 자연형 호안을 하천 현장에 적극적으로 도입하고자 하는 노력은 국내에서 정성적인 모니터링 연구를 통하여 반영되어왔지만, 이러한 노력은 하천 설계자들로 하여금 자연형 호안을 객관적인 기준을 가지고 택할 수 있는 수준에까지는 도달하지는 못했다. 모형화가 어려운 식생 호안을 대상으로 적절한 설계 기준치를 제시하는 것은 상당히 어려운 일이며, 이미 도입된 호안 공법들도 국내 하천 조건에 적합한 지 검증되어 있지 않은 경우가 많고, 대부분 경험적으로 사용되고 있다.

국내에서 자연형 호안 공법에 대한 연구는 1990년대 중반부터 시작되었는데, 환경부 선도기술개발사업의 일환으로 진행된 국내 여건에 맞는 자연형 하천공법의 개발(한국건설기술연구원, 2001)을 기반으로 국내에 본격적으로 자연형 호안 공법이 도입되기 시작하였다. 연구가 진행되는 동안 우효섭 등(1999)은 국내 하천 환경에 적합한 생물 재료를 이용한 저수 호안 공법을 소개하였다. 이러한 연구는 정성적인 모니터링 성과를 기반으로 소개되어 하천 설계에 직접적으로 적용할 수 있는 설계 인자를 적절히 제시하지 못하였다. 따라서 자연형 호안

공법을 실제 하천에 적용하기 위해서 적절한 설계 인자를 제시하는 것이 시급하며, 이에 대한 하천 설계자들의 요구도 점차 증가하고 있다. 국내의 경우 호안 설계는 단면 평균 유속( $V$ )과 평균 소류력( $\tau_0$ )을 기초로 이루어지기 때문에, 특히 이러한 요소들에 대하여 자연형 호안 공법에 대한 설계 기초 자료를 제공하는 것이 필요하다.

본 연구의 목적은 2001년부터 2004년까지 환경부의 지원을 받아서 수행된 하천 생태 기능 복원을 위한 핵심 기술 개발 과제(한국건설기술연구원, 2004)에서 개발된 자연형 식생 호안들의 적용성을 검증하는 것이다. 이를 위하여 치수 안전성은 현장 실험과 수로 실험을 동시에 수행하여 검토하였다. 현장 실험은 문산천의 지류인 지방2급 하천 동문천에서 이루어졌는데, 문산천 합류점으로부터 1,100 m 상류 좌안 지점에 각 식생 호안 종류별로 50 m 씩 설치한 후 현장 실험을 수행하고 (Fig. 1 참조), 실험 결과를 유량 측정 자료와 동문천 문산1교 수위계의 수위 자료를 이용하여 분석하였다. 수로 실험은 길이 18 m 정도의 실험 수로를 제작하여 식생 매트에 대하여 실험을 수행한 후 그 결과를 유속과 수위 측정 자료를 이용하여 분석하였다. 환경적인 측면은 현장 실험 지점에 대한 모니터링을 수행하여 식생의 활차과 식물상 현황을 분석하여 검토하였다.

## 2. 연구 동향

하천 내에서 식생은 생물 서식처를 조성하며, 하천의 환경성과 심미성을 크게 증진시킨다는 장점을 가지고 있는 반면에, 수변 식생이 무성해질수록 하천의 통수능을 감소시키며 수위를 증가시켜 홍수의 위험성을 증가시킨다는 것이 단점으로 지적되어왔다. 따라서 하천 통

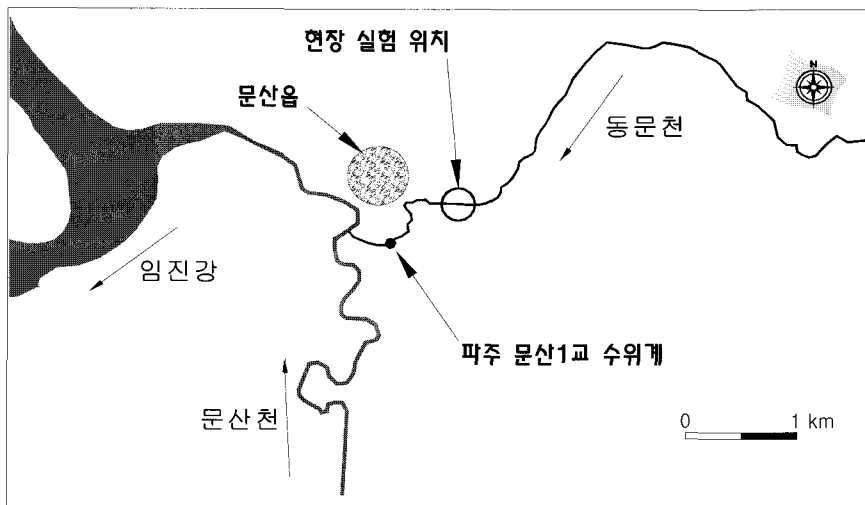


Fig. 1. The Location Map of On-site Experiments

수능을 유지하기 위하여 식생을 주기적으로 제거하여 관리하는 것은 하천의 관리 측면에서 중요하다. 이러한 식생 관리는 애써 복원한 생물 서식처를 훼손하고 하천의 심미적 가치를 저하시키게 된다. 최근 연구 결과에 의해서 수변 식생 성장에 의한 흐름 저항의 증가는 이전에 생각되는 것에 비해 비교적 작다는 것이 밝혀졌다(Masterman and Thorne, 1992; Darby and Thorne, 1996). 따라서 식생에 의한 흐름 저항을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다고 판단할 수 있으며, 개수로에서의 식생에 의한 흐름 저항에 대하여 수많은 연구가 이루어졌다(Kouwen and Li, 1980; Temple et al., 1987; Fathi-maghadam and Kouwen, 1997; Temple, 1999; Järvelä, 2002; Kirby et al., 2005). 이러한 연구들은 각 지역 하천에 발견되는 자연 식생을 대상으로 이루어졌으며, 실험적으로 식생의 조도 계수를 평가하였다. 일부 연구자들은 자연 식생 대신, 모형화된 인공 식생을 이용하여 식생 조도 계수를 평가하기도 하였는데, Wu 등(1999)은 고무 코팅된 말총 매트리스를 이용하여 홍수터 습지에서의 관목과 수풀을 모의하여 식생 조도 계수를 평가하였고, Stone and Shen(2002), Musleh and Cruise(2005)는 원기둥형 단단한 인공 식생 요소(cylindrical rigid elements)를 이용하여 침수 조건과 부분 침수 조건에 대하여 식생 흐름 저항의 효과를 평가하였다. 그러나 이러한 인공 식생은 그 특성이 실제 자연 식생과 매우 틀려 설계 목적으로 이러한 연구 결과를 활용할 수 없다는 단점이 있다. 이외에도 Kouwen (1992)은 상대 조도 계산 시 식생의 유연성을 고려하여 설명할 수 있는 새로운 식을 개발하여, 식생 수로 설계 시 사용가능한 침수 식생(submerged vegetation)에 대한 조도계수 예측 합리식을 제안하였고, Darby(1999)는 수변과 제방 사면에 식생이 자라는 단면이 변화하는 모래/자갈 하상 하천에 대하여 수위-유량 관계를 모의할 수 있는 1차원 수


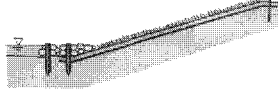

리 모형을 제시하였는데, 식생 피복 면적과 현장에서 직접 관측한 주요 식생 줄기의 특성을 이용하여 홍수위를 계산하도록 하였다.

일본의 경우에는 정밀한 수치해석과 분석적인 접근을 통해 흐름과 식생 줄기 간의 상호 작용을 모의한 Shimizu and Tsujimoto(1994) 외에도, 이미 식생을 이용한 제방 사면 내침식공법에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 望月 et al.(1997)은 하천제방에서 식생의 뿌리가 발휘하는 내침식성을 응용한 침식방지공법 개발을 위하여 수리모형실험을 수행하여, 제방 사면에 작용하는 유수의 강한 외력에 의해서도 식생이 잘 자라며 침식 방지에 기여한다는 것을 보였으며, 北川 et al.(1995)은 홍수 시 제방 월류부의 내침식 특성을 분석하기 위하여 수리실험을 시행하여 연구를 진행하였는데, 이를 통하여 식생이 내침식성에 기여하는 부분은 주로 뿌리이며 잎과 줄기는 보조적인 역할을 한다는 사실을 밝혀내었다. 일본 내에서 이루어진 이러한 일련의 연구 결과를 종합하여 日本 全國防災協會(2002)에서는 자연형 호안별 최대허용유속을 제시하였다. Table 1은 이 중 본 연구와 관련된 내용을 정리한 것이다.

자연형 호안 공법을 최초로 적용하기 시작한 독일에서도 이미 각종 자연형 호안에 대한 설치 기준을 마련하여 활용하고 있다. 이 중 본 연구와 관련된 내용을 Table 2에 정리하여 나타내었다.

국내의 경우 강형식과 최성욱(2001)은  $k-\epsilon$  난류 모형을 이용하여 식생 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동을 수치모의 하였으며, 최성욱 등(2003)에 의해서 인공 식생을 이용한 식생 개수로에서의 평균흐름 및 난류 구조, 전단속도 산정, 식생 개수로 흐름의 고유구조에 관한 실험 연구가 이루어졌다. 이와 같이 국내에서도 흐름에 대한 식생의 영향에 관한 이론적인 연구는 활발하게 이루어지고 있으나, 국외에서와 같은 실용적인 연구는 아직 부족한 편이다.

Table 1. Maximum Permissible Velocity for Each Revetment Technique (日本 全國防災協會, 2002)

Revetment Technique	Turf Patch	Geotextile	Block-Mat
Conceptual Diagram			
Maximum Permissible Velocity (m/s)	2.0	3.0	4.0

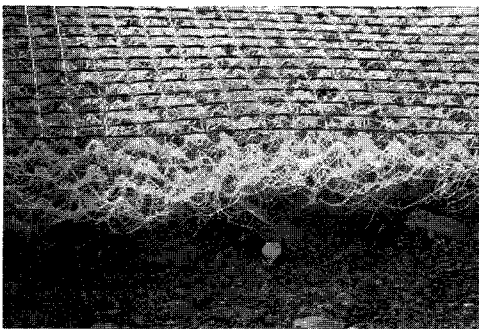
**Table 2. Maximum Permissible Velocity and Tractive Force for Each Revetment Technique (Hammann De Salazer and Dittrich, 1996)**

Revetment Technique	Permissible Velocity (m/s)	Permissible Tractive Force (N/m <sup>2</sup> )
Turf and Soil	~1.5	~30
Reeds/Perennial Plants/Coir Roll	2.0~2.5	55~65
Brush Fascine	2.5~3.0	60~70
Germinable Brush Fascine	3.0~3.5	100~150
Riprap and Live Willow Stakes	3.0~3.5	100~150
Live Willow Mattress	-	100~200 (Johannsen, 1988)

### 3. 식생 호안 제원

현장 실험의 대상이 되는 식생 호안은 광분해성 및 생분해성 재료와 야자 섬유를 이용하여 개발한 식생 매트와 토목섬유를 이용한 방틀공의 두 가지이며, 앞에서 명시한 것처럼 치수안전성 및 환경성을 동시에 고려하여 개발하였다(한국건설기술연구원, 2004).

식생매트는 일반적으로 시공의 간편성과 조기에 식생 도입이 용이하다는 장점 때문에 자주 사용되는 호안 형태로, 본 연구에서는 환경성을 더욱 증진하기 위하여 광분해성 및 생분해성 재료로 만들어진 매트를 이용하여 호안을 구성하였다. 상부는 광분해성 20 lb PP 망사(mesh)를 이용하였으며, 중간은 생분해성 플라스틱 매트, 하부는 야자섬유 매트로 구성하였으며, 식생 매트의 두께는 5 cm 내외이다. 시공 후 3년 이상 경과하여 식생이 충분히 정착된 후에는 분해되어 생태계에 미치는 환경부하를 최소화 할 수 있다.



**Fig. 2. Vegetation-Mat**

토목섬유 방틀공은 두 겹의 고강도 토목섬유를 이용

하여 틀을 직조한 후, 틀에 모르타르를 주입하여 양생을 한 후에 완성되는 호안으로 현장에서 기계화 시공을 하기 때문에 시공성이 뛰어나다. 양생 기간을 지나야 제대로 강도가 발현되지만 일단 호안이 완성되면 토목섬유 방틀 자체가 하나의 거대 호안으로 거동하기 때문에 치수 안전성이 높을 것으로 기대되는 호안 공법이다. 사용되는 방틀의 형태에 따라 차이가 있을 수 있지만 호안의 두께는 20~25 cm 정도이다. 단위 면적당 사용되는 인공 재료의 양이 기존 콘크리트 호안에 비해 매우 적고 방틀 격자 내부에 식생이 자라나는 것이(식생활적 면적 70% 이상) 가능하기 때문에 환경성이 뛰어난 제품이다.



**Fig. 3. Geotextile Flexible Crib**

현장 설치 시 설치 비용으로 분석해 보았을 때 시공비는 Table 3과 같으며 기존 콘크리트 호안의 총 시공비를 100으로 보았을 때, 식생매트의 시공비는 60, 토목섬유 방틀공의 경우는 76으로 매우 경제적인 것을 알 수 있다.

**Table 3. Comparison of the Relative Revetment Construction Costs**

	Concrete Revetment	Vegetation-Mat	Geotextile Flexible Crib
Material Costs	86	57	64
Labor Expenses	9	3	10
Equipment Expenses	5	-	2
Total Costs	100	60	76

## 4. 현장 실험

### 4.1 개요

2003년부터 새로 개발된 두 식생 호안 공법을 현장 설치하여 현장 실험을 수행하였다. 현장 실험에서는 실제 하천에서 발생하는 홍수에 의해서 호안의 치수 안전성을 검증하였다. 현장 실험 수행 중 여러 번의 홍수를 경험하였지만, 호안이 파손되거나 변형된 경우는 발생하지 않았다. 이는 호안의 치수 안전성을 간접적으로 증명하는 것으로 생각할 수 있다. 하지만 이를 계량화하는 것이 필요하며, 수위와 유량 자료를 이용하여 현장 실험 결과를 분석하였다.

### 4.2 유황 분석

현장 실험 결과 분석 시 필요한 유황 자료는 실제 유황 측정을 수행하여 얻은 자료를 문산 1교 수위계의 수위와 연계시켜 작성한 수위-유황 곡선을 통하여 얻어내었다. 유황 측정은 총 3회 수행하였는데, 홍수량은 2003년 9월 18일에 발생한 홍수를 부자를 이용하여 측정된 자료를 이용하였으며(Fig. 4), 저수 유황은 2003년 8월 24일과 8월 28일에 프라이스컵 유속계를 이용하여 2점법으로 측정된 유황 자료를 이용하였다.



Fig. 4. Flood at the On-site Experimental Place (September 18, 2003)

현장 실험 지점에서 가장 가까이 위치한 수위계는 파주시청에서 관리하는 문산1교 수위계(현장 실험 지점으로부터 하류 방향으로 770 m 떨어진 지점에 위치)로 2002년부터 측정을 시작하였지만, 연속적인 수위자료를 얻기 위해서 설치한 것이 아니라 홍수 시 수위를 모니터링 하기 위하여 설치한 수위계이다. 따라서 실제 활용 가능한 수위 자료는 다소 제한되었으며, 현장 실험 시행 시 측정된 2003년 6월부터 2004년 8월까지의 자료 중 결측, 결빙 시 관측 오류, 자료 망실 등으로 자료 활용이 불가능한 기간을 제외한 총 295일 간의 수위 자료를 이용할 수 있었다.

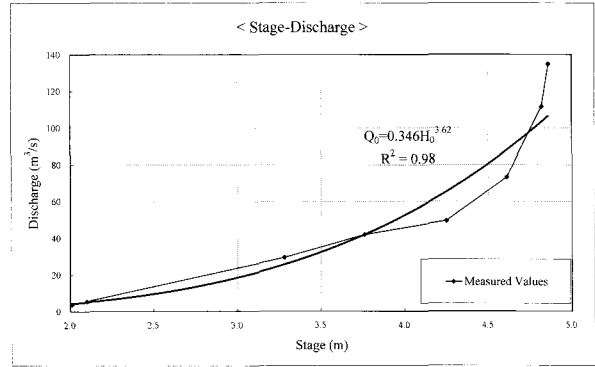


Fig. 5. Rating Curve for the Munsan-1-Bridge Stage-Gauging Station

상기 유황 측정 성과와 문산1교 수위계의 수위자료를 이용하여 Fig. 5와 같은 수위-유황 곡선을 도출해 내었으며, 도출한 수위-유황 관계식은 다음과 같다.

$$Q_0 = 0.346H_0^{3.62} \quad (1)$$

여기에서  $Q_0$ 는 유황이며,  $H_0$ 는 수위계 영점표고로부터의 수위이다. 도출한 수위-유황 관계식을 이용하여 이용 가능한 모든 일수위자료를 유황으로 변환한 후 Fig. 6과 같이 유황곡선을 작성하였다. 이용 가능한 자료의 수가 매우 제한되어 있었지만, 전체적인 경향을 파악하는 것은 어느 정도 가능하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 동문천의 연간 일평균 유황은 대체로  $3.0 \text{ m}^3/\text{s}$  미만이지만, 관측 기간 중 발생하였던 몇 번의 홍수로 인하여 최대 일평균 유황은  $119 \text{ m}^3/\text{s}$ 에 달한다.

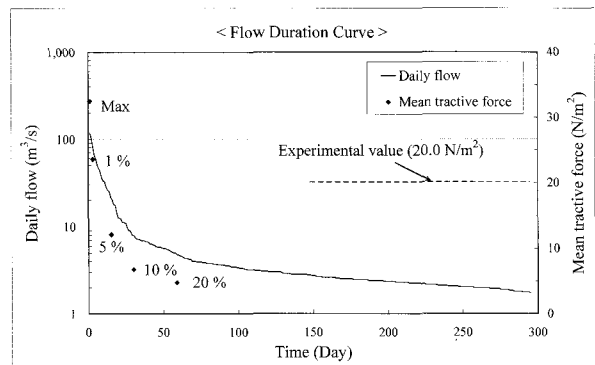


Fig. 6. Flow Duration Curve with Average Tractive Force

### 4.3 평균 유속 및 평균 소류력 계산

앞부분에서도 밝혔듯이 일반적으로 국내 호안 설계는 평균 유속과 평균 소류력을 이용하여 이루어진다. 현장 실험 구간에서의 평균 유속과 호안에 작용한 소류력을 파악하기 위하여 경기도(2003)의 동문천 지형 자료에 1차원 수치 모형(HEC, 2002)을 적용하여 평균 유

Table 4. Variation of Cross-sectional Mean Velocity and Tractive Force at On-site Experimental Place

Condition		Discharge ( $Q$ ), $m^3/s$	Stage ( $H$ ), m	Mean Velocity ( $V$ ), m/s	Mean Tractive Force ( $\tau_0$ ), $N/m^2$
Measured Discharge	Max.	119	7.23	2.2	32.5
	1%	82.3	6.86	1.8	23.6
	5%	21.3	5.59	1.2	12.1
	10%	8.00	5.02	0.8	6.83
	20%	4.74	4.82	0.7	4.83
Estimated Flood Discharge	20 year	350	8.91	3.3	68.5
	Plan(100 year)	481	9.10	3.8	84.3

※ “Estimated Flood Discharge”는 임진강수계(2지구)하천정비기본계획(경기도, 2003)에서 인용

속과 호안 설치 지점에서의(동문천 하천정비기본계획 상 No. 11 지점) 평균 소류력을 계산하여 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다. 표와 그림에서 알 수 있듯이 현장 실험 수행 기간 동안 호안 설치 지점에서의 단면 평균 최대 유속은 2.2 m/s 이었으며, 호안에 작용한 최대 소류력은 32.5  $N/m^2$  이었다. 비록 관측 최대 유량이 계획 홍수량이나 20년 빈도 홍수량에 크게 미치지 못하지만 Fig. 6과 Table 4의 결과를 종합해서 판단할 때 현 개수전 횡단면에서의 최대 홍수에서는 적용한 식생 호안이 제방을 보호하는 호안 본연의 기능을 충분히 수행하고 있다고 판단할 수 있었으며, 현장 실험결과 새로 개발된 식생 호안의 적용 가능한 평균 소류력은 30.0  $N/m^2$  정도이며 단면 평균 유속 역시 2.0 m/s 정도가 된다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 수로 실험

### 5.1 개요

새로 개발된 호안 공법 중 비교적 홍수저항력이 약할 것으로 예측되는 식생매트에 대하여 수로 실험을 수행하였다. 수로 실험은 수로의 규모가 일반적인 하천에 비해서 작으므로 하천의 평균 유속이나 평균 소류력에 의한 영향을 실험을 통해 실질적으로 확인 하기는 어렵

다. 대신 수로 실험을 통하여 산정되는 평균 유속 및 평균 소류력을 이용하여 실제 하천에서의 하상이나 제방 사면 근처에 설치된 호안에 대한 국부 유속(local velocity)과 국부 소류력(local tractive force)의 영향을 확인하였다. 일반적인 호안 실험은 상사 이론에 기초하여 모형 실험을 수행하지만, 본 연구에서는 실제 식생에서의 모형과 원형 사이의 상사를 구현하는 것이 실질적으로 어렵기 때문에 원형 실험을 수행하였다.

### 5.2 실험 시설 및 현황

실험에 사용한 수로의 제원은 Fig. 7과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이, 충분한 유속을 얻기 위하여, 수로 상류에 유량 공급 장치를 설치하지 않고 도수관으로부터 바로 수로로 방류하여 실험을 수행하였으며, 총 6.5 m 길이의 실험 구간에 대하여 식생매트를 설치하였다. 식생매트는 먼저 0.2 m 두께로 토양층을 깔고, 양잔디(Perennial Ryegrass)를 파종한 다음, 파종한 종자 위에 5 cm 두께로 설치하였다. 가능한 실제 현장 실험과 조건을 맞추기 위해서 양잔디는 훌뿌리기로 파종한 후 5개월 동안 재배하였으며, 충분히 식생이 성숙하였다고 판단한 후 실험을 수행하였다. 성숙한 식생의 밀도는 1.0 m × 1.0 m의 방형구를 이용하여 조사하였으며, Eq. (2)에 의해서 산정하였다.

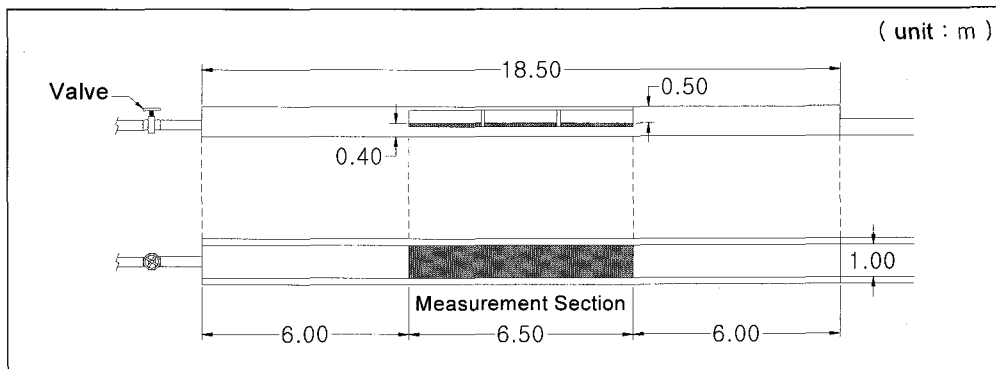


Fig. 7. Experimental Flume

$$a = nd \quad (2)$$

여기에서  $n$ 은 단위면적 당 식생의 수,  $d$ 는 식생의 직경이다. 방형구에 의해서 조사된 단위면적 당 평균 식생의 수는  $780/m^2$  이었으며, 식생의 평균 직경(기저직경 기준: 기저직경은 하상에서 20 cm 높이에서의 식생직경을 의미)은 0.006 m 이었다. 따라서 본 실험의 경우 산정된 식생 밀도는 4.68/m 이었다.



Fig. 8. Side-view of the Measurement Section

유속은 1차원 프로펠러 유속계를 이용하여 식생매트 설치 구간 및 상·하류에서 1점법으로 측정하여 단면 평균 유속을 결정하였으며, 측정한 유속으로부터 유량을 환산하였다. 수위는 수위계(point gauge)를 이용하여 측정하였다. 실험은 실험에 이용한 수로 제원에서 가능한 최대 유량을 방류하였으며, 2시간 동안 흐름 상태를 유지한 후 방류를 중지하고 하상의 변화를 관찰하여 세굴 여부를 판단하였다.

### 5.3 실험결과

유속은 식생 매트 설치 구간 상류로부터 하류까지 1 m 간격으로 측정하였으며, 각 측선마다 횡방향으로 3 개 지점(30 cm 간격)의 유속을 측정하여 평균하였다. 식생매트 설치 구간 상·하류에서 측정한 평균 유속과 평균 수위로부터 유량을 역산한 결과 실험 유량은  $0.73 m^3/s$  이었다.

측정결과를 이용하여 단면평균 소류력을 구하기 위하여 다음의 식을 이용하였다.

$$\tau_0 = \gamma R S_f \quad (3)$$

부동류 흐름은 가속도가 있는 흐름이므로, 만약 정상류에서 이송 기속도만을 고려한다면, 개수로 흐름에서 다음과 같은 운동 방정식을 구성할 수 있다.

$$-\gamma A \Delta h - \tau_0 P \Delta x = \rho A v \frac{dv}{dx} \Delta x \quad (4)$$

즉,

$$\begin{aligned} \tau_0 &= -\gamma R \left( \frac{dh}{dx} + \frac{v}{g} \frac{dv}{dx} \right) \\ &= -\gamma R \frac{d}{dx} \left( h + \alpha \frac{V^2}{2g} \right) = \gamma R S_f \end{aligned} \quad (5)$$

이며, 여기에서  $\tau_0$ 는 단면평균 소류력,  $P$ 는윤변,  $R$ 은 동수반경,  $h$ 는 수위,  $\alpha$ 는 에너지 보정계수,  $V$ 는 평균 유속,  $S_f$ 는 에너지 경사이다. 일반적으로 정상류(steady flow)의 모든 상태에 대하여 경사  $S$ 가 적절히 정의된다면, 단면평균 소류력을 다음과 같이 표현할 수 있고,

$$\tau_0 = \gamma R S \quad (6)$$

Eq. (3)과 같이  $S = S_f$ 로 정의한 경우, Eq. (6)은 등류 흐름뿐만 아니라 부동류 흐름에서도 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Henderson, 1966).

일반적으로 식생구간에 대해서는 유속 분포가 일반 개수로 흐름과 다르다고 알려져 있으나, 반면에 식생 바깥쪽에서의 유속 분포는 거친 하상에서의 유속 분포와 마찬가지로 대수 유속 분포를 가지는 것으로 알려져 있으며(Carollo et al., 2002), 따라서 본 실험에서는 식재 구간에서의 평균 유속은 도복된 식생의 높이를 제외한 연직 구간에 대하여 1점법을 적용하여 측정하였다. Stephan and Gutknecht(2002)는 완전 도복된 식생에서의 흐름에 대하여 일반적인 대수 유속 분포와 유사한 형태의 식을 제시하였는데,

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{0.4} \ln \frac{y - y_p}{y_p} + 8.5 \quad (7)$$

여기에서  $u$ 는 유속,  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{g R S_f}$ 로 전단 유속,  $y_p$ 는 도복된 식생의 높이이다. 에너지 보정계수  $\alpha$ 는 Eq. (7)을 이용하여 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{u}{U} \right)^3 dA \\ &= \frac{1}{(h - y_p) U^3} \int_{y_p}^h \left( \frac{u_*}{0.4} \ln \frac{y - y_p}{y_p} + 8.5 \right)^3 dy \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서  $U$ 는 단면평균 유속이다. 실험구간에서의 단면평균 소류력과 에너지 보정계수를 계산하기 위해서

Table 5. Experimental Results

Location	$U$ (m/s)	$y_p$ (m)	$h - y_p$ (m)	Section Length (m)
Upstream-end	1.73	0.13	0.36	6.0
Downstream-end	1.96	0.13	0.24	

실험구간 상·하류에서 측정된 수위와 유속을 이용하였으며, 식생 도복 높이  $y_p$ 는 10회 측정 후 평균하여 구하였다(Table 5 참조).

Eq. (3)과 (8), Table 5의 측정결과를 이용하여 계산한 결과, 실험구간에서의 에너지 보정계수  $\alpha$ 는 1.9, 에너지 경사  $S_f$ 는 0.0055 이며, 단면평균 소류력  $\tau_0$ 는 12.4 N/m<sup>2</sup> 이었다. 실험 조건에서 명시한 것과 같이 2시간 동안 방류한 후 하상을 관찰한 결과 식생 매트 설치 구간 전체에 대해 세굴이 발생한 부분이 확인되지 않았고, 하상 자체도 매우 안정적으로 유지되고 있는 것이 확인되었다(Fig. 9). 따라서 실험 결과로부터 실험에 사용된 식생 매트는 국부 유속 2.0 m/s, 국부 소류력 12.4 N/m<sup>2</sup> 까지 적용할 수 있는 것으로 확인되었으며, 이 범위 내에서 적절한 안전성 및 내마모성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

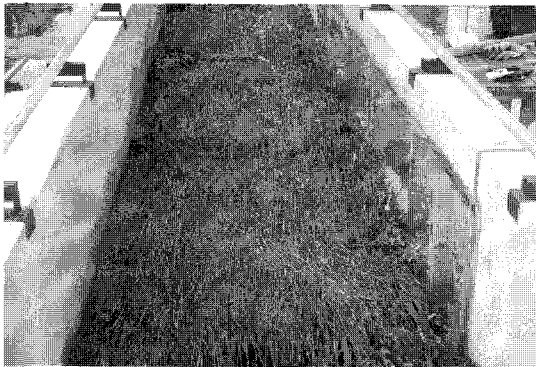


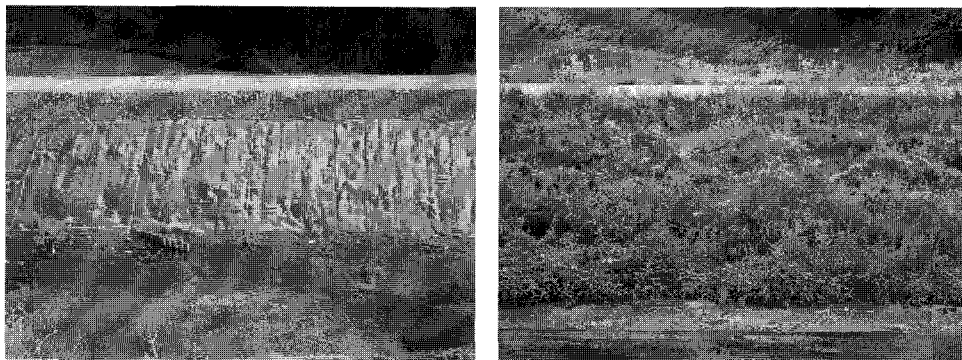
Fig. 9. Channel Bed after 2-Hour Experiment

## 6. 식생 모니터링

자연형 식생 호안은 하천에서의 환경성을 증진시키는 목적을 위해 주로 사용된다. 본 연구에서 식생 호안의 환경성은 2년간의 모니터링을 수행하여 확인하였다. 모니터링은 현장 실험 수행 기간 동안 계속하여 진행하였으며, 식생의 정착 상황을 중심으로 진행하였다.

일반적으로 식물의 정착률은 단위면적당 파종한 종자의 수 중 발아하여 정착하는 비율을 말한다. 그러나 이러한 정착률은 나지에서 이루어지는 실험의 경우 도입종자나 매토종자(토양 속에 존재하는 종자)의 하나 하나의 개체수를 파악하지 못하기 때문에 식피율(단위 면적 당 식물이 덮고 있는 비율)로서 판단하는 경우가 많다. 따라서 단위면적당 식생이 어느 정도 도입되었는지는 Braun Branquet이 제시하는 방법을 활용하여 등급을 구하였으며(김재근 등, 2004), 이러한 등급은 +, r, 1, 2, 3, 4, 5 등급으로 구분되는데, 일반적으로 식생 정착률은 4-5등급 정도가 되면 높다고 판단한다.

Fig. 10과 11은 각각 식생매트와 토목섬유 방틀공 시공 시와 1년 정도 지나서 식생이 성숙한 이후를 비교한 것이다. 그림에서도 볼 수 있듯이 매우 우수한 사면 녹화 능력을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 식생매트는 시공 시 매트 중간과 하부(야자 섬유 매트)에 미리 종자를 파종(양잔디, 수크령, 털부처꽃, 물억새, 갈대, 잡싸리 등)하여 시공하였으며 예상대로 매우 우수한 식생 정착 상황을 보여준다. 토목섬유 방틀공은 시공이 이루어지고 나서 양생이 완료된 후 Fig. 11에 보이는 격

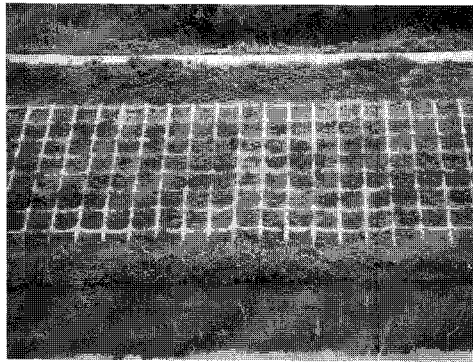


(a) After Construction

(b) 1-Year Later

Fig. 10. Comparison of the States of Vegetation-Mat





(a) After Construction



(b) 1-Year Later

Fig. 11. Comparison of the States of Geotextile Flexible Crib

자형 방틀 내부에 하천에 유리한 초본(양잔디, 수크령, 물억새)을 선정하여 식재를 하였는데, 초기에는 낮은 정착률(1, 2등급)을 보였지만, 1년 후에 다시 확인해 본 결과 그림에서 알 수 있듯이 기대 이상으로 높은 정착률(4, 5등급)을 보였으며, 기 식재한 품종 외에 다양한 품종의 식생이(쇠뜨기, 황새냉이, 바랭이, 쉼사리, 애기메꽃 등) 확인되었다. 따라서 모니터링 결과로 보아 현장 실험을 수행한 식생 매트와 토목섬유 방틀공 모두 녹화능력이 뛰어났으며, 환경성 또한 높다는 사실을 확인할 수 있었다.

## 7. 요약 및 결론

본 연구에서는 현장 실험과 수로 실험을 수행하여 새로이 개발된 자연형 식생 호안에 대하여 측정 자료를 분석하여 그 적용성을 검토하였다. 동문천에서의 식생 호안 공법에 대한 현장 실험은 파주시에 위치한 동문천에 호안을 설치하여 수행되었는데, 유량을 측정하여 동문천 문산1교 수위계에 대해서 수위-유량 곡선을 작성한 후, 이용 가능한 수위자료로부터 현장 실험 수행 중 발생한 최대 홍수 시의 유량이 119 m<sup>3</sup>/s 인 것을 확인하였다. 이 홍수량을 기준으로 호안 설치 지점에 1차원 수치 모형을 적용한 결과 개발된 식생 호안은 단면 평균 유속 2.0 m/s, 단면 평균 소류력 30.0 N/m<sup>2</sup> 까지의 하천 흐름에 적용할 수 있다는 것을 확인하였다. 이러한 수치는 일본에서의 잔디식재에 대한 허용 기준에 해당하며, 또한 독일에서의 갈대류/다년생 초본류와 야자섬유롤에 대한 허용 기준 수준에 해당한다. 식생매트에 대해서는 별도로 수로 실험을 수행하여 그 적용성을 검토하였다. 수로 실험에서는 국부 유속과 국부 전단 응력에 대하여 실험을 수행하였으며, 실험 결과 식생 매트는 국부 유속 2.0 m/s, 국부 전단 응력 12.0 N/m<sup>2</sup> 까지 적용 가능하다는 사실을 확인하였다. 이와 같이 현장과 실험실을 통하여 적용성을 검토하였으나, 현장과

실험실에서 얻을 수 있는 흐름 조건의 한계 때문에 아직 설계 홍수량에 대응하는 하천의 설계 유속에 대하여 안전성이 보장된다고 할 수는 없다. 이러한 점은 현장에서의 직접적인 관찰이 가능하며, 특히 설계 유속 재현이 가능한 초대형 수리 실험장에서의 실험을 통하여 보완이 가능할 것으로 기대된다.

환경성 측면에 대해서는 식생 모니터링을 수행하여 검토하였다. 2년간 식생 모니터링을 수행한 결과 두 호안 모두 매우 높은 식생 정착률을 보이며 우수한 녹화능력을 가지고 있다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 본 연구 수행 결과 개발된 식생 매트 및 토목섬유 방틀공 모두 높은 환경성을 가지고 있다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원을 받는 “하천생태 기능복원을 위한 핵심기술개발” 과제의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 강형식, 최성욱 (2000). "식생된 개수로에서 난류 구조와 부유사 이동 현상의 수치해석." 한국수자원학회 논문집, 제33권, 제5호, 한국수자원학회, pp. 581-592.
- 경기도 (2003). 임진강수계(2지구) 하천정비기본계획.
- 김재근, 박정호, 최병진, 심재한, 권기진, 이보아, 이양우, 주은정 (2004). 생태조사방법론, 보문당, pp. 153-189.
- 우효섭, 이진원, 이두한, 박재로 (1999). "생물재료를 이용한 저수호안의 세굴 저항성 평가 - 하천복원 시험 연구 결과의 기술 전파." 대한토목학회지, 제47권 제11호, 대한토목학회, pp. 71-80.
- 최성욱, 양원준, 박문형 (2003). "수심의 영향을 받는 침수 식생 개수로 흐름의 난류구조 및 고유구조."

- 대한토목학회논문집, 제23권, 제3B호, 대한토목학회, pp. 165-174.
- 한국건설기술연구원 (2001). **국내 여건에 맞는 자연형 하천공법의 개발(1998~2001)**, 환경부.
- 한국건설기술연구원 (2004). **하천 생태 기능 복원을 위한 핵심 기술 개발(2001~2004)**, 환경부.
- 日本 全國防災協會 (2002). **美しい山河を守る災害復旧基本方針**.
- 望月達也, 藤田光一, 服部敦, 堀謙吾 (1997). "植生の耐侵食機能を応用した侵食防止工法のコンセプト." 土木技術資料, 39(7), pp. 32-37.
- 北川明, 宇多高明, 福岡捷二, 藤田光一, 竹本典道, 服部敦 (1995). "植生被覆越流堤耐侵食性關現地實驗." 土木技術資料, 37(6), pp. 20-25.
- Carollo, F. G., Ferro, V., Termini, D. (2002). "Flow velocity measurements in vegetated channels." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128 No.7, pp. 664-673.
- Darby, S.E. (1999). "Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125 No. 5, pp. 443-454.
- Darby, S.E., and Thorne, C.R. (1996). "Predicting stage-discharge curves in channels with bank vegetation." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122 No. 10, pp. 583-586.
- Fathi-Maghadam, M, Kouwen, N. (1997). "Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123 No. 1, pp. 51-57.
- Hammann De Salazar, K. and Dittrich, A. (1996). "Hydraulische Belastbarkeit Ingenieurbiologischer Bauweisen." *Schriften*, DVWK, 118.
- Henderson, F.M. (1966). *Open Channel Flow*. The Macmillan Company, New York, pp. 90-91.
- Hydrology Engineering Center (2002). *HEC-RAS river analysis system user's manual*, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- Järvelä, J. (2002). "Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants." *J. of Hydrology*, Vol. 269, pp. 44-54.
- Johannsen, R. (1988). "Ingenieurbiologische Ufersicherung des Schwalbaches bei Ens Dorf im Saarland-Planung, Bauausführung und Entwicklung." *Jahrbuch 3 der Gesellschaft f. Ingenieurbiologie*, Aachen, pp. 190-203.
- Kirby, J.T., Durrans, S.R., Pitt, R., Johnson, D. (2005). "Hydraulic resistance in grass swales designed for small flow conveyance." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 131(1), pp. 65-68.
- Kouwen, N. (1992). "Modern approach to design of grassed channels." *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 118 No. 5, pp. 733-743.
- Kouwen, N, Li, R.M. (1980). "Biomechanics of vegetative channel linings." *J. of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106 No. 6, pp. 1085-1103.
- Masterman, R., and Thorne, C.R. (1992). "Predicting influence of bank vegetation on channel capacity." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118 No. 7, pp. 1052-1058.
- Musleh, F.A. and Cruise, J.F. (2006). "Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 132(2), pp. 163-171.
- Shimizu, Y., and Tsujimoto, T. (1994). "Numerical analysis of turbulent open-channel flow over a vegetation layer using  $k-\epsilon$  turbulence model." *J. of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 11 No. 2, pp. 57-67.
- Stephan, U., Gutknecht, D. (2002). "Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation." *J. of Hydrology*, 269, pp. 27-43.
- Stone, B.M. and Shen, H.T. (2002). "Hydraulic resistance of flow in channels with cylindrical roughness." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128 No. 5, pp. 500-506.
- Temple, D.M. (1999). "Flow resistance of grass-lined channel banks." *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 15 No. 2, pp. 129-133.
- Temple, D.M., Robinson, K.M., Ahring R.M., Davis, A.G. (1987). *Stability Design of Grasslined Open Channels*, Agricultural handbook 667, USDA, Washington, D.C.
- Wu, F-C, Shen, H.W., Chou, Y-J. (1999). "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation." *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 125 No. 9, pp. 934-942.

(논문번호:05-97/접수:2005.07.14/심사완료:2007.01.15)