

호안 Mattress/Filter에 의한 소류력 저감

서 영 민 · 이 승 윤 · 허 창 환^{*} · 지 흥 기
영남대학교 토목공학과, ^{*}일본구주대학교 토목공학과,
^{**}영남대학교 방재연구소
(2005년 8월 3일 접수; 2005년 12월 6일 채택)

Reduction of Tractive Force by Revetment Mattress/Filter

Young-Min Seo, Seung-Yun Lee^{*}, Chang-Hwan Heo^{**} and Hong-Kee Jee

Department of Civil & Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

^{*}Department of Civil Engineering, Kyushu University, Kyushu 812-8591, Japan

^{**}Institute of Disaster Prevention, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea

(Manuscript received 3 August, 2005; accepted 6 December, 2005)

Revetment Mattress/Filter is the porous structure filled fillers in meshed structure so that it can use the fillers of various sizes and form various pores. The porous structure of the Mattress/Filter increases drainage so that it decreases the energy and velocity of flow therefore the tractive force is decreased and the erosion of revetment is mitigated. The filler of Mattress/Filter uses gravels, waste concretes and slags so that the surface is rough and the roughness coefficient increases and the increase of the roughness coefficient decreases flow velocity and tractive force.

On the other hand Mattress/Filter and vegetation are combined so that the increase of roughness coefficient and flow velocity still more progress therefore the effect of decrease of tractive force is increased after a few months have passed since the Mattress/Filter is constructed so that the vegetation is developed and be stabilized. The vegetation channel of Mattress/Filter is set up and the inspection comes into operation by varying flowrate and vegetation spacing to examine these characters of the Mattress/Filter. The coefficient of flow velocity U/U' is decreased exponentially as vegetation density aH' or λ is increased and the coefficient of friction f is increased as vegetation density aH' is increased but decreased as the coefficient of flow velocity U/U' is increased. The effective tractive force F_0 is decreased exponentially as the vegetation density aH' is increased.

From the inspection the results are obtained that the porous and vegetation structure of the revetment Mattress/Filter system increases the coefficient of friction of revetment so that flow velocity and effective are decreased therefore greatly contributes the stability of the revetment.

Key Words : Mattress/Filter, Tractive force, Vegetation restoration, Revetment

1. 서 론

우리나라의 하천정비는 지금까지 주로 강수량의 계절별 편중에 따른 유황특성과 수위변동특성을 감안하여 소류력에 저항할 수 있는 콘크리트 호안블록 등을 사용한 하천정비에 중점을 두어왔다. 이는

인간과 자연생태계의 공생 및 지속가능성이라는 측면에서 많은 문제점을 지니고 있으며, 하천의 자연생태계를 보전하고 복원하기 위해서는 치수상의 안정성을 확보하면서 하천이 본래 가지고 있는 환경가능 중에서 자연보전요소, 즉 하천 생태계의 양호한 서식환경을 보장하고 주변 환경과 조화롭게 연결시켜 아름다운 하천환경을 조성하려는 욕구가 점점 증하고 있는 실정이다.

한편 개발시대에 건설되어 사용해오던 각종 건설

Corresponding Author : Young-Min Seo, Department of Civil & Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea
Phone: +82-53-810-3664
E-mail: elofy@hanmail.net

구조물의 해체, 리모델링 등으로 많은 건설 폐기물이 발생하고 있으며, 산업현장(제철, 열병합 발전소 등)에서는 산업폐기물(슬래그)이 양산되고 있어 이들의 처리가 매우 어렵고 처리에 고비용을 부담하고 있어 산업체의 제품 생산원가에 부담을 주고 있다. 이를 해결하기 위해서는 자연의 재료 뿐만 아니라 건설폐자재 및 슬래그를 여재로 이용함으로써 친환경 및 친생태적인 서식공간을 확보하여 자연생태계를 보전하고 복원시킬 수 있는 친환경적인 구조물의 개발 및 복원기술의 확보가 절실히 필요하다.

이러한 측면에서 호안 Mattress/Filter 시스템은 제방의 수리학적 안정성과 생태학적 다양성을 만족시키는 친환경 구조로서 그 조직이 다공체이고 그 구성에 따라 다양한 크기의 공간을 조성할 수 있으며, 생물의 서식에 적합한 좋은 환경을 구성할 수 있다. 또한 Mattress/Filter의 다공성 구조는 호안의 배수성 및 조도계수를 증가시켜 호안부의 유속 및 소류력을 감소시키기 때문에 침식 및 식생유실을 완화시킬 수 있으며, 식생이 활착한 후에는 이러한 효과가 더욱 증진되어 호안의 수리학적 안정성과 수변의 친환경성 및 친생태성을 확보할 수 있다.

Mattress/Filter와 관련된 기존 연구들을 살펴보면, Fiuzat 등(1982)¹⁾은 홍수조절수로에서 거석에 대한 안정성 실험을 통해 수리학적 흐름조건에 따른 유속, 소류력, 변형 등에 대한 안정성을 검토하였으며, Maynard 등(1995)²⁾은 하상보호를 위해 Gabion-Mattress를 적용하였고 그 설계기법을 제시하였다. Simons 등(1983)^{3,4)}은 Reno Mattress의 적용을 위한 설계기준을 개발하기 위해 수리모형실험을 실시하였으며, 모래하상에서 하도 및 수리구조물의 설계에 대한 Reno Mattress의 적용 방향 및 설계기준을 제시하였다. 지흥기 등(2001)⁵⁾은 호안용 돌망태의 수리학적 특성을 규명한 바 있으며, 배상수 등(2002)^{6,7)}은 하상과 호안의 수리학적 안정성을 확보하기 위해서 Mattress 및 돌망태를 적용하고 그 수리학적 특성을 검토하였다. 또한 배상수 등(2002)^{8,9)}은 슬래그 채움재를 사용한 하상 및 호안용 Mattress의 수리학적 특성을 규명하였으며, 이경욱 등(2002)¹⁰⁾은 수리학적 특성 검토를 기초로 Mattress 수리구조물의 설계프로그램을 개발하였다. Yoshiharu Ishikawa 등(2003)¹¹⁾은 수변식생의 밀도가 유효소류력에 미치는 영향을 검토하기 위해서 인공식생을 이용한 수리모형실험을 실시하였으며, Tenna Riis 등(2003)¹²⁾은 하도의 흐름조건과 식생면적, 종풍부도(species richness)와의 관계를 규명하였다.

Mattress의 관련기술의 현황을 살펴보면, 영국 윌링포드연구소의 Motyq J.와 Welsby(1987)¹³⁾가 돌망태를 이용한 해안방구구조물에 대한 연구를 수행하였으며, 미국 육군공병단의 Stephen T. Maynard 등(1995)¹⁴⁾은 하도에서 돌망태의 안정성에 관한 수리모형실험 연구를 수행한 바 있다. 또한 독일 뮌헨 도로프에서는 “Mattress 2000 박람회”를 개최하여 유럽 뿐만 아니라 전세계에 Mattress의 친생태, 친환경성을 홍보하고 수리역학적으로 그 안정성을 홍보하였으며, 독일 및 스위스에서 적용하고 있는 Matunaher Wasserbau이 자연생태계, 경관 및 친수기능 등 하천환경의 보전 및 향상에 큰 효과가 입증됨에 따라 이태리에서의 하천환경정비사업은 “다자연형 하천가꾸기”라는 용어로 그 정비기술을 도입하기에 이르렀다. 또한 이태리 Maccaferri사가 일찍이 연구·개발한 Mattress 제품의 생산, 설계, 시공 등의 기술이 유럽과 미국에 널리 보급되고 있으며, 국내에서도 합작사가 출범하여 국내에서 제품생산 및 설계시공을 하고 있다.

그러나 국내에서는 Mattress가 도로변의 급경사면 보호와 하천의 수리구조물에 사용되고 있지만 우수 중에 수류의 안정성에 관한 정량적인 연구가 미흡한 실정이다. 지금까지 Mattress는 소규모 하천의 제방과 간척사업의 물막이 공사에 사용되어 왔으며, 이의 적정규모 설계에 관한 연구와 Mattress의 활용성, 석재자원의 효율성 및 콘크리트 폐자재 활용에 관한 연구, 친생태공간과 친수공간의 확보 및 친환경적인 기술개발 등이 미흡한 실정이다. 또한 일부 도시하천 및 소하천에서 하천환경을 회복시키고자 하는 정비계획이 수립되고 있으나 하천환경 정비기법에 관한 기술이 아직 취약하여 단순한 정비수준을 크게 벗어나지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 국내 여건에 맞는 친환경·친생태적인 호안 Mattress/Filter의 수리학적 특성, 특히 식생수로에서의 소류력 저감특성 및 소류력과 식생활착과의 관계를 규명하여 자연생태 및 친환경적인 기능을 가진 수변생태계를 보전하기 위한 자연형 하천정비에 Mattress/Filter를 이용할 수 있는 자연생태계 보전기법의 기초를 제공하고자 한다.

2. 호안 Mattress/Filter의 구조

호안 Mattress/Filter는 제방 또는 하안의 유수에 의한 파괴와 침식을 방지하기 위해 제방 앞비탈에 설치하는 철망구조로서 유연성, 다공성, 배수성 및 식생성과 같은 특징을 가지고 있다.

2.1. 유연성

호안 Mattress/Filter의 철망은 Fig. 1과 같이 기계로 두바퀴 이상 꼬은 이중꼬임구조를 가지고 있기 때문에 풀림을 예방할 수 있으며, 중복되게 꼬여져 어느 부위가 절단되더라도 전체적으로 파손되지 않고 세굴, 침식과 같은 여러형태의 지반변화에 견디어 낼 수 있는 유연성을 가진다.

기존의 콘크리트 호안은 호안의 기초부에서 세굴이 발생하여 기초가 유실되고 콘크리트 호안의 배면에서는 흙모래의 씻김현상으로 인하여 공동이 형성되는 문제점을 지니고 있으나 호안 Mattress/Filter의 경우 Fig. 2와 같이 세굴이 발생하면 세굴된 부위와 함께 움직여 더 이상 세굴이 진행되지 않도록 한다.

2.2. 다공성

호안 Mattress/Filter는 철망 내에 자갈, 폐콘크리

트, 슬래그 등을 채운 구조로서 Fig. 3과 같이 다공성을 가진다. 다공성 구조는 수변 및 수중생물의 서식과 산란에 중요한 서식환경을 제공하므로 하천생태계 측면에서 양호한 생태환경의 창출이 가능하며, 홍수에 의존해서 생활하고 있는 생물군의 존재도 다공성 구조에 의해서 보호된다. Fig. 4와 같이 Mattress/Filter가 수중에 위치할 경우는 다공구조의 공간에는 생물막이 형성되고 이 공간은 유기물을 분해할 수 있는 최적의 장소가 되어 수질개선 효과에 크게 기여할 수 있으며, Mattress/Filter는 자연배수가 가능한 구조물이기 때문에 하천제방과 지층 사이에서 동식물의 생태계의 서식에 필수불가결한 수분을 공급하면서 지속적으로 Mattress/Filter 내부의 슬래그나 폐콘크리트의 공극 사이로 체체의 흡착수를 여과시킨다.

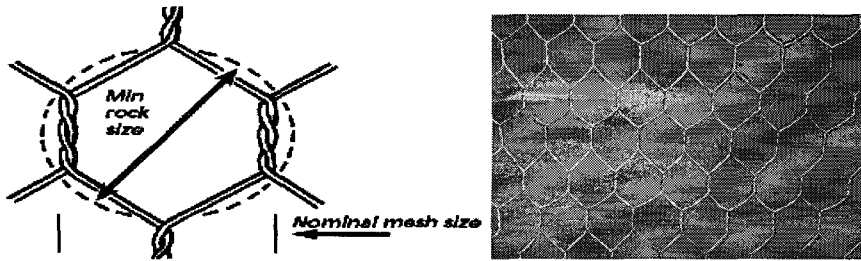


Fig. 1. The Twisted Pairs Structure of revetment Mattress/Filter mesh.

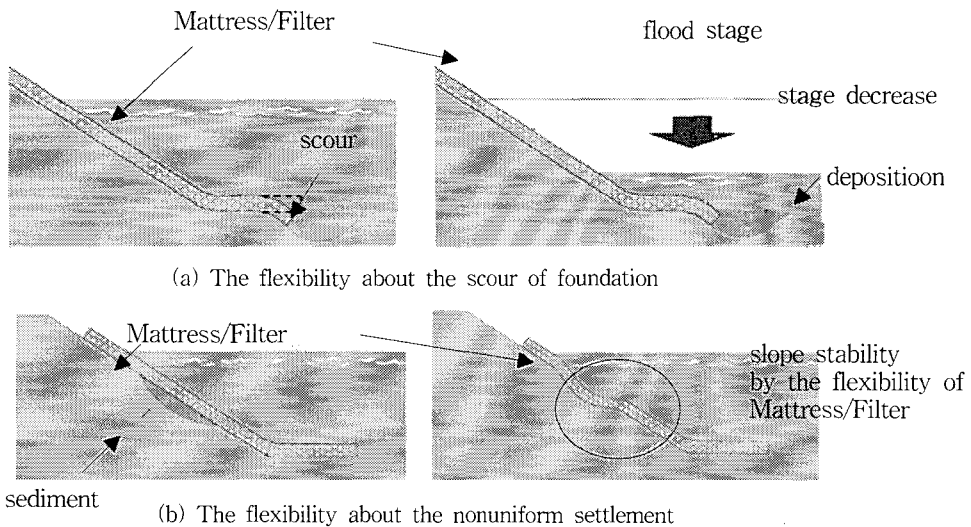


Fig. 2. The flexibility of revetment Mattress/Filter.

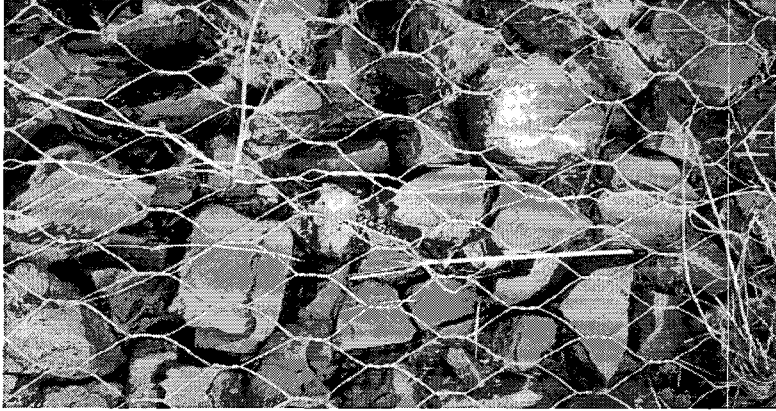


Fig. 3. The porous structure of Mattress/Filter.

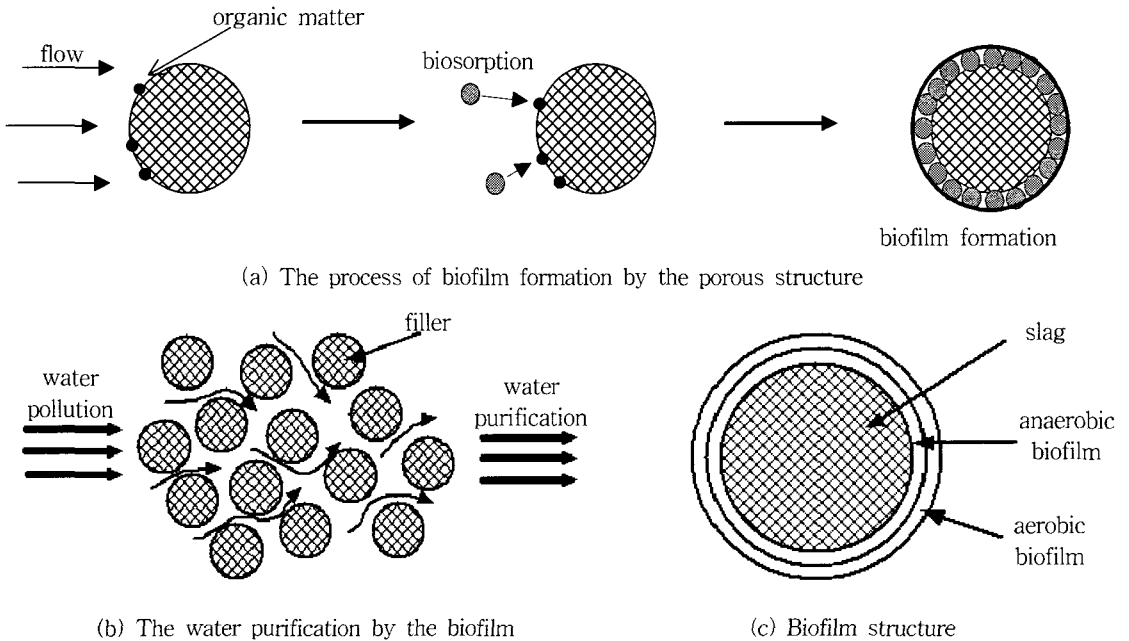


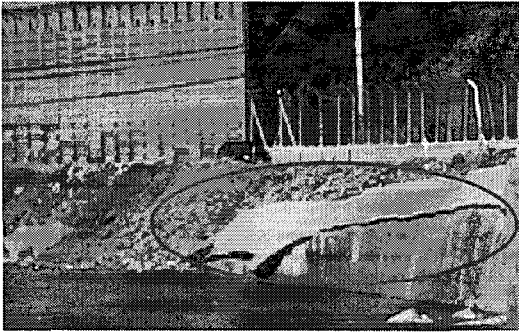
Fig. 4. The biofilm structure and water purification process of Mattress/Filter.

2.3. 배수성

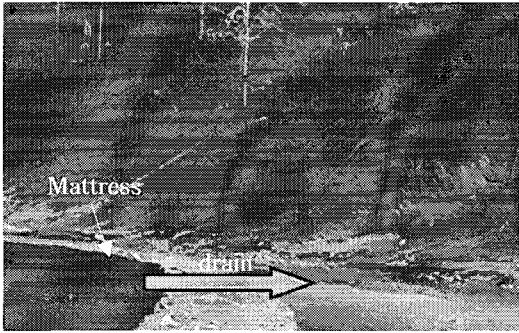
호안 Mattress/Filter는 철망 내에 자갈, 폐콘크리트, 슬래그 등을 채운 다공성 구조로서 수층부에 작용하는 소류력을 채움재의 공극사이로 쉽게 흡수함으로써 유수에 의한 에너지를 저감시키며, 콘크리트 구조물과는 달리 별도의 배수시설을 필요로 하지 않고 다공성 구조의 우수한 배수특성으로 인하여 홍수시 구조물의 안정성에 크게 기여하고 있다. Fig. 5는 콘크리트 호안과 호안 Mattress/Filter의 배수특성을 보여주고 있다.

2.4. 식생성

호안 Mattress/Filter는 자연배수가 가능한 다공성 구조이며, 채움재의 공극에 퇴적이 이루어지므로 수변식물의 뿌리를 정착시킬 수 있는 성장 및 활착 조건을 충족시킨다. 정수식물의 경우 땅속줄기의 성장을 발달시키고 Mattress/Filter에 형성된 퇴적물에 의해서 성장을 촉진시키며, 이를 바탕으로 군락 서식영역을 확대시키게 된다. Fig. 6은 호안 Mattress/Filter의 시공 직후 및 식생활착 후의 모습을 비교한 것으로서 호안 Mattress/Filter의 식생복원특성을 보여주고 있다.



(a) The failure of concrete revetment by drain pressure



(b) The drain characteristic of Mattress

Fig. 5. The comparison of Mattress and concrete revetment about drain characteristic.



Fig. 6. The comparison of revetment Mattress/Filter after construction and after vegetation development.

3. 소류력의 기본이론

Darcy-Weisbach 공식으로부터 식생이 없는 경우에 대해서 하상에 작용하는 전단응력 τ_0 는 식 (1)과 같다(Streeter et al., 1998)¹⁵⁾.

$$\tau_0 = f \left(\frac{4\rho UR}{\mu}, \frac{k_s}{4R} \right) \frac{1}{8} \rho U^2 \quad (1)$$

여기서, τ_0 : 하상의 단위면적당 작용하는 전단응력, f : Darcy-Weisbach 마찰계수, ρ : 물의 밀도, U : 평균유속, R : 동수반경, μ : 점성계수, k_s : 모래입자의 반경이다.

직사각형 단면의 개수로에서 하도가 전체적으로 거친 표면으로 덮혀있을 때 전단응력에 의한 난류에 대하여 Karman Prandtl의 난류유속 방정식은 식 (2)와 같다(Hayashi, 1996; Streeter et al., 1998)¹⁶⁾.

$$\frac{U}{U_*} = 5.75 \log \frac{R}{k_s} + 6.25 \quad (2)$$

여기서, U_* 는 마찰속도 \sqrt{gRI} 이다.

한편 거친 표면을 가지는 하상에서 큰 레이놀즈수를 가지는 흐름에 대하여 마찰계수 f 는 상대조도 k_s/R 에 따라 변한다. 또한 식 (1)에서 유속계수 U/U_* 와 마찰계수 f 사이의 관계는 식 (3)과 같다.

$$\frac{U}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} \quad (3)$$

Darby와 Thorne(1996)¹⁷⁾는 단면의 기하학적 형태와 하도(범면)경사, 하상재료 및 수변식생특성을 가지는 하도에 대하여 수위-유량관계곡선을 계산하기 위한 물리기반모형을 제시하였다. 특정 수위에 대한 유량의 분포를 예측하는데 필요한 모형을 적용하기 위하여 식생과 유사조건을 설명하는 윤변에 걸친 국부 Darcy-Weisbach 마찰계수를 추정하는 것이 필수적이다. 식생이 된 부분에 대하여 Darby, Thorne(1996) 및 Darby(1999)¹⁸⁾는 식생줄기의 밀도에 의해 영향을 받는 Darcy-Weisbach의 국부마찰계수 f 를 구하기 위해서 식 (1)을 사용할 것을 제안한 바 있다.

실험하도에서 식생이 존재하는 경우 전단응력(유효 소류력)은 유수에 의해 하도에 작용하게 된다. 식생에 의해서 피복된 면적비는 실험조건에 비해 최대 3% 정도인 것으로 나타났다. 따라서 Darby, Thorne(1996) 및 Darby(1999)에 의해 제안된 것처럼 다음과 같은 가정을 도입하였다. 전단응력은 식생이 없는 경우와 같은 메커니즘에 의해서 유수로 인하여 하상에 작용한다. 그러므로 식생이 있는 경

우 하상에 작용하는 평균유속 U' 과 전단응력(유효 소류력)의 관계는 식 (1)과 같다. 식 (4)는 수로의 마찰응력 τ_0 , 마찰계수 f 및 유속을 대신하여 하상에 작용하는 유효소류력 F_0 , 수변식생하도의 마찰계수 및 수변식생하도의 평균유속으로 바꾸면 그 관계식은 식 (4)와 같다.

$$F_0 = \frac{f'}{8} \rho U^2 \quad (4)$$

여기서, F_0 : 하상의 단위면적에 작용하는 유효 소류력, f' : 수변식생이 있는 하도에서 마찰계수, U' : 수변식생이 있는 하도의 평균유속이다.

유속 U 를 가지는 흐름에서 식생에 작용하는 항력 F_d 는 일반적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho A U^2 \quad (5)$$

여기서, F_d : 식생의 줄기에 작용하는 항력, C_d : 항력계수, A : 흐름방향으로 식생 줄기의 전면 면적(frontal area), U : 유속이다.

지금까지의 선행 연구에서 항력계수 C_d 는 식생 밀도와 강한 상관성을 나타냄을 알 수 있다 (Ishikawa et al., 2000)¹⁹⁾. 단위면적당 모든 식생에 작용하는 항력의 합을 F_v 라 하면 $F_v = F_d/S^2$ 가 된다. 여기서, S 는 개별 식생간 간격을 나타낸다.

수변식생을 가지는 등류흐름에 대해서 하도경사를 따라 작용하는 유체중량성분 F_w 는 $F_w = \rho g H I$ 로 나타낼 수 있다. 여기서, H 는 수변식생을 가지는 하도의 수심(수리수심)이고 I 는 하도의 경사이며, F_w 는 겉보기 소류력(apparent tractive force, F_w)이라 한다. 항력 F_v 와 유효 소류력 F_0 의 합은 F_w 와 같다고 볼 수 있으므로

$$\rho g H I = \frac{1}{2} C_d \rho A U^2 \frac{1}{S^2} + \frac{f'}{8} \rho U^2 \quad (6)$$

흐름방향으로 각 식생줄기의 전면 면적은 $A = DH$ 이다. 여기서, D 는 줄기의 반경이다. 만약 수변식생을 가지는 하도에서 흐름의 겉보기 마찰속도(apparent friction velocity)가 $U_*' = \sqrt{g H I}$ 로 가정된다면 식 (6)으로부터 다음 식 (7)을 얻게 된다.

$$U_*'^2 = \frac{1}{2} C_d D H \frac{1}{S^2} U^2 + \frac{f'}{8} U^2 \quad (7)$$

식생밀도 $aH = DH/S^2$ 와 식생면적비 $\lambda = \pi D^2/4S^2$ 를 고려하면 유속계수의 자승(U/U_*')²은 다음 식 (8a) 및 식 (8b)와 같이 표현된다.

$$\left(\frac{U}{U_*'}\right)^2 = 1 \left/ \left(\frac{1}{2} C_d a H + \frac{f'}{8} \right) \right. \quad (8a)$$

$$\left(\frac{U}{U_*'}\right)^2 = 1 \left/ \left(\frac{2C_d H}{\pi D} \lambda + \frac{f'}{8} \right) \right. \quad (8b)$$

식 (8a)와 식 (8b)로부터 마찰계수 f' 는 다음 식 (9a) 및 식 (9b)와 같다.

$$f' = \frac{8U_*'^2}{U^2} - 4C_d a H \quad (9a)$$

$$f' = \frac{8U_*'^2}{U^2} - \frac{16C_d H}{\pi D} \lambda \quad (9b)$$

따라서 하상의 마찰계수 f' 는 유속계수 U'/U_*' , 식생의 항력계수 C_d 및 aH' 또는 $(H\lambda)/D$ 의 함수이다. 여기서, aH' 는 식생의 조도(roughness concentration)와 수심의 곱을 나타내는 무차원 값이다. Ishikawa 등(2000)은 aH' 를 식생의 밀도를 나타내는 매개변수로 사용하였다.

실험에서 식생을 가지는 하도의 유속 U' 는 $U' = q/H'$ 로 나타내었으며, 여기서 q 는 단위폭당 유량이고 H' 는 수심이다. 그러므로 $U'/U_*' = (q/H')/\sqrt{gHI}$ 에서 다음 식 (10)을 얻게 된다.

$$H' = \left(\frac{q^{2/3}}{g^{1/3} I^{1/3}} \right) \left/ \left(\frac{U'}{U_*'} \right)^{2/3} \right. \quad (10)$$

$U' = q/H'$ 이므로 식 (10)은 다음 식 (11)과 같이 변형된다.

$$U' = g^{1/3} I^{1/3} q^{1/3} \left(\frac{U'}{U_*'} \right)^{2/3} \quad (11)$$

4. 실험조건

식생복원에 필요한 수리실험을 위한 모형은 수평, 수직 모두 1:20의 축척으로 구축되었다. Fig. 7과 같이 실험에 사용된 하도는 직사각형 단면을 가지는 직선수로이며, 길이 15m, 폭 1.0m, 높이 1.5m이다. 하도의 측벽은 흐름의 양상을 관찰할 수 있는 투명한 강화유리로 되어 있다. 하상은 평균 입경이 1.5cm인 슬래그로 채워진 0.3m×0.5m×0.1m 규격의 Mattress로 구성되어 있으며, 물은 상류측에 위치한 웨어로부터 공급된다. 유속측정은 3차원 16MHz micro-ADV를 이용하였으며, Mattress에 식재된 식생은 양잔디의 일종으로 성장이 빠른 Perennial Ryegrass를 선정하였다.

구축된 모형수로의 특성상 등류조건을 구현하는

호안 Mattress/Filter에 의한 소류력 저감

Table 1. Test condition in model-type .

No.	Spacing between vegetation S(m)	Roughness concentration of vegetation $a(m^{-1})$	Ratio of area occupied by vegetation λ	Discharge $Q(m^3/s)$
1	0	0	0	0.65
2	0	0	0	0.53
3	0	0	0	0.42
4	0.06	1.39	0.005	0.65
5	0.06	1.39	0.005	0.53
6	0.06	1.39	0.005	0.42
7	0.03	5.56	0.022	0.65
8	0.03	5.56	0.022	0.53
9	0.03	5.56	0.022	0.42

Table 2. The summary of test results

No.	aH'	$H'(m)$	$U'(m/sec)$	U'/U_*'	$F_0(N/m^2)$	f'
1	0	0.372	2.083	3.395	0.881	0.1657
2	0	0.349	1.832	3.026	0.877	0.2134
3	0	0.338	1.512	2.514	0.704	0.2513
4	0.889	0.639	1.122	1.600	0.545	0.3531
5	0.788	0.567	1.045	1.540	0.463	0.3462
6	0.687	0.494	0.967	1.476	0.409	0.3570
7	6.663	1.198	0.571	0.667	0.181	0.4534
8	5.540	0.996	0.566	0.704	0.181	0.4621
9	4.511	0.8111	0.559	0.743	0.167	0.4354

* aH' = Roughness concentration of vegetation \times Flow depth, H' = Flow depth, U' = Average flow velocity, U'/U_*' = Coefficient of velocity, F_0 = Effective tractive force, f' = Friction factor

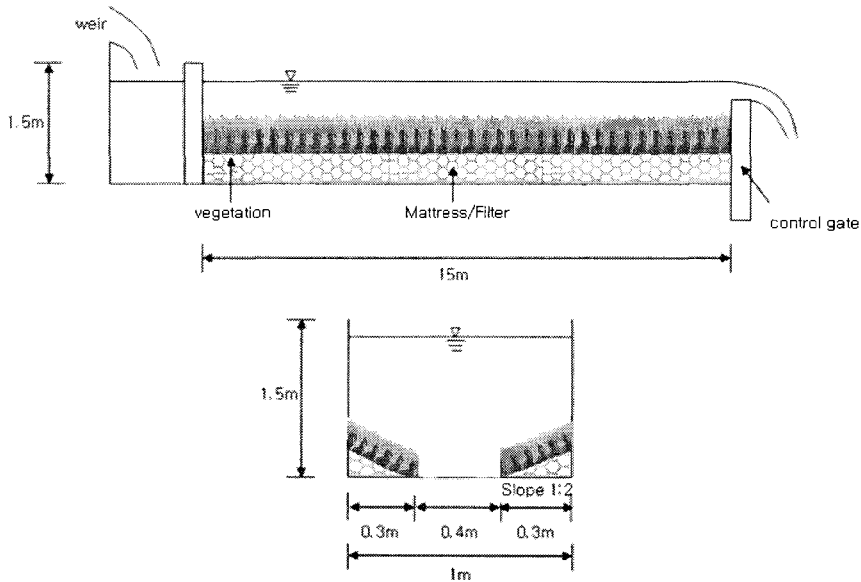


Fig. 7. Test flume in model-type.

것이 쉽지 않기 때문에 유속의 변화가 최소가 되는 지점인 상류로부터 6.0m 떨어진 지점에 측선을 선정 한 후에 횡방향으로 3개 지점에 대하여 유속분포를 측정하였으며, 측정된 자료는 평균하여 분석에 사용하였다. 실험은 Table 1과 같이 크게 식생이 있는 경우와 없는 경우로 구분하였으며, 유량을 $0.42\text{m}^3/\text{s}$, $0.53\text{m}^3/\text{s}$ 및 $0.65\text{m}^3/\text{s}$ 로 변화시키고 식생의 식재 간격을 0.03m, 0.06m로 달리하여 실험을 실시하였다.

5. 실험결과 및 고찰

Table 1에 주어진 실험조건에 따라 실험을 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 Table 2와 같다. 여기서, 식생이 존재하지 않는 경우에 대한 평균유속, 마찰속도 및 수심은 각각 U , U_* , H 로 나타내며, 식생이 있는 경우에 대한 평균유속, 마찰속도 및 수심은 각각 U' , U_*' , H' 로 나타내었다.

5.1. 유속계수와 식생밀도의 관계

유속계수 U'/U_* 와 식생의 밀도 aH' 및 식생면적비 λ 의 관계는 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 마찰속도 U_* 또는 U_*' 는 수심 H 또는 H' 와 하도경사로부터 계산되었으며, 유속계수 U'/U_* 는 aH' 또는 λ 가 증가함에 따라 지수적으로 감소함을 알 수 있었다. Fig. 8은 유속계수 U'/U_* 와 식생밀도의 지수로 사용되는 aH' 의 관계를 나타낸 것으로서 식생의 밀도가 증가할수록 유속계수는 감소함을 보여주고 있으며, 식생밀도 증가 초기에는 유속계수의 감소가 큰 반면에 그 이후로는 유속계수의 감소가 둔화됨을 알 수 있었다. 유속계수와 식생밀도의 관계를 회귀식으로 나타내면 식 (12)과 같으며, 표준오차(SE)와 결정계수(R^2)는 각각 0.2665, 0.949로 나타났다. 즉, 유속계수와 식생밀도 관계식과 실험결과의 결정계수가 $R^2 = 0.949$ 로서 식 (12)은 식생밀도가 증가하게 되면 유속계수는 지수곡선적으로 감소됨을 알 수 있으며, 이들 사이의 상관성은 매우 높은 것으로 분석되었다.

$$U'/U_*' = (0.244 + 0.289 aH')^{-1/1.757} \quad (12)$$

5.2. 유속계수와 식생면적비의 관계

Fig. 9는 유속계수 U'/U_* 와 식생면적비 λ 의 관계를 나타낸 것으로서 식생면적비가 증가할수록 유속계수가 감소함을 보여주고 있으며, 식생면적 증가 초기에는 유속계수의 감소가 큰 반면에 그 이후로는 유속계수의 감소가 둔화됨을 알 수 있었다. 유속계수와 식생면적비의 관계를 회귀식으로 나타내면 식 (13)와 같으며, 표준오차와 결정계수는 각각 0.5488, 0.949로 나타났다.

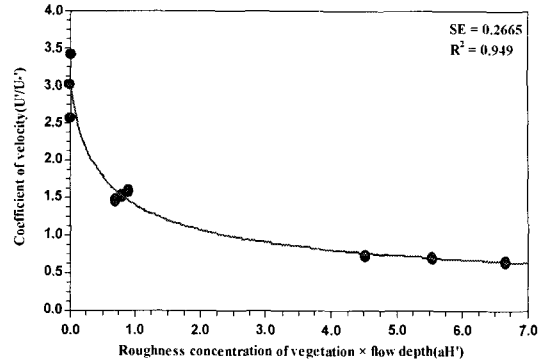


Fig. 8. The relationship of velocity coefficient(U'/U_*) and vegetation density(aH').

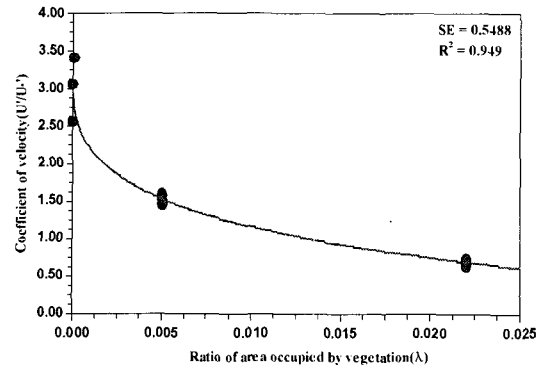


Fig. 9. The relationship of velocity coefficient(U'/U_*) and the ratio of vegetation area(λ).

즉, 호안의 식생면적비와 유속계수의 관계식이 결정계수 $R^2 = 0.949$ 로서 식 (13)은 상관도가 매우 높게 나타났으며, 수로에서 식생면적비가 증가하면 유속계수 또한 지수곡선적으로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

$$U'/U_*' = (0.518 + 36.949 \lambda)^{-1/0.818} \quad (13)$$

5.3. 마찰계수와 식생밀도의 관계

Fig. 10은 마찰계수 f' 와 식생밀도의 지수로 사용되는 aH' 의 관계를 나타낸 것으로서 aH' 가 증가할수록 마찰계수가 증가함을 보여주고 있으며, 식생밀도 증가 초기에는 마찰계수의 증가가 큰 반면 그 이후로는 마찰계수의 증가가 둔화됨을 알 수 있었다. 마찰계수와 식생밀도의 관계를 회귀식으로 나타내면 식 (14)과 같으며, 표준오차와 결정계수는 각각 0.073, 0.808로 나타났다. 여기서, 호안공의 식생밀도와 마찰계수간의 결정계수는 $R^2 = 0.808$ 로서 다소 상관성은 낮았으며, 식생밀도의 증가에 따라

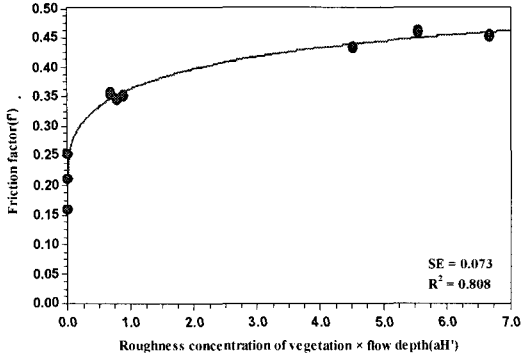


Fig. 10. The relationship of friction coefficient(f') and vegetation density(aH').

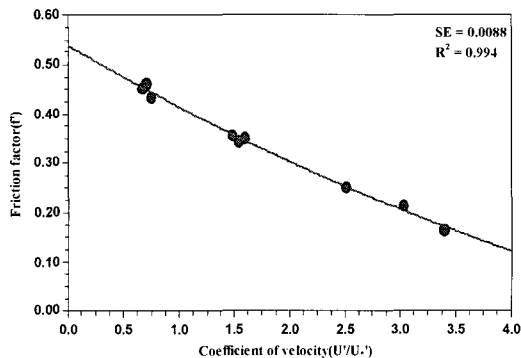


Fig. 11. The relationship of friction coefficient(f') and velocity coefficient(U'/U_*).

마찰계수는 점진적으로 증가하고 있음을 알 수 있었다.

$$f' = \frac{1}{(4.760 - 1.993 aH'^{0.141})} \quad (14)$$

5.4. 마찰계수와 유속계수의 관계

Fig. 11은 마찰계수 f' 와 유속계수 U'/U_* 의 관계를 나타낸 것으로서 유속계수가 증가함에 따라 마찰계수가 감소함을 보여주고 있다. 실험결과로부터 얻은 회귀곡선은 2차식의 형태로 나타나고 있으나 거의 선형에 가까운 형태를 보여주고 있으며, 마찰계수가 증가함에 따라 유속계수가 감소하는 흐름의 양상을 잘 나타내고 있다. 마찰계수와 유속계수의 관계를 회귀식으로 나타내면 식 (15)와 같으며, 표준오차와 결정계수는 각각 0.0088, 0.994로 나타났다. 여기서, 식생발달에 따른 마찰계수와 유속계수는 상관성이 매우 높아서 결정계수 $R^2 = 0.994$ 인 것으로 나타났으며, 유속계수의 증가에 따라 마찰계수는 거의 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

$$f' = 0.538 - 0.130(U'/U_*) + 0.00659(U'/U_*)^2 \quad (15)$$

5.5. 유효소류력과 식생밀도의 관계

Fig. 12는 유효소류력 F_0 와 식생밀도의 지수로 사용되는 aH' 의 관계를 나타낸 것으로서 aH' 가 증가할수록 유효소류력이 감소함을 보여주고 있으며, 식생밀도 증가 초기에는 유효 소류력의 감소가 큰 반면에 그 이후로는 유효소류력의 감소가 둔화됨을 알 수 있었다. 유효소류력과 식생밀도의 관계를 회귀식으로 나타내면 식 (16)와 같으며, 표준오차와 결정계수는 0.079, 0.933으로 나타났다. 여기서, 식생수로의 유효소류력은 식생밀도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 식생밀도의 증가에 따라 유효소류력은 지수곡선적으로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

$$F_0 = \frac{1}{1.027 aH' + 1.231} \quad (16)$$

5.6. 분석결과와 고찰

본 연구는 호안 Mattress/Filter에 의한 소류력 저감과 식생복원성을 검토하기 위하여 Mattress/Filter 식생모형수를 구축하였으며, 실험조건은 식생이 있는 경우와 없는 경우로 크게 구분하였고 유량과 식생의 식재간격을 달리하여 실험을 실시하였다.

유속계수를 나타내는 마찰속도는 수심과 하도경사를 이용하여 계산하였으며, 식생밀도가 증가할수록 유속계수는 지수함수 형태로 감소함을 알 수 있었다. 식생밀도의 증가 초기에는 유속계수의 감소폭이 크게 나타났으나, 그 후에는 유속계수의 감소폭이 감소되고 있으며 유속계수와 식생밀도의 상관관계를 회귀분석한 결과 결정계수가 0.949로 나타나

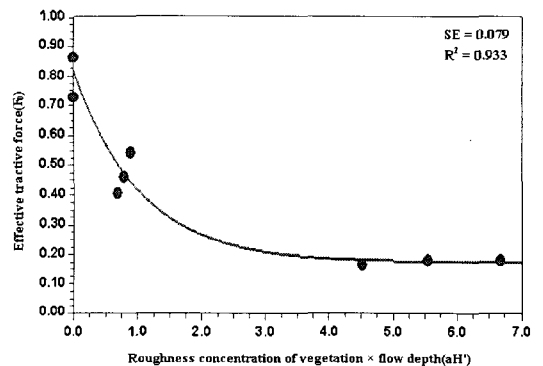


Fig. 12. The relationship of effective tractive force(F_0) and vegetation density(aH').

유속과 식생을 매우 밀접한 관계를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 유속계수와 식생면적비의 관계도 살펴보면 유속계수와 식생밀도와의 관계가 거의 동일한 관계 동일한 관계를 나타내고 있었다. 마찰계수와 식생밀도의 관계를 살펴보면, 식생밀도의 증가초기에는 마찰계수가 큰 폭으로 증가하였으나 시간이 지날수록 증가폭이 점진적으로 감소하여 일정한 양상을 보이고 있었다.

유속계수가 증가함에 따라서 마찰계수가 거의 직선형태로 감소하는 양상을 나타내고 있으며 식생 발달에 따른 마찰계수와 유속계수의 상관성은 매우 높게 나타났다. 유효소류력과 식생밀도의 관계는 식생밀도가 증가함에 따라 유효소류력이 감소하였으며, 식생밀도의 증가초기에는 큰 폭의 소류력 감소가 있었으나 시간이 경과함에 따라 감소의 폭이 둔화되었으며, 유효소류력은 식생밀도에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 따라서 호안 Mattress/Filter 시스템의 다공성 구조 및 식생구조는 호안부에서의 마찰계수를 증가시켜 유속을 감소시키고 유효소류력을 감소시킴에 따라 호안부의 안정에 크게 기여할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서 호안 Mattress/Filter가 시공된 식생 호안에서 수리학적 거동의 양상을 실험적으로 파악할 수 있으나 모형수로와는 달리 실제 하천의 식생은 대기환경이나 기상조건에 따라 크게 달라지고 또한 더욱 복잡한 수리학적 흐름의 영향을 받고 있기 때문에 본 연구에서 얻은 결과가 실제 자연하천에서도 유효하다고는 볼 수는 없다. 그러나 실제 자연하도에서는 식생밀도, 유량조건 및 하도경사 등을 인위적으로 조절할 수 없기 때문에 여러 가지 수리학적 조건을 반영하기가 현실적으로 불가능하며, 모니터링 위주의 연구가 이루어질 수밖에 없는 한계가 있다. 따라서 향후 호안 Mattress/Filter의 수리학적 특성 및 식생복원특성에 대한 연구는 실내 수리모형실험과 현장 모니터링을 병행하여 분석할 때 호안의 식생복원성에 관한 효과를 정확히 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 하천 본래의 기능인 환경생태기능을 회복시킬 수 있는 방안을 강구하고 훼손된 하천 생태계의 질을 향상시켜 건전한 하천생태계를 복원시키는 호안 Mattress/Filter에 의한 소류력 저감에 대하여 고찰하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Mattress/Filter의 다공성 및 식생구조는 호안부에서 흐름의 에너지 및 유속을 감소시키며, 식생

밀도가 증가함에 따라 소류력이 감소 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다

2) Mattress/Filter에 사용되는 채움재는 자갈, 폐콘크리트 및 슬래그를 사용하기 때문에 표면이 거칠고 조도계수가 증가하게 되며, 호안에서의 조도계수의 증가는 유속을 감소시키며, 따라서 소류력이 감소하게 됨을 알 수 있었다.

3) Mattress/Filter와 식생이 일체화된 경우 식생 발달 및 안정화가 이루어져 Mattress/Filter와 식생에 의해 조도계수의 증가 및 유속감소의 효과가 더욱 증가하게 되어 결과적으로 소류력 감소효과는 더욱 증가하게 됨을 알 수 있었다.

4) 호안부에서 식생의 발달은 유속변화에 의한 침식 및 퇴적에 영향을 많이 받기 때문에 이러한 측면에서 호안부에서의 소류력 완화는 침식을 감소시키므로 식생의 활착 및 안정화에 크게 기여하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 제한된 실내 실험수로에서 수행된 연구결과이기 때문에 특히 식생복원성의 평가는 많은 제약 속에서 이루어졌으며, 이 연구의 결과를 실제에 적용하기 위해서는 향후 하천현장에서 식생복원화 과정을 모니터링하여 복원효과를 판단해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 환경부 한국환경기술진흥원이 추진하는 “2002~2005년도 차세대 핵심환경기술개발사업”의 자유공모과제(과제번호: 051-041-004) 연구수행 결과의 일부이며, 연구비지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Fiuzat, A. A., Y. H. Chen and D. B. Simons, 1982, Stability Tests of Rip-Rap in Flood Control Channels, Officine Maccaferri Technical Report, Fort Collins Colorado.
- 2) Maynard, S. T., 1995, Gabion-mattress Channel Protection Design, J. Hydr. Engrg., ASCE, 121(7), 519-522.
- 3) Simons, D. B., Y. H. Chen and L. J. Swenson, 1983, Hydraulic Test to Develop Desing Criteria for the Use of Reno Mattresses, Officine Maccaferri Technical Report, Fort Collins, Colorado.
- 4) Simons, D. B., Y. H. Chen and L. J. Swenson, 1983, Designing Guidelines & Criteria. Channels & Hydraulic Structures on Sandy Soils, Officine Maccaferri Technical

- Sandy Soils, Officine Maccaferri Technical Report, Fort Collins, Colorado.
- 5) 지흥기, 배상수, 임기석, 허수영, 2001, 돌망태를 이용한 호안구조물의 수리학적 특성, 학술발표회 논문개요집, 한국수자원학회, 769-774.
 - 6) 배상수, 허창환, 지흥기, 이순탁, 2002, 하상보호용 매트리스의 수리학적 특성연구, 한국수자원학회 논문집, 35(1), 77-90.
 - 7) 배상수, 이경욱, 허창환, 지흥기, 2002, 호안용 돌망태 매트리스의 수리학적 특성연구, 한국농공학회 논문집, 44(2), 81-98.
 - 8) 배상수, 지흥기, 이경욱, 송시훈, 이순탁, 2002, 슬래그 채움재를 사용한 하상보호용 매트리스의 수리학적 특성, 대한토목학회 학술발표회 논문개요집, 558-561.
 - 9) 배상수, 지흥기, 윤동기, 임기석, 이순탁, 2002, 슬래그 채움재를 사용한 호안용 매트리스의 수리학적 특성, 대한토목학회 학술발표회 논문개요집, 389-392.
 - 10) 이경욱, 지흥기, 배상수, 전도석, 이순탁, 2002, 매트리스 수리구조물의 설계프로그램 개발, 대한 토목학회 학술발표회 논문개요집, 562-565.
 - 11) Ishikawa, Y., K. Mizuhara and S. Ashida, 2000, Effect of density of trees on drag exerted on trees in river channels, J. For Res., 5, 271-279.
 - 12) Tenna, R. and B. Barry, 2003, Stream vegetation and flow regimes, Water & Atmosphere, 11(1), 18-20.
 - 13) Motykq, J. and Welsby, 1987, A Review of Novel Shore Protection Methods, 6, Final Report, Hydraulic Research Ltd., Report SR 106.
 - 14) Maynard, S. T., 1995, Gabion-mattress Channel Protection Design, J. Hydr. Engrg., ASCE, 121(7), 519-522.
 - 15) Streeter, V. L., B. Wylie and K. W. Bedford, 1998, Fluid mechanics, McGraw-Hill, Boston.
 - 16) Hayashi, T, 1996, Fundamentals of hydraulic engineering, Kajima, Tokyo.
 - 17) Darby, S. E. and C. Thorne, 1996, Predicting stage-discharge curves in channels with bank vegetation, J. Hydr Engng ASCE, 122, 583-586.
 - 18) Darby, S. E., 1999, Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential, J. Hydr Engng ASCE, 125, 443-454
 - 19) Ishikawa, Y., K. Mizuhara and S. Ashida, 2000, Effect of density of trees on drag exerted on trees in river channels, J. For Res., 5, 271-279.