

조도보정 블록 수로에서의 조도계수 추정

최흥식* · 김시훈**

Choi, Heung Sik*, Kim, Si Hoon**

An Estimation of Roughness Coefficient in a Channel with Roughness Correction Blocks

ABSTRACT

A volume density of roughness correction blocks in a channel is defined and the corresponding roughness coefficient(n) is estimated by analyzing the diverse hydraulic characteristics of VR, the product of the average velocity and the hydraulic radius, block Reynolds number (Re^*), drag coefficient (C_D), and the roughness coefficient (n_b) of bottom shear. The increase of VR and block Reynolds number causes the exponential decrease of roughness coefficient converged to a constant value as expected. The drag coefficient also exponentially decreases as block Reynolds number increases as well. The drag force is governed by the block shape defined by volume density in high block Reynolds number of turbulent flow region. For more accurate estimation of roughness coefficient the use of the correlation equation of it is required by block Reynolds number and volume density. The regression equations for n -VR, C_D - Re^* , and n_b - C_D are presented. The regression equations of roughness coefficient are also presented by block Reynolds number and volume density. The developed equation of roughness coefficient by block Reynolds number and volume density has practical use by confirming the coincidence between the experimental results and the results of HEC-RAS using the developed equation.

Key words : Roughness coefficient, Density of volume, Block Reynolds number, Drag coefficient

초 록

본 연구는 조도보정 블록수로에서의 체적밀집도를 정의하고, 평균유속(V)과 수리반경(R)의 곱인 VR, 블록 Reynolds수(Re^*), 항력계수(C_D) 및 바닥전단특성의 바닥조도계수(n_b)를 분석하여 조도계수(n)를 산정하였다. VR과 블록 Reynolds수가 증가함에 따라 조도계수가 감소하여 일정 함에 수렴하는 경험적인 양상을 확인하였다. 블록 Reynolds수의 증가에 따라 항력계수는 감소하여 일정한 값에 수렴하는 것으로 나타났다. 블록 Reynolds수가 큰 난류구간에서는 항력계수는 밀집도로 정의한 조도블록의 형상에 지배적임을 볼 수 있다. 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 블록 Reynolds수와 체적밀집도에 의한 상관식의 개발이 요구된다. n -VR, C_D - Re^* , n_b - C_D 상관에 대한 관계곡선식을 제시하였다. 조도계수를 산정할 수 있는 블록 Reynolds수와 체적밀집도와와의 상관관계식을 제시하였다. 실험결과를 토대로 블록 Reynolds수와 체적밀집도에 의한 조도 계수 산정식을 이용한 HEC-RAS의 수리특성 분석결과는 실험결과와 잘 일치함을 보여주어 산정한 조도계수 추정식의 적용성을 확인하였다.

검색어 : 조도계수, 체적밀집도, 블록 Reynolds수, 항력계수

1. 서론

조도계수는 유량, 하상재료, 하천의 만곡, 수로바닥의 형상, 단면형상의 변화, 하상과 제방비탈면에서의 식생상태 등의 매우 복잡한 인자들에 의해 결정된다. 조도를 지배하는 마찰저항은 흐름과 수로바닥 재료의 경계면에서 발생한다. 마찰저항의 크기는 하상에 분포하는

* 정회원 · 교신저자 · 상지대학교 이공대학 건설시스템공학과 교수공학박사 (Corresponding Author · Sangji University · hsikchoi@sangji.ac.kr)

** (주)정엔지니어링 수자원부 사원 (sihoon0220@naver.com)

Received February 14, 2013/ revised April 25, 2013/ accepted October 16, 2013

입도크기에 따라 증가 또는 감소한다. 또한 바닥 구성물질은 유체의 점성 및 압력의 저항에 기인한 수리학적 항력을 유발하고 이는 조도계수의 변화를 야기한다. 바닥 구성물질에 의한 항력은 입자조도와 형상조도로 구분한다. 일정 규모이상의 구성물질 유입에 따른 항력의 발생은 수면형상과 유속의 변화를 가져온다. 이러한 조도의 변화는 Manning 조도계수, Chezy 저항계수 또는 Darcy-Weisbach의 마찰계수로 나타낼 수 있다. 이중 Manning 조도계수가 많이 사용된다.

국내 하천에서의 홍수위를 결정할 때 가장 중요한 변수중의 하나는 Manning 조도계수로서 이에 의한 많은 연구가 진행되어 왔다. 수리학적 모형의 사용에 따른 중요한 고려사항 중 하나는 정확한 조도계수의 입력이며, 적절하지 않은 조도계수의 사용은 계산결과에 많은 오차를 가져온다. 하천 설계에서 조도계수의 결정은 보통 부동류 모형에 의한 방법, NCALC 모형(Jarret and Petsch, 1985)에 의한 방법, 하상재료에 의한 방법이 있으며, 이렇게 결정된 조도계수는 유량과 하천구간에 상관없는 단일 값인 경우가 대부분이다. 이는 유량과 하상의 구성재료에 따른 조도계수의 변화를 고려하지 않고 전체 하천구간에 대해 일정한 조도계수를 사용하고 있어 실제 하천의 설계 시 과다 또는 과소 설계의 원인이 될 수 있다. 이에 따라 실제 하천의 설계 시에 사용되는 조도계수의 보정이 필요한 실정이다.

우리나라의 국토는 65%가 산지하천으로 구성되어 있으며 비교적 경사가 급하고 하상재료가 자갈보다 큰 입자뿐만 아니라 홍수 시 산지의 수로나 계곡에서의 토석의 유입으로 바닥의 구성 물질이 상당히 큰 입자로 구성되어 있다. 큰 입자로 하상이 구성된 산지하천에서의 조도계수의 정확한 산정은 하천 설계요소인 홍수위, 홍수 시 유속에 기인한 전단 소류력 등에 중요하다.

이러한 차원에서 조도보정용 블록을 가진 수로에서의 조도계수의 추정은 일정규모 이상의 큰 입자를 가진 산지하천의 조도계수의 정확한 산정을 위한 기초연구가 가능할 것으로 판단된다. 이를 위해서 바닥구성물질의 체적과 유수의 체적에 대한 바닥구성물질의 체적밀집도를 정의하고 흐름특성과 더불어 이에 따른 조도계수와의 상관특성을 분석하였다.

2. 조도계수 산정

2.1 기존의 연구

하상재료 특성에 대한 조도계수의 결정은 Cowan (1956), Chow (1959), 미국지질조사국(USGS)의 사진 자료를 이용한 방법(Arcement and Schneider, 1989) 등의 많은 경험적 방법들이 존재한다. 이들은 모두 국외 하천에 적용된 방법들로 국내 하천에 적용할 때에는 신중한 검토가 필요하다.

Lee and Lee (2004)는 한강에서 수리학적 홍수추적 모형을 사용하여 조도계수를 산정하였다. Lee and Park (2006)은 수위-유량자료가 없고 자갈하상을 갖는 하천의 조도계수 산정에 하상표면에 작용하는 전단응력을 통해 등가조도를 산정하였다. Kim et al.(2007)은 USGS의 NCALC 모형을 이용하여 실측 수위와 유량 자료를 이용하여 자갈하천의 조도계수를 산정하였다. NCALC는 Manning식을 이용하여 구간의 수리특성을 반영하고 조도계수를 계산하는 모형이다. Lee et al.(2008)은 자갈하천에서 실측 수위자료로 경사면적법을 이용하여 유량산정을 한 결과 조도계수가 주요한 영향을 미치는 것을 확인하였다. Kim et al.(2009)의 연구에서는 대상구간의 평균조도계수를 산정하여 산정된 조도계수와 여러 경험식을 비교한 결과 Limerinos식의 적용이 가장 타당한 것으로 판단하였다.

식생수로에서의 조도계수의 분석으로 Ree and Palmer (1949)는 식생의 높이가 수심에 비해서 작을 경우 식생사이의 흐름(intermediate flow)의 지체정도(retardance class)를 평균유속(V)과 수리반경(R)의 곱에 의한 VR 관계를 도표를 통해서 제시하였다. 이 실험은 주로 수중의 식생에 대해 실험한 것으로 지체정도는 VR 의 값이 커질수록 감소함을 보였다. 이는 VR 이 커질수록 식생의 구부러짐이 커지면서 잠수도가 증가함에 있는 것으로 간주된다. Kouwen and Li (1980)는 식생의 높이와 강성(stiffness)을 매개변수로 하여 수중식생에 의한 마찰계수 결정의 대안을 제시하였다. Kouwen et al.(1981)은 $n \sim VR$ 의 실험적 속성에 의해 이 관계는 경사가 5% 보다 작거나 식생이 짧고 강하면 타당하지 못함을 제시하였다. Temple et al.(1987)은 큰 입자를 가진 하상재료의 크기보다 수심이 큰 흐름에서는 하상재료 사이의 흐름층이 상대적으로 작아지고 하상재료 상부의 흐름층이 커짐으로 이들 사이의 흐름은 상대적으로 무시 가능하므로 저항계수는 일정하게 됨을 규명하였다. Wu et al.(1999)은 식생이 수중에 잠긴 경우와 잠기지 않은 경우에 식생의 밀집도를 정의하고 이에 따른 조도계수, 항력을 포함한 제반 수리특성의 변화를 분석하였다.

식생이 있는 하천에서의 조도계수 산정에 관한 국내의 연구는 Lee et al.(2009), Kim et al.(2010)의 연구가 있다. 이와 같은 연구배경에 의해서 토석류 유입하천에서의 흐름 저항의 산정을 식생에 의한 흐름 산정 기법을 이용하여 제시할 필요가 있을 것으로 평가된다.

2.2 조도보정 블록 수로에서 조도 특성

큰 입자를 가진 조도보정 블록에 가하는 흐름저항은 그 크기에 따른 상대수심에 의해 다르다. 큰 입자를 가진 하상재료가 있는 조도보정 블록 수로에서의 항력의 변화에 따라서 Manning의 조도계수는 바닥조도계수(n_b)와 벽면조도계수(n_w)이다. 바닥저항은

바닥면의 거칠기 보다는 하상재료의 거칠기에 지배되므로 바닥조도계수는 하상재료 거칠기 계수로 나타냈다(Fathi-Maghadam and Kouwen, 1997). 시험수로의 벽면과 바닥의 서로 다른 조도로 구성되고 단면적(A)은 벽면지배 단면적(A_w)과 바닥지배단면적(A_b)인 $A = A_w + A_b$ 이고 단면적은 수로 폭(B)과 수심(D)의 곱이고 평균유속은 수로단면에 균일하게 분포된다고 가정한다.

$$V = \frac{1}{n_w} R_w^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{n_b} R_b^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

여기서 V 는 평균유속, S 는 마찰경사로 수면경사 또는 등류흐름에서 바닥경사이다. R_w 와 R_b 는 벽과 바닥에서 각각 수리반경으로 $A_w/2D$ 와 A_b/B 이다. 유리벽의 경우는 n_w 는 0.01을 사용(Graf and Chhun, 1976)한다. 바닥 조도계수는 $n_b = \frac{R_b^{2/3} S^{1/2}}{V}$ 로부터 산정 가능하다. 하상재료에 기인한 항력을 추정하기 위해서 등류흐름방향의 일정구간(L)에서의 중력에 의한 힘(F_G)과 바닥재료와 수면에서의 항력(F_B)과 마찰력(F_S)에 의한 힘의 균형은 다음과 같다(Fig. 1).

$$F_G = F_{G1} + F_{G2} = F_B + F_S \quad (3)$$

하상재료가 수중에 잠기면서 등류흐름에서 하상재료 상단의 흐름상부의 중력 F_{G1} 과의 평형을 위한 하상재료와 상부흐름사이에서 전단응력 F_τ 가 존재한다. 여기서 $F_\tau = \rho g(BHL)S$ 이다. 하상재료 사이의 흐름에서 항력은 전단저항력과 중력성분 F_{G2} 와 같게 작용

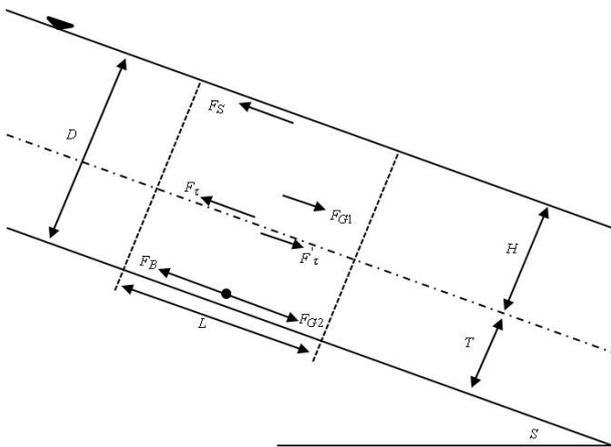


Fig. 1. Force Balance for a Given Control Volume

한다(Fig. 1).

여기서 ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도이다. F_B 는 하상재료에 작용하는 항력이고, F_S 는 수로의 벽과 바닥에 의한 표면 마찰력이다. 벽과 바닥은 매끄러운 재료로 만들어져 있으므로 F_S 의 값은 상대적으로 매우 작다. Fenzl (1962)은 등류수로의 식생수로 실험에서 이 값은 F_B 에 비해서 무시할 정도로 작음을 제시하여 무시하였다. 항력은 중력에 의한 힘과의 평형으로 다음과 같다.

$$F_B = C_D(\lambda TBL) \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

여기서 C_D 는 항력계수, λ 는 하상재료의 면적계수로 수로 단위 길이당의 수류의 체적에 따른 하상재료의 면적을 나타내는 밀집도와 하상재료의 종류, 밀도 및 형상에 따라 달라진다. T 는 하상재료의 크기로 일정하다고 간주한다. λTBL 은 수로 L 을 따른 하상재료의 전면 면적이다. 따라서 항력, 전단력과 중력의 평형에서 다음과 같다.

$$C'_D = \left(\frac{D}{T}\right) \frac{2gS}{V^2} \quad (5)$$

여기서 $C'_D = \lambda C_D$ 이고, 위의 식은 하상재료의 항력계수(C'_D)를 산정하는데 사용되고, 하상재료의 형상에 의해 결정된다. 이 식은 등류흐름에 대해서 유도한 식으로 항력을 계산하는 운동량방정식을 적용함으로써 부등류에 적용 가능하다. 개수로 실험에서 벽면효과는 무시하여 대부분의 흐름 에너지의 소모는 바닥 하상재료 저항에 기인하는 것으로 간주한다. Wu et al.(1999)은 식생에 의한 조도계수의 변화의 실험적 규명에서 벽면의 지배단면적은 바닥의 지배단면적에 비해 현저하게 작음을 도표로 제시하여 흐름단면을 A 를 바닥지배단면적 A_b 로 대체하고 그에 따른 수리수심은 $R_b \approx D$ 로 가능하고 바닥의 조도계수는 다음의 관계를 가진다.

$$n_b = \left(\frac{D^{1/6} T^{1/2}}{\sqrt{2g}}\right) \sqrt{C'_D} \quad (6)$$

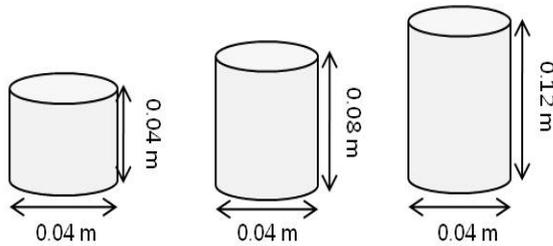
조도보정 블록을 가진 수로에서의 조도계수의 추정을 위하여 하상에 석고모형을 이용하여 조도블록을 재현하였다. 조도계수는 조도블록의 밀집도를 정의하여 Manning 식을 이용하여 산정하였다. 밀집도는 Wu et al.(1999)이 식생수로에서 식생의 면적밀집도와 체적밀집도를 정의한 내용과 같이 산정하였고, 조도계수의 변화를 체적밀집도와 다양한 수리특성과의 상관성을 규명하였다.

3. 실험내용 및 방법

3.1 실험수로의 설계 및 계측

조도보정 블록에 의한 조도계수를 산정하기 위하여 개수로 모형 실험을 수행하였다. 실험 장치는 가변 경사식으로 유량을 공급하는 고수조와 저수조의 각각 저수용량은 2m³이고, 6.75m³이다. 유량공급은 60Hz, 11kW의 원심력 펌프로 최대유량 2,800l/min을 양수할 수 있고, 수로의 길이는 12m, 폭 및 높이는 0.4m이다. 수로로 양쪽 외벽은 10mm의 투명유리로 되어 있다. 유량은 Eq. 7을 이용하여 계산하였고, L_w 는 위어의 길이, H_w 는 위어상의 전수두, C_d 는 유량계수, P_w 는 위어의 높이를 나타내며 각 지점별 수심을 측정하여 유속을 산정하였다.

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L_w H_w^{3/2}, \quad C_d = 0.611 + 0.08 \frac{H_w}{P_w} \quad (7)$$

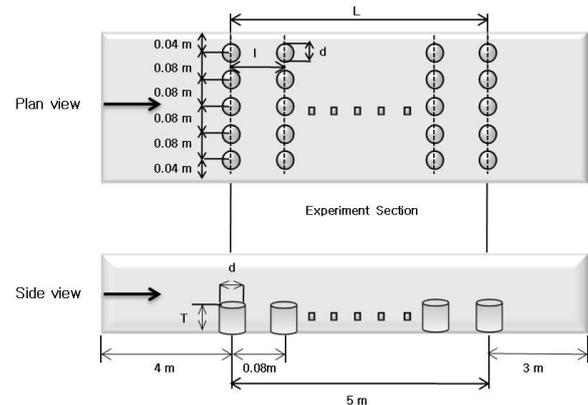


(a) Dimension of Roughness Blocks

3.2 모형실험계획 및 방법

조도보정 블록을 가진 수로에서의 조도계수의 추정은 Manning 공식을 이용하였고, 조도보정 블록은 Fig. 2와 같이 0.04m×0.04m, 0.04m×0.08m, 0.04m×0.12m 총 3cases의 원기둥 모형을 제작하였다. 조도보정 블록은 수로의 상류에서 4m 지점에 실험구간내에서 등류를 유도하기 위하여 길이 5m 구간에 일정한 간격으로 이격시켜 배치하였다(Fig. 3). 유량은 0.01~0.035m³/s으로 각각의 case별 9가지의 유량조건과 하류단의 웨어의 조절에 의한 다양한 수심에 대해 실험을 수행하였다. 조도계수를 분석하기 위한 수리특성의 검토는 조도보정 블록수로의 블록Reynolds수 $Re^* = VT/\nu$, 유속과 동수반경의 곱인 VR , 체적밀집도, 조도보정 블록의 항력계수 C_D' 등의 변수를 이용하였다. 여기서 ν 는 물의 동점성계수이다. Table 1는 실험계획이다.

각 실험의 경우에 면적밀집도는 0.199이고, 체적밀집도는 흐름의 특성에 따른 수심의 변화로 달라지며, 하류단의 웨어의 조절에



(b) Experimental Design

Fig. 2. Model Dimension and Experimental Design

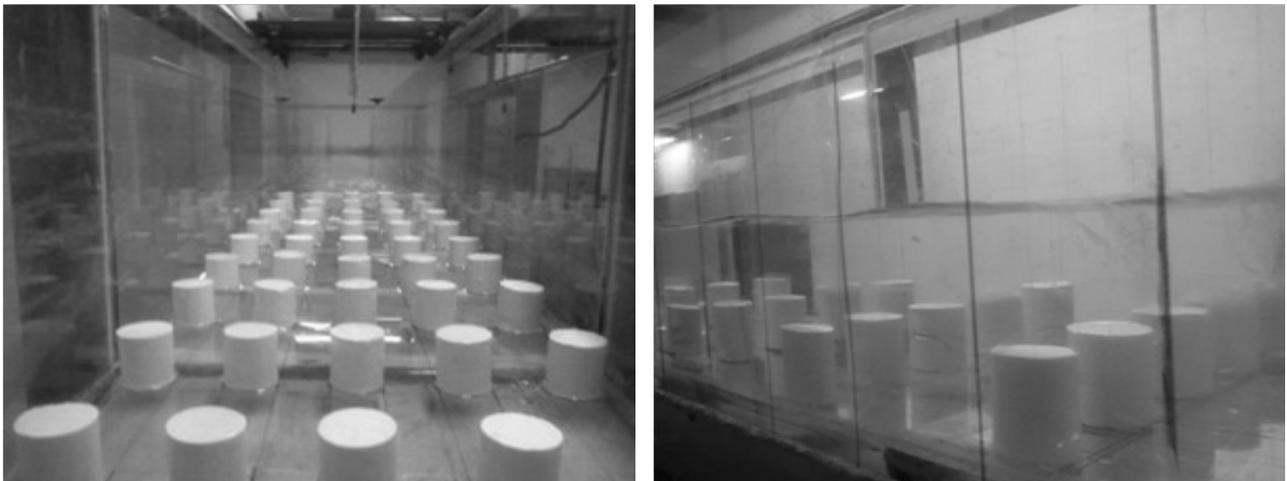


Fig. 3. Photos Showing Experiments

Table 1. Experimental Schemes

Types	Experimental Design			Tail-water Depth (m)	Discharges Q(m ³ /s)	Area Density λ	Rem.
	Diameter d(m)	Height of Model T(m)	Distance l(m)				
Case I	0.04	0.04	0.08	0.026~0.042	0.016~0.035	0.199	Circle
Case II	0.04	0.08	0.08	0.049~0.082	0.014~0.035		
Case III	0.04	0.12	0.08	0.065~0.234	0.014~0.035		

의해 case I의 경우 0.0258m에서 0.0422m의 범위, case II는 0.0493m에서 0.0824m의 범위, case III은 0.0645m에서 0.2337m의 범위이다. Froude수가 증가에 따른 유속의 증가와 수심의 감소로 체적밀집도는 상대적인 변화로 커졌다. 아울러 수로의 경사는 일정하게 유지하고 하류단의 웨어의 조정을 통하여 수위를 0.026m에서 0.234m까지 변경시켜 실험을 수행하였다.

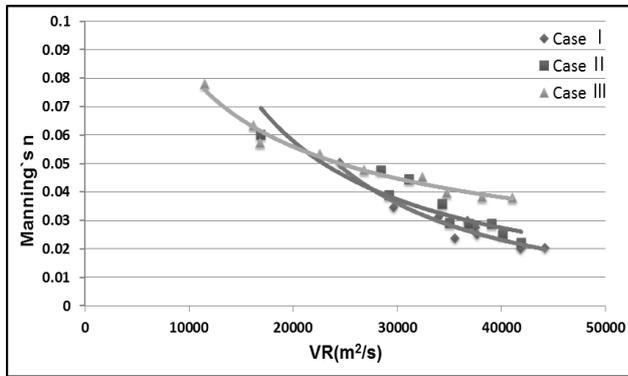
하상에서의 조도보정 블록의 면적 밀집도와 체적밀집도는 Wu et al.(1999)이 식생수로에서 제시한 방법을 사용하여 Eq. 8와 같이 정의하였다.

$$\text{면적밀집도}(\lambda) = \frac{\text{단위길이당 하상재료 면적}}{\text{단위길이당 수로 면적}},$$

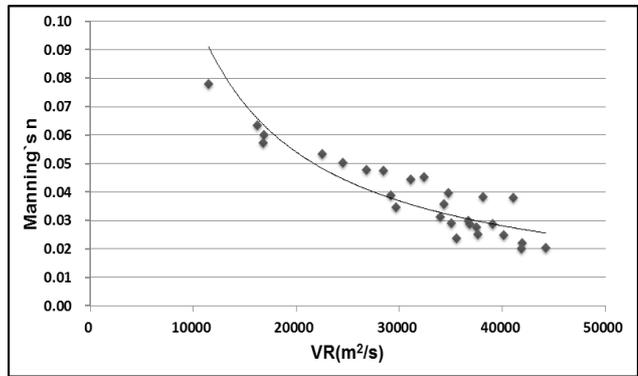
$$\text{체적밀집도}(\lambda^*) = \lambda \times \frac{T}{D} \quad (8)$$

4. 실험 결과 및 분석

Fig. 4는 실험에 의해 산정한 조도계수와 평균유속 V와 수리반경 R의 곱인 VR의 관계이다. VR의 값이 증가함에 따라 바닥마찰

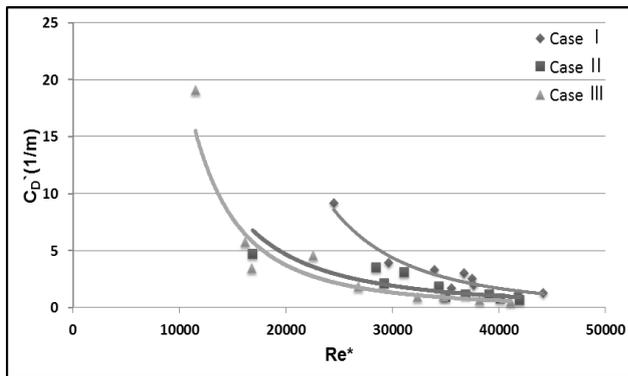


(a) Each Case

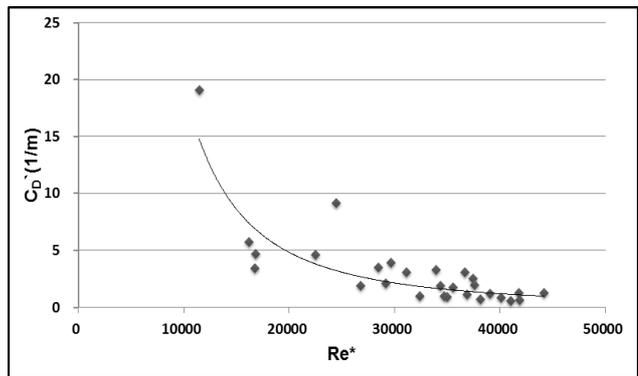


(b) Total

Fig. 4. Relationships between n and VR



(a) Each Case



(b) Total

Fig. 5. Relationships between C_D' and Re*

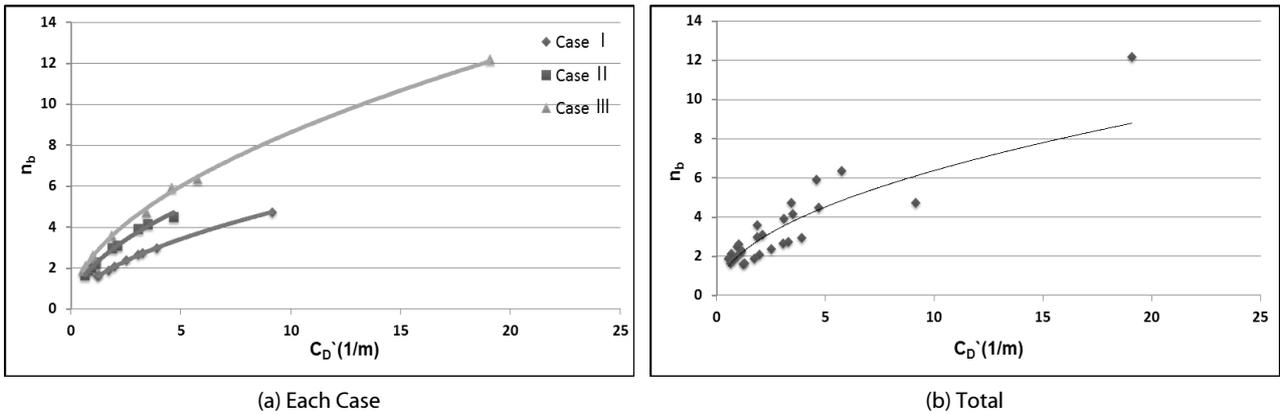


Fig. 6. Relationships between n_b and C_D'

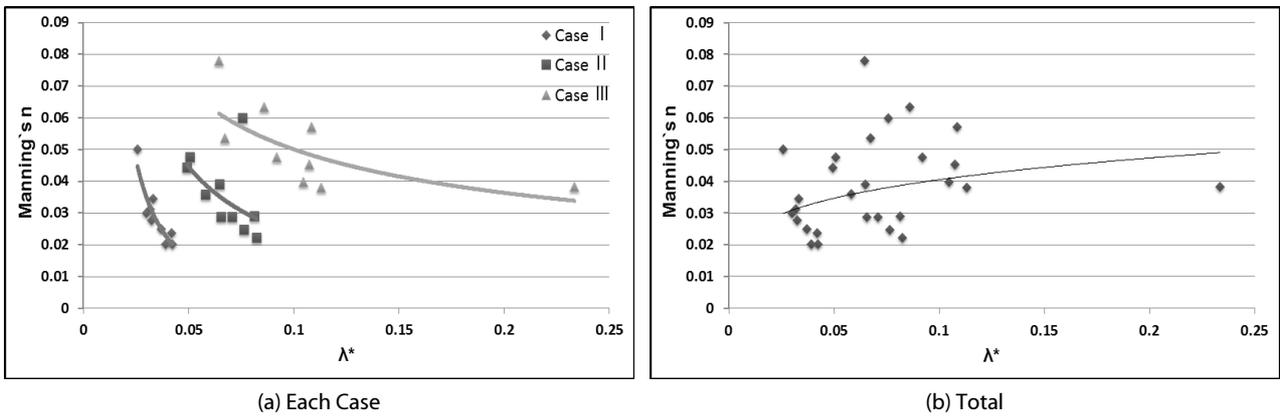


Fig. 7. Relationships between n and λ^*

의 조도계수가 감소하여 일정함에 수렴하는 경험적인 양상을 볼 수 있다. 그 값의 범위는 0.02에서 0.04의 값으로 평균 0.03 정도로 나타났다. 실험의 결과 조도블록의 높이가 크에 따른 체적 밀집도가 큰 경우에 조도계수가 크게 나타났다. 따라서 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 체적 밀집도를 고려할 필요가 있다.

Eq. 5에 의해 산정한 조도보정 블록의 항력계수는 조도보정블록의 체적밀집도를 감안한 항력계수이다. Fig. 5는 블록Reynolds 수가 커짐에 따라 항력계수는 지수함수적으로 감소하여 일정한 값에 수렴한다. 이는 블록Reynold 수가 커지는 난류영역에서는 조도계수의 감소로 나타난 예와 같이 항력계수 역시 감소함으로 나타났다. 즉 블록 Reynolds수가 큰 완전난류(wholly turbulent) 구간에서는 항력계수는 밀집도로 정의한 조도블록의 형상에 지배적이다.

Fig. 6은 바닥전단특성의 조도계수와 항력계수와의 관계를 나타내며, 항력이 커질수록 바닥전단특성의 조도계수가 커짐을 확인하였다. 또한 체적밀집도가 커짐에 따라 바닥전단특성의 조도계수가 커짐을 볼 수 있었다. 따라서 조도계수를 지배하는 항력계수와의

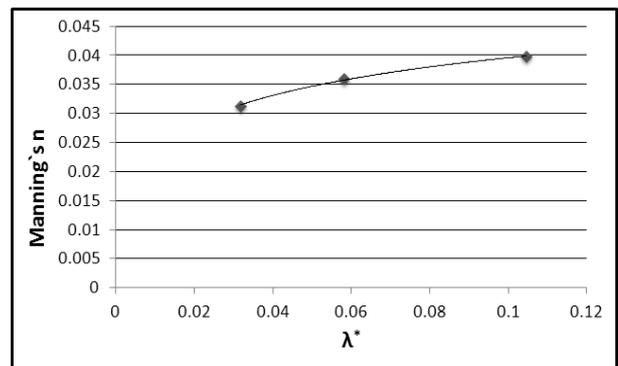


Fig. 8. Relation Curve of $n-\lambda^*$ with Same Block Reynolds Number

상관은 물론 체적밀집도 역시 조도계수를 지배함을 보여준다. Fig. 7은 조도계수와 체적밀집도와의 관계곡선이며, 체적밀집도가 증가할수록 조도계수가 감소하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 실험 수로의 한계와 조도계수를 지배하는 인자가 체적밀집도보다 유량에 더 큰 영향을 받은 것으로 판단되어진다. Fig. 8에서는

Table 2. Relation Equations of $n - VR$, $C'_D - Re^*$, and $n_b - C'_D$

Types		Relation Equations	Correlation Coefficients
$n - VR$	Case I	$n = 0.00017 VR^{-1.53}$	$R^2 = 0.91$
	Case II	$n = 0.00085 VR^{-1.08}$	$R^2 = 0.82$
	Case III	$n = 0.006 VR^{-0.55}$	$R^2 = 0.98$
	Total	$n = 0.001 VR^{-0.9}$	$R^2 = 0.77$
$C'_D - Re^*$	Case I	$C'_D = 2 \times 10^{14} Re^{*-239}$	$R^2 = 0.98$
	Case II	$C'_D = 2 \times 10^{13} Re^{*-227}$	$R^2 = 0.93$
	Case III	$C'_D = 6 \times 10^{13} Re^{*-231}$	$R^2 = 0.99$
	Total	$C'_D = 4 \times 10^{12} Re^{*-201}$	$R^2 = 0.65$
$n_b - C'_D$	Case I	$n_b = 1.433 C_D^{0.54}$	$R^2 = 0.99$
	Case II	$n_b = 2.088 C_D^{0.53}$	$R^2 = 0.99$
	Case III	$n_b = 2.58 C_D^{0.53}$	$R^2 = 0.99$
	Total	$n_b = 2.032 C_D^{0.5}$	$R^2 = 0.76$

Table 3. Relation Equations of the Roughness by Block Reynolds Number and Volume Density

Types		Relation Equations	Correlation Coefficients
$n - Re - \lambda^*$	Case I	$n = -2.590 \times 10^{-6} Re^* - 0.243 \lambda^* + 0.073$	$R^2 = 0.93$
	Case II	$n = -1.880 \times 10^{-6} Re^* + 0.087 \lambda^* + 0.077$	$R^2 = 0.98$
	Case III	$n = -9.740 \times 10^{-7} Re^* + 0.003 \lambda^* + 0.079$	$R^2 = 0.88$
	Total	$n = -1.080 \times 10^{-6} Re^* + 0.279 \lambda^* + 0.043$	$R^2 = 0.93$

흐름특성이 같은 블록Reynolds수를 가지는 각 경우에 대해 체적밀집도에 따른 조도계수를 분석한 결과를 나타낸다. 흐름특성이 같은 조건에서 조도계수의 변화는 체적밀집도에 따라 증가함을 보여준다. 따라서 조도계수는 수리특성에 크게 지배될 뿐만 아니라 체적밀집도에 지배됨을 확인하였다. 따라서 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 흐름특성을 나타내는 블록Reynolds수와 체적밀집도에 의한 상관식의 개발이 요구된다.

Table 2은 $n - VR$, $C'_D - Re^*$, $n_b - C'_D$ 상관에 대한 관계곡선식이다. 먼저, $n - VR$ 의 관계곡선식 Case별 결정계수가 높은 상관성을 보여주며 조도계수와 VR 의 밀접한 관련이 있음을 확인하였다. 전체적인 실험에 대한 관계곡선식은 결정계수가 떨어지는 것을 확인하였다. 따라서 보다 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 체적밀집도를 고려할 필요가 있음을 보여준다. $C'_D - Re^*$ 의 관계곡선식에서는 높은 결정계수를 가지고 있었으며, 역시 체적밀집도의 차이에 다른 항력계수의 변화로 나타남을 보여준다. $n_b - C'_D$ 의 관계곡선식은 결정계수 0.99의 높은 상관을 보였다. 바닥전단특성의 조도계수와 항력계수는 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3는 조도계수와 수리특성인 블록Reynolds수와 체적밀집도에 따른 상관관계식고, 결정계수가 0.88~0.98로 높은 상관성이 있다. 따라서 조도계수는 수리특성을 나타내는 블록Reynolds수와 체적밀집도와의 상관관계식의 사용이 정확한 조도계수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 7에서는 체적밀집도가 커짐에 따라 조도계수는 감소하는 것으로 나타났으나, 이는 앞서 지적한 바와 같이 체적밀집도 보다는 수리특성인 블록Reynolds수가 보다 지배적인 이유이다. 따라서 조도계수는 블록Reynolds수와 체적밀집도와의 상관관계식의 사용이 정확한 조도계수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. HEC-RAS를 이용한 조도계수 상관식의 검증

실험 유량 0.01~0.035m³/s의 범위에서 얻어진 조도계수와 실험 결과를 토대로 블록Reynolds수와 체적밀집도에 의해 산정한 조도계수의 값을 비교분석하였다. 실험에서 얻은 조도계수와 그에 따른 수위, 유속의 관계를 상관관계식에서 얻은 조도계수를 이용하여

Table 4. Comparison of Hydraulic Characteristics between the Experiments and the HEC-RAS Results Using Relation Equation of Roughness Coefficient

Types		Experiments						HEC-RAS		
		Q (m^3/s)	Block Reynolds Number	Volume Density λ^*	Roughness n	Depth (m)	Velocity (m/s)	Roughness n^*	Depth (m)	Velocity (m/s)
1	Case II	0.0139	13,176	0.0758	0.0599	0.3540	0.1400	0.0626	0.3550	0.1400
2	Case III	0.0155	16,733	0.0862	0.0635	0.3140	0.1660	0.0642	0.3150	0.1650
3	Case III	0.0248	28,502	0.0920	0.0477	0.2770	0.1770	0.0480	0.2800	0.1800
4	Case III	0.0251	21,170	0.0674	0.0535	0.2740	0.2340	0.0534	0.2750	0.2300
5	Case II	0.0275	18,631	0.0507	0.0476	0.2595	0.2390	0.0434	0.2650	0.2350
6	Case I	0.0312	37,625	0.0369	0.0250	0.2155	0.3649	0.0285	0.2200	0.3620
7	Case II	0.0312	27,917	0.0710	0.0287	0.2430	0.2990	0.0314	0.2450	0.2950
8	Case III	0.0325	43,432	0.2337	0.0383	0.2240	0.3510	0.0375	0.2250	0.3450
9	Case I	0.0327	41,836	0.0422	0.0201	0.1885	0.4337	0.0223	0.1895	0.4310
10	Case II	0.0328	23,774	0.0581	0.0359	0.2230	0.3580	0.0346	0.2250	0.3550
11	Case II	0.0329	31,489	0.0765	0.0247	0.2100	0.3640	0.0266	0.2150	0.3560
12	Case II	0.0331	34,135	0.0824	0.0222	0.2080	0.3960	0.0242	0.2150	0.3900
13	Case I	0.0342	36,721	0.0302	0.0300	0.2635	0.3249	0.0296	0.2620	0.3300
14	Case II	0.0348	28,496	0.0655	0.0288	0.1930	0.4290	0.0277	0.1950	0.4200

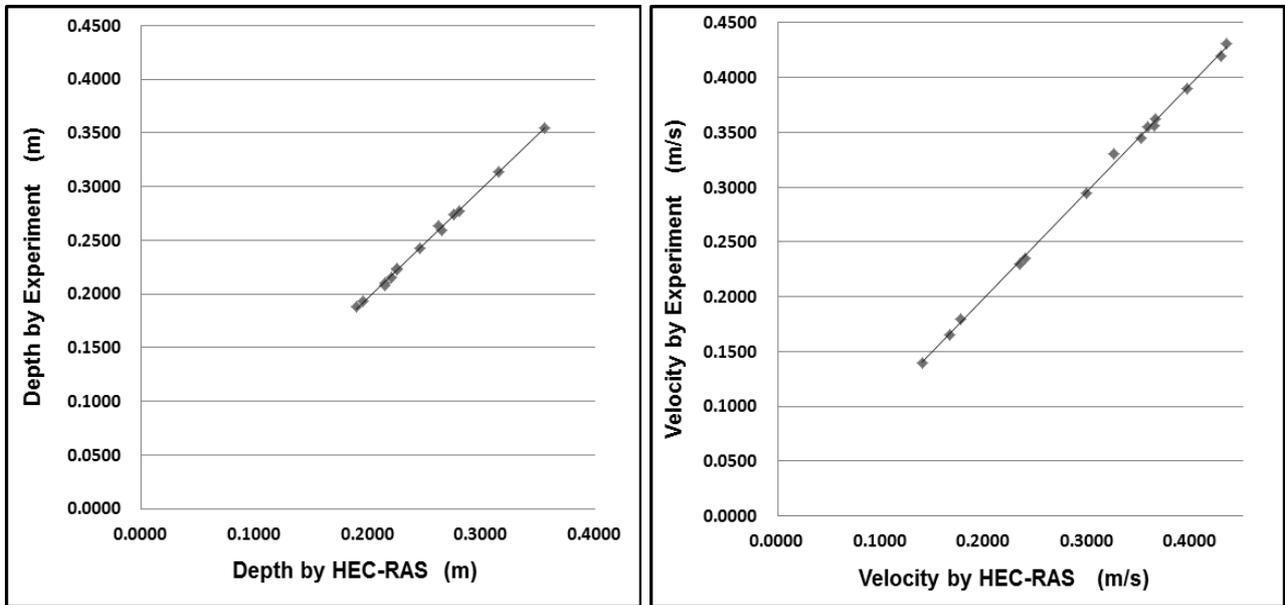


Fig. 9. Comparison of Hydraulic Characteristics between the Experiments and the HEC-RAS Results Using Relation Equation of Roughness Coefficient

HEC-RAS모형에 의한 수위와 유속의 비교는 잘 일치함을 확인하였다(Table 4).

Fig. 9는 수리모형 실험에서 얻은 수심, 유속과 실험결과를 토대로 얻은 조도계수 산정식을 이용한 조도계수를 사용한 HEC-RAS에 의한 수심, 유속의 관계를 도식화한 것이다. 실험에 의한 결과와

수치실험에 의한 결과가 잘 일치함을 보여주어 블록 Reynolds수와 체적밀집도에 의해 산정한 조도계수의 사용성을 확인하였다. Fig. 10은 수리모형에서 얻은 조도계수와 실험결과를 토대로 얻은 조도계수 산정식에 의한 조도계수를 도식화한 것이다. 실험에 의한 결과와 산정식에 의한 값이 잘 일치함을 보여주어 블록

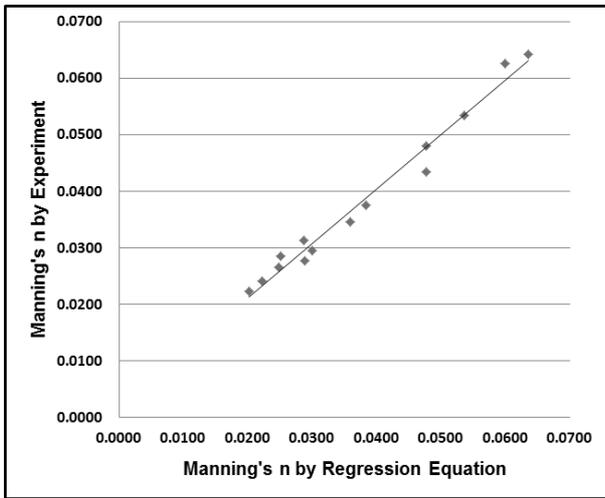


Fig. 10. Comparison of Roughness Coefficients between the Experiments and the Results by Relation Equation

Reynolds수와 체적밀집도에 의해 산정한 조도계수의 사용성을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 조도보정 블록수로에서의 조도계수의 특성을 분석하였다. 하상재료의 특성을 나타낼 수 있는 체적밀집도를 정의하고, 조도계수의 산정을 위한 다양한 수리특성의 분석으로는 VR, 블록Reynolds수, 항력계수 및 바닥전단 특성의 조도를 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평균유속 V 와 수리반경 R 의 곱인 VR 의 값이 증가함에 따라 바닥마찰의 조도계수가 감소하여 일정함에 수렴하는 경험적인 양상을 확인하였다. 실험결과 조도블록의 높이가 큼에 따른 밀집도가 큰 경우에 조도계수가 크게 나타났다. 따라서 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 체적밀집도를 고려할 필요가 있다.
- 2) 블록Reynold수가 증가할수록 조도블록의 항력계수가 감소하여 일정값에 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 블록 Reynold 수가 커지는 난류영역에서는 조도계수의 감소로 나타난 예와 같이 항력계수 역시 감소함으로 나타났다. 블록 Reynolds수가 큰 난류구간에서는 항력계수는 밀집도로 정의한 조도블록의 형상에 지배적임을 볼 수 있다.
- 3) 항력이 커질수록 바닥전단특성의 조도가 커짐을 확인하였다. 또한 체적밀집도가 커짐에 따라 바닥전단특성의 조도가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 조도계수는 이를 지배하는 항력계수와의 상관은 물론 체적밀집도와와의 상관성이 있음을 확인하였다.

- 4) 흐름특성이 같은 블록Reynolds수를 가지는 실험조건에 대해 체적밀집도에 따른 조도계수를 분석한 결과, 즉 흐름특성이 같은 조건에서 조도계수는 체적밀집도에 따라 증가함을 보여준다. 조도계수는 수리특성에 크게 지배될 뿐만 아니라 체적밀집도에 지배됨을 확인하였다. 따라서 정확한 조도계수의 산정을 위해서는 흐름특성을 나타내는 블록Reynolds수와 체적밀집도에 의한 상관식의 개발이 요구된다.
- 5) $n - VR$, $C'_D - Re^*$, $n_b - C'_D$ 상관계수에 대한 관계곡선식을 제시하였다. 아울러 정확한 조도계수를 산정할 수 있는 블록Reynolds수와 체적밀집도와의 상관관계식을 제시하였다.
- 6) 실험결과를 토대로 블록Reynolds수와 체적밀집도에 의한 조도계수 산정식을 이용한 HEC-RAS의 수리특성 분석결과는 실험에 의한 결과와 잘 일치함을 보여주어 개발한 조도계수 산정식의 적용성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신CO2)에 의해 수행되었습니다.

References

- Arcement, G. J. and Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*, USGS, Vol. 2339.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill Book Co., New York, NY.
- Cowan, W. L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficient." *Agricultural Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
- Fathi-Maghadam, M. and Kouwen, N. (1997). "Nonrigid, non-submerged, vegetative roughness on floodplains." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 51-57.
- Fenzl, R. N. (1962). *Hydraulic resistance of broad shallow vegetated channels*, Ph. D. Thesis, University of California, Davis, Calif.
- Graf, W. H. and Chhun, V. H. (1976). "Manning's roughness for artificial grasses." *Journal of Irrigation and Drainage Division*, ASCE, Vol. 102, No. 4, pp. 413-423.
- Jarret, R. D. and Petsch, H. E. Jr. (1985). *Computer program NCALC user's manual - Verification of manning's roughness coefficient in channels*, USGS, Water Resources Investigation, Report, pp. 85-4317.
- Kim, J. S., Kim, Y. J., Lee, C. J. and Kim, W. (2009). "Estimation of bed resistance in gravel-bed rivers using the equivalent roughness height." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 8, pp. 619-629 (in Korean).
- Kim, J. S., Lee, C. J. and Kim, W. (2007). "Calculation of roughness coefficient in gravel-bed river with observed water

- levels.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 10, pp. 755-768 (in Korean).
- Kim, T. B., Bae, H. D. and Choi, S. U. (2010). “Development and application of depth-integrated 2-D numerical model for the simulation of hydraulic characteristics in vegetated open-channel” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 6, pp. 607-615 (in Korean).
- Kouwen, N. and Li, R. M. (1980). “Biomechanics of vegetative channel linings.” *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 106, No. HY6, pp. 1085-1103.
- Kouwen, N., Li, R. M. and Simons, D. B. (1981). “Flow resistance in vegetated waterways.” *Transactions*, ASAE, Vol. 24, No. 3, pp. 684-698.
- Lee, C. J., Kim, J. S., Kim, C. Y. and Kim, D. G. (2008). “Application of slope-area discharge estimation method using continuously observed water level data in a gravel bed river-case study of the dal cheon river.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 5, pp. 503-515 (in Korean).
- Lee, D. S., Lee, D. H. and Kim, C. W. (2009). “Evaluation of roughness coefficient following the variations of velocity and stage for phragmites japonica steud.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 1B, pp. 23-32 (in Korean).
- Lee, J. K. and Lee, C. H. (2004). “Estimation of roughness coefficients in downstream part of the han river using a hydraulic flood routing model.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 1B, pp. 23-32 (in Korean).
- Lee, S. J. and Park, S. W. (2006). “A study on roughness coefficient estimations in gravel bed stream without water level-discharge data.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 12, pp. 985-996 (in Korean).
- Ree, W. O. and Palmer, V. J. (1949). *Flow of water in channels protected by vegetative linings*, Tech. Bull. No. 967, Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Temple, D. M., Robinson, K. N., Ahring, R. M. and Davis, A. G. (1987). *Stability design of grass-lined open channels. Handbook 667*, Agricultural. Research. Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Wu, F. C., Shen, H. W. and Chou, Y. J. (1999). “Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 9, pp. 934-942.