실무활용을 위한 Manning 조도계수 관계식의 결정

Determination of Relationships for Manning Roughness Coefficient Using Hydraulic Engineering Field

이종석* · 오지은** · 박영주** · 정재훈**

Lee, Jong Seok · Oh, Gi Eun · Park, Young Joo · Jung, Jae Hoon

Abstract

This study is determined to use with the hydraulic engineering field of relationships for Manning roughness coefficient by the regression analyzing the field measurements of flow resistance data which consist of the total 2,614 rivers for 1,875 and for 793 data in natural and vegetated rivers. The measured distribution of Manning roughness coefficients by the Box-Whisker Plots show the values which ranges from 0.004~0.151 for 179 sand, 0.008~0.250 for 992 gravel, 0.015~0.327 for 651 cobble, 0.023~0.444 for 53 boulder in natural rivers, and also from 0.015~0.250 for 281 grass, 0.016~0.250 for 150 shrubs, 0.018~0.310 for 308 trees in vegetated rivers, respectively. Significant trends are obtained between Manning roughness coefficients and flow discharge, friction slope and relative submergence. The regression equations for Manning roughness coefficients derived as the power law form with a function of the flow discharge and the friction slope, and the equations for dimensionless shear velocity developed as a relation of the relative submergence in natural and vegetated rivers. Relationships of these semi-empirical and Manning roughness coefficients in field measurements can be useful for hydraulic engineering practice.

Key words : Manning roughness coefficient, flow resistance, roughness coefficient relationships, field measurements, flow discharge and friction slope, regression equations

요 지

본 연구는 Manning 조도계수의 실무활용을 위해 자연하천 1,875개와 식생하천 739개를 합한 2,614개 현장실측자료를 사용해 회귀 분석에 의하여 관계식을 결정하였다. Box-Wishker 분석에 의한 현장자료의 Manning 조도계수 분포는 자연하천의 179개 모래 자료에서 0.004~0.151, 992개 자갈 자료에서 0.008~0.250, 651개 조약돌 자료에서 0.015~0.327, 53개 호박돌 자료에서 0.023~0.444로 나타났고, 식생하천의 281개 초본 자료에서 0.015~0.250, 150개 관목 자료에서 0.016~0.250, 308개 교목 자료에서 0.018~0.310으로 각각 나타났다. 중요한 경향은 조도계수와 유량, 마찰경사 및 상대 잠수비 간의 관계로부터 얻었다. 자연하천과 식생하천에 대한 Manning의 조도계수 관계식은 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멍함수 형으로 유도되었고, 무차원 전단속도 관계식은 상대 잠수비 관계로부터 얻었다. 현장실측 Manning 조도계수의 분포와 이들 관계식은 수공 실무에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : Manning 조도계수, 흐름 저항, 조도계수 관계식, 현장측정자료, 유량과 마찰경사, 회귀 방정식

1. 서 론

하상이나 제방의 재료가 주로 모래와 자갈 등으로 구성된 자연하천이나 홍수터와 제방에 초본(grass)과 관목(shrub) 등의 식생이 산재하고 있는 식생하천에서 흐름에 대한 저항은 제방과 운변에 식생과 하상재료에 따라 유속의 변화를 초래하게 된다. 이들 현상은 전 세계적으로 수공학을 전공하는 기술자들의 주요 연구과제로 오래전부터 다루어져 오고 있다. Rouse(1965)에 의하면 흐름 저항은 표면의 먼 마찰, 형상에

의한 저항의 항력, 표면의 일그러짐에 의한 파 저항 및 국지적인 가속에 따른 흐름의 비정상상태로 분류할 수 있다. 개수로와 하천 흐름의 많은 이론적이고, 실험적인 현장연구에는 Chow(1959)의 Manning 조도계수표와 Engelund(1966)의 충적하천의 수리학적 저항, Limerinos(1970)의 자연하천에서 측정된 하상조도에 대한 Manning 조도계수의 결정 및 Chen(1976)의 넓고 얇은 초본 식재수로의 흐름 저항에 관해 연구 등이 있다. Ree and Crow(1977)의 작은 수로경사의 식생수로에 대한 마찰계수, Schneider et al.(1977)은 홍수터

*정회원 · 한밭대학교 토목공학과 교수(E-mail : ljs96@hanbat.ac.kr, 교신저자)

**한밭대학교 토목공학과 대학원 석사과정

에 많은 식재로 인한 수로폭 감소에 따른 배수영향과 유량의 산정, Gladki(1979)은 거친 하상재료를 갖는 충적수로의 흐름 저항에 관한 연구와 van Rijn(1982)은 충적하상의 등가조도에 관해 연구하였다. Pasche and Rouve(1985)는 식생에 의해 거친 홍수터에 갖는 제방의 흐름에 대해 연구하였고, White et al.(1987)은 충적하천의 상하류 영역내 마찰특성을 연구하였으며, Kadlec(1990)은 지표면에서의 식생저항, Alfonso and Manue(1994)는 산간지 하천의 조도계수, Wu et al.(1999)은 침수 및 비침수 식생의 조도계수 변화, Yen(2002)은 개수로 흐름의 저항에 관해 연구하였다. 그 외에도 Abood et al.(2006), Nikora et al.(2008), Chen(2010), Rominger et al.(2010)은 초본이 식재된 수로의 Manning 조도계수 및 식생과 흐름간의 이론적인 해석 등에 관해 연구하였다.

현장 실측자료는 Barnes(1967)가 미국의 Washington 50개 하천에서의 자연수로의 조도계수 연구와 Jarrett(1985)는 미국의 Colorado 21개 하천에서의 조도계수 결정 및 Annable(1996)은 미국서부의 Ontario 47개 하천에서 유로의 지형학적 특성을 연구하였다. Gillen(1996)은 미국 중서부의 Florida 10개 하천의 조도계수 결정 및 Phillips and Ingersoll(1998)은 미국의 Arizona 14개 하천에서 인공 및 자연수로에 대한 조도계수 검증에 대해 연구하였고, Lang et al.(2004)은 Australian의 Victoria 4개 하천에서 조도계를 연구하였다. Soong et al.(2009)은 미국의 Illinois 43개 하천에 대한 Manning 조도계수 평가에 대한 현장실측자료를 연구하였고, Hicks and Mason(1998)은 뉴질랜드의 78개 하천의 조도계수 결정자료 중의 하나인 Waipaoa 강으로 유역면적이 1,582 km²이며, 이 지점을 1972년부터 1998년 현재까지 관측점으로 사용하고 만제유량은 1,070 m³/s, 평수량은 34.2 m³/s이다. 하상은 가는 자갈로 구성되었고, 양 제방에는 버드나무(Willow tree)가 덮여있다. Coon(1998)이 미국 New York의 20개 하천에서 식생 제방(vegetated bank)의 조도계수 평가 중의 하나인 Chenango 강(Coon, 1998)으로 유역면적 1,483 mi² (572.59 km²)이고, 최대유량 24,000 ft³(679.2 m³/s)에서부터 5,000 ft³(141.5 m³/s)까지 분포한다. 하상은 조약돌이고, d_{50} 은 0.37 ft(112.78 mm)이며, 좌우측 제방은 경사가 급하고, 낮은 부분에 초본, 관목, 적은 수의 교목들이 산재해 있다. 이와 같은 현장측정과 조사연구로부터 수집된 자료가 본 연구에 표 4, 5와 같이 사용되었다.

본 연구는 하천 흐름에서의 Manning 조도계수의 분포범위 제시와 그 관계식의 유도, 무차원 전단속도의 관계식을 결정하기 위해 여러 나라의 자연하천과 식생하천에서 실측된 현장자료를 대상으로 하였다. 자연하천 자료는 모래, 자갈, 조약돌, 호박돌 자료의 1,875개 국외 하상재료 수로구간으로 구성하였고, 식생하천 자료는 초본, 관목, 교목 자료의 739개 국외 식생자료 수로구간을 포함한 총 2,614개로 구성하였다. 이들 많은 현장실측자료를 이용하여 본 연구에서는 오랜 기간 동안 연구되어온 Manning의 조도계수를 분석·제시하고, 이들 분석으로부터 유량과 마찰경사를 함수로 하는 조도계수 관계식 및 상대 잠수비를 함수로 하는 무차원 전단속도 관계식을 유도함으로써 수공실무에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

하천에서 흐름과 하상사이의 상호작용에 의해 발생하는 전단응력은 흐름해석과 수리적 안정성 분석에 기초가 된다. 이는 조도계수를 매개변수로 사용하는데, 하천 흐름의 마찰 저항계수로 가장 널리 사용되는 방정식은 Chézy(1769), Darcy(1857)-Weisbach(1845), Manning(1889)의 평균유속공식이 있다.

2.1 하상조도

하천에서 조도계수는 크게 식생과 수로의 하상형상 및 하상재료로 분류된다. 하천에서 하상재료에 의한 조도계수는 현장측정과 모형실험 등을 통해 얻어진 경험적 공식을 이용해서 주로 결정하고 있다. 이를 수공실무에서 이용할 때 현장여건을 잘 고려하고, 식의 적용범위 등을 검토해야 하는데, 이들 과정에는 경험을 통해 축적된 기술과 판단이 필요하다. 자연하천에서 하상재료의 조도계수와 관련된 연구는 Manning의 조도계수를 대상으로 많은 학자들이 연구해 왔으며, 표 1은 자연하천의 조도계수 산정식으로 발표된 연구결과이다.

표 1에서 h =수심(m)이고, R_h =동수반경[식 (5)-(8b)=ft, (9b)-(10b)=m]이며, T =수면폭[식 (1)-(2)=ft, (3)=m], d_{50} [(=mm), d_{75} (=m), d_{84} (=mm), d_{90} (=m)]=입자의 중량통과 백분율 50% [75, 84, 90%]에 각각 해당하는 입경이다.

2.2 식생조도

하천제방과 홍수터의 식생은 침식을 억제시킴으로써 수로와 제방의 안정성을 확보하고, 수생동물의 서식처 역할을 하는 반면에, 이는 흐름의 저항으로 인해 통수능에 지장을 초래하므로 이를 수리학적으로 제대로 이해하고 예측하는 것 또한 중요한 일이다.

Petryk and Bosmajian(1975)은 홍수터에 분포된 식생의 조도계수를 결정하기 위해 Manning 공식에 다음과 같은 조도계수를 대입하여 수로구간 내 흐름방향의 힘을 가정함으로써 식생밀도의 해석방법을 제안하였다.

$$n = n_0 \sqrt{1 + \left(\frac{C^* \Sigma A_i}{2gAL} \right) \left(\frac{1}{n_0} \right)^2 (R_h)^{4/3}} = n_0 \sqrt{1 + \left(\frac{C^* V_{VD}}{2g} \right) \left(\frac{1}{n_0} \right)^2 (R_h)^{4/3}} \quad (11)$$

여기서 n_0 =Manning's 조도계수 n 에 배제된 식생영향을 고려한 경계조도계수이고, C^* =흐름방향의 식생에 대한 유효항력계수로 홍수터에 조밀하게 분포하는 식생에 대한 동수반경의 함수인 도표를 이용할 수 있으며, ΣA_i =구간내 흐름을 가로막는 식생의 총단면적(m²), g =중력 가속도(m/s²), A =유소단면적(m²), L =연구 대상 수로구간 길이(m), R_h =동수반경(m), V_{vd} ($\Sigma A_i=AL$)=식생밀도이다.

Naot et al.(1996)은 식생이 부분적으로 분포된 수로내 난류흐름의 동수역학적인 연구를 하였는데, 여기에는 식재된 홍수터와 제방 및 모서리 등 세 개의 수로형상을 대상으로 하였다. Freeman et al.(1998)은 물속에 잠기는 관목과 교목에

표 1. 자연하천의 조도계수 산정식

출처	방정식	비고
Strickler(1923)	$n = 0.047d_{50}^{1/6}$ (1)	자갈하상 하천
Meyer et al.(1948)	$n = 0.038d_{90}^{1/6}$ (2)	자갈하상 하천
Lane and Carlson(1953)	$n = 0.026d_{75}^{1/6}$ (3)	조약돌과 포장 수로
Henderson(1966)	$n = 0.031d_{75}^{1/6}$ (4)	자갈과 조약돌 하상하천
Limerinos(1970)	$n = \frac{0.0926R_h^{1/6}}{1.16+2.0\log(R_h/d_{84})}$ (5)	작은 자갈하천
Griffiths(1981)	$n = \frac{0.113R_h^{1/6}}{0.76+1.98\log(R_h/d_{50})}$ (6)	거친 자갈하천
Jobson and Froehlich(1988)	$n = 0.0245(R_h/d_{50})^{-0.44}(T/R_b)^{-0.3}$ (7)	작은 자갈하천
Jarrett(1984)	$n = 0.47S_f^{0.38}R_h^{-0.16}$ (8a)	급경사 조약 · 호박돌 하천
	$n = 0.39S_f^{0.38}R_h^{-0.16}$ (8b)	
Bray and Davar(1987)	$n = 0.094S_f^{1/6}$ (9a)	자갈하상 하천
	$n = \frac{0.113R_h^{1/6}}{1.1+2.0\log(R_h/d_{84})}$ (9b)	
	$n = \frac{0.113R_h^{1/6}}{1.9(R_h/d_{84})^{1/4}}$ (9c)	
Ab Ghani et al.(2007)	$n = 4 \times 10^{-8} \left(\frac{h}{d_{50}}\right)^2 - 5 \times 10^{-5} \left(\frac{h}{d_{50}}\right) + 0.0582$ (10a)	모래하상 하천
	$n = 5 \times 10^{-8} \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right)^2 - 7 \times 10^{-5} \left(\frac{R_h}{d_{50}}\right) + 0.0622$ (10b)	

표 2. 식생하천의 조도계수 산정식

출처	방정식	비고
Bray(1979)	$n = 0.104S_w^{0.177}$ (12a)	식생하천
	$n = 0.048d_{50}^{0.179}$ (12b)	
	$n = \frac{0.0927R_h^{1/6}}{0.248+2.36\log(R_h/d_{50})}$ (12c)	
Jobson and Froehlich(1988)	$n = 0.0245(R_h/d_{50})^{-0.44}(T/R_h)^{-0.3}$ (13)	식생하천
Sauer(1990) (Coon, 1998)	$n = 0.115S_w^{0.18}R_h^{0.08}$ (14)	식생하천
Freeman et al.(1998)	$n = 0.039k_n \left(\frac{E_s A_s}{\rho V^2 A}\right)^{0.141} \left(\frac{H}{y}\right)^{0.175} (MA)^{0.191} \left(\frac{v}{VR_h}\right)^{0.0155}$ (15a)	식생하천
	$n = 2.2 \times 10^{-6} k_n \left(\frac{E_s A_s}{\rho V^2 A_*}\right)^{0.242} (MA_*)^{0.0623} \left(\frac{v}{VR_h}\right)^{0.662}$ (15b)	

대한 Manning 조도계수 평가에 대한 방법을 제안하였고, James et al.(2001)은 곧은 줄기가 일정하게 정렬된 등류 조건하에서 정수식물인 갈대를 통과하는 흐름에서 저항모형을 개발하였다. 이들은 저항이 줄기 항력에 의해 현저하게 나타나는 조건에 대한 식을 제안하였다. Desai and Chicktay(2005)

는 단면내 유속분포를 얻을 수 있는 실험을 통해 유속 결핍의 선형적 중첩을 제시하였고, 그 외의 조도계수에 관한 연구는 표 2에 요약하였다.

표 2에서 T =수면폭(ft)이고, S_w =수면경사이며, d_{50} =중양입경(ft), A =식생에 의해 막히는 흐름의 정면 면적(ft²), A_* =부분

잠수 식생의 잠수된 순 정면 면적(ft^2), A_s =식생 개개 줄기이
총 횡단면적 (ft^2), E_s =식물의 강성계수(lb/ft^2), ρ =유체 밀도,
 h =수심(ft), H =편향된 식물의 평균높이(ft), k =Manning 공식
의 단위환산계수, $M=\text{ft}^2/\text{당}$ 식물의 수로인 상대식생밀도, R_h =
동수반경(ft), V =평균유속(ft/s), v =동점성성계수(ft^2/s)이다.

2.3 무차원 전단속도

무차원 전단속도는 Manning의 조도계수를 유도하기 위해
Darcy-Weisbach 공식과 Chézy 공식을 이용하여 다음과 같이
변환하는데 사용된다.

$$\frac{V}{u_*} = \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (16)$$

여기서 $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ =인 전단속도이고 ρ =물의 밀도이다.

무차원 전단속도는 하상변형이 없는 수리학적으로 거친 경
계에서 모래보다 거친 하상재료를 갖는 하천의 흐름 저항은
다음 식으로 대략화 할 수 있다(Julien, 2010).

$$\frac{V}{u_*} = \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{f}} = 5.75 \log \left(\frac{12.2 R_h}{k'_s} \right) \quad (17)$$

여기서 $k'_s \approx 3d_{90}$ 또는 $k'_s \approx 6d_{50}$ 으로 대략화 할 수 있는데,
 k'_s =입자조도이고, d_{50} , d_{90} =입자의 중량통과 백분율 50, 90%
에 해당하는 입경이다.

무차원 전단속도는 실용 목적상 상대 수심비(h/d_{50})의 광범
위한 자료에 대해 적용할 수 있으며, 이는 대략화를 통해 다
음 식으로 사용할 수 있다.

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{f}} = 5.75 \log \left(\frac{2h}{d_{50}} \right) \quad (18)$$

또한, Manning-Strickler의 역합수 방정식은 조도계수가 중
앙입경 d_{50} 에 대해 $n = 0.064 d_{50}^{1/6}$ 일 때 다음 식으로 쓸 수 있
다(Julien, 2002; 2010).

$$V = 5 \left(\frac{h}{d_{50}} \right)^{1/6} \sqrt{g h S_f} \quad (19)$$

수리학적으로 거친 경계에서 식 (17)은 상대 잠수비(h/d_{50})
와 무차원 전단속도(V/u_*)의 대략적인 관계식으로 다음과 같
이 쓸 수 있다.

$$\frac{\sqrt{8}}{\sqrt{f}} \left(= \frac{V}{u_*} \right) = 5.75 \log \left(\frac{12.2h}{d_{50}} \right) \quad (20)$$

2.4 조도계수 결정

조도계수의 경험적인 결정방법중의 하나인 사진이용방법은
사진과 대조하여 조도계수를 산정하는 방법으로 조도계수가
연구되지 않은 비슷한 지점의 조도계수를 결정하기 위한 기
준지점으로 이 하천지점을 사용한다. Chow(1959)는 수로조건

표 3. 수로형식과 흐름조건에 따른 Manning의 조도계수

수로형식	수로특성과 흐름조건	최소	평균	최대
굴착 · 준설수로	균일 · 직선 흙수로	0.016~0.022	0.018~0.027	0.020~0.033
	굴곡 · 완만 · 비식생 흙수로	0.023	0.025	0.030
	잔디 흙수로	0.025	0.030	0.033
자연하천	소하천(홍수위폭 < 약 30m)(직선 · 무장애)	0.025	0.030	0.033
	위 조건+잡초	0.030	0.035	0.040
	위 조건+굴곡	0.033	0.040	0.045
	위 조건+자갈	0.035	0.045	0.050
	위 조건+저수위	0.010	0.048	0.055
	잡초 많고, 깊은 웅덩이	0.075	0.100	0.150
	산지하천(주수로; 비식생, 제방; 식생, 바닥, 자갈)	0.030	0.040	0.050
	위 조건+바닥; 조약돌	0.040	0.050	0.070
홍수단면	초지, 비 관목+짧은 잔디	0.025	0.030	0.035
	위 조건 +큰 잔디	0.030	0.035	0.050
	농경지역+ 곡식 비경작	0.020	0.030	0.040
	위 조건 +장년기 줄 경작	0.025	0.035	0.045
	위 조건 +장년기 벼 밭경작	0.030	0.040	0.050
	관목+ 분산 식재	0.035	0.050	0.070
	위조건+작은 관목(겨울)	0.035	0.050	0.060
	위조건+작은 관목, 교목(여름)	0.040	0.060	0.080
	위조건+관목 밀도 중간(겨울)	0.045	0.070	0.110
	위조건+관목 밀도 중간(여름)	0.070	0.100	0.160
	교목, 버드나무 밀도 있고, 직선(여름)	0.110	0.150	0.200
	개간지 교목군 비성장	0.030	0.040	0.050
	위조건+뿌리 · 급성장	0.050	0.060	0.080
	위조건+홍수위 가지까지 상승	0.100	0.120	0.160
대하천	호박돌, 관목 없는 규칙단면	0.025	-	0.060
	불규칙한 거친 단면	0.035	-	0.100

과 이에 상응하는 Manning의 조도계수 값의 간단한 설명과 함께 전형적인 다수의 수로에 사진이용법을 제시하였다. 이 외에도 이 방법을 연구한 학자는 Barnes(1967), Jarrett(1985), Annable(1996), Gillen(1996), Hicks and Mason(1998), Coon(1998), Phillips and Ingersoll(1998), Lang et al.(2004), Soong et al.(2009)이 있다.

Manning 조도계수표 방법은 표 3과 같이 Chow(1995)가 제시한 방법으로, 수로의 형상, 수로의 제방과 하상을 구성하는 재료의 크기와 종류에 따라 제시된 조도계수 값을 현장조건에 맞게 선정해 사용하는 방법이다. 이 외에도 Cowan(1956)에 의해 제시된 USGS 방법, 미국토목학회가 제안한 ASCE 방법(ASCE, 1963), Barnes(1967)에 의한 직접 측정방법 등이 있다.

3. 분석 및 요약

본 연구에 사용된 자료는 자연하천과 식생하천에서 현장 실측된 자료로 구성되었으며, 이들 자료 중 유량과 마찰경사

는 Manning의 조도계수 관계식 유도에 사용되었고, 그 외의 수리량은 무차원 전단속도 관계식의 유도에 사용되었다.

3.1 자료 구성

본 연구에 사용된 자료는 표 4와 같이 179개의 모래자료, 992개의 자갈자료, 651개의 조약돌자료, 53개의 호박돌자료로 구성된 자연하천 1,875개와 281개의 초본자료, 150개의 관목자료, 308개의 교목자료로 구성된 739개 식생하천 자료를 포함해 총 2,614개로 구성되었다. 또한 이들 자료의 출처별 분포범위는 표 5와 같다.

3.2 자료 분석

본 연구는 그림 1, 3과 같이 Manning 조도계수 에 대한 유량과 마찰경사 및 그림 5와 같이 Manning-Stickler의 무차원 전단속도에 대한 관계식을 회귀분석에 의해 각각 유도하였다. 또한 그림 2, 4와 같이 조도계수와 매개변수의 분포분석을 Box-Whisker 분석법에 의해 수행하였는데, 이는 대상자료의 상위 1%는 최소값, 100%는 최대값으로 맨 아래와 위

표 4. 본 연구에 사용된 현장측정 자료

수리량 하천	종류	자료수	유량 $Q(m^3/s)$	마찰경사 (-)	중양입경 (mm)	평균유속 (m/s)	수심 h(m)
자연 하천	모래	179	0.06~26,560.4	0.0001~0.0320	0.01~1.64	0.02~7.09	0.04~15.67
	자갈	992	0.01~14,998.0	0.00009~0.081	2~63.6	0.04~4.70	0.04~11.15
	조약돌	651	0.02~3,820.0	0.00001~0.0508	64~253	0.07~4.29	0.10~6.94
	호박돌	53	2.0~1,700.0	0.0206~0.0373	263~945	0.32~5.11	0.28~4.09
	소계	1,875	0.01~26,560.4	0.00001~0.0810	0.01~945	0.02~7.09	0.04~15.67
식생 하천	초본	281	0.01~750.48	0.00007~0.0179	0.33~304.8	0.06~3.66	0.16~3.96
	관목	150	0.38~542	0.00001~0.034	16~893	0.1~3.64	0.16~3.96
	교목	308	0.02~3,220.00	0.0001~0.0405	0.17~397	0.07~5.11	0.10~9.17
	소계	739	0.01~3,220.00	0.00001~0.0405	0.17~893	0.06~5.11	0.10~3.96
합계		2,614	0.01~26,560.4	0.00001~0.0810	0.01~945	0.02~7.09	0.01~15.67

표 5 본 연구에 사용된 출처별 자료분포

수리량 하천	출처	자료수	유량 $Q(m^3/s)$	마찰경사 $S_f(-)$	중양입경 $d_{50}(mm)$	평균유속 (m/s)	수심 h(m)
자연 하천	Barnes(1967)	14	3.91~1,951.25	0.0007~0.0405	93~253	0.98~2.99	0.39~4.92
	Annable(1996)	34	2.27~98.73	0.00033~0.036	0.17~125	0.54~2.27	0.04~2.00
	Hicks and Mason(1998)	463	0.01~3,220	0.00001~0.0404	0.33~893	0.06~3.66	0.10~9.17
	Coon(1998)	219	2.18~1,464.14	0.00031~0.01312	15.24~65.76	0.43~5.11	0.28~4.09
	Phillips and Ingersoll(1998)	22	1.10~254.88	0.0013~0.025	0.042~110	0.66~3.64	0.25~1.46
	Lee and Julien(2006), Lee(2010)	1,123	0.0478~26,560	0.00001~0.0810	0.01~945	0.02~7.09	0.04~15.67
	소계	1,875	0.01~26,560	0.00001~0.0810	0.01~945	0.02~7.09	0.04~15.67
식생 하천	Barnes(1967)	10	42.48~1,951.25	0.0007~0.0405	93~253	1.98~2.99	1.05~4.92
	Annable(1996)	34	2.27~98.73	0.00033~0.036	0.17~125	0.54~2.27	0.04~2.00
	Hicks and Mason(1998)	458	0.01~3,220	0.00001~0.0404	0.33~893	0.06~3.66	0.10~9.17
	Coon (1998)	219	2.18~1,464.14	0.00031~0.01312	15.24~365.76	0.43~5.11	0.28~4.09
	Phillips and Ingersoll(1998)	18	4.76~207.59	0.0013~0.025	0.42~110	0.66~3.64	0.25~1.20
	소계	739	0.01~3,220	0.00001~0.0405	0.17~893	0.06~5.11	0.04~9.17
합계		2,614	0.01~26,560	0.00001~0.0810	0.01~945	0.02~7.09	0.04~15.67

(a) $\log Q$ - $\log n$ 관계

(b) $\log S_f$ - $\log n$ 관계분석

그림 1. 자연하천의 회귀분석에 의한 Manning 조도계수 관계식 유도

에 수평선으로 표시되고, 가운데 상자 위와 아래 부분은 상위 25%, 75%이며, 상자 안의 수평선은 중앙치를 나타낸다.

그림 1은 자연하천에서 회귀분석에 의한 Manning 조도계수 n 의 관계식을 유량 Q 와 마찰경사 S_f 를 함수로 하는 멱함수 형태로 유도한 결과이다.

자연하천 자료에 대한 Manning의 조도계수 관계식은 표 6과 같이 유량 Q (m³/s)와 마찰경사 S_f 를 함수로 하는 $n_{nat} = \alpha_{nat} Q^{\beta_{nat}}$, $n_{nat} = \alpha_{nat} S_f^{\beta_{nat}}$ 인 멱함수 형태로 유도되었으며, α_{nat} 와 β_{nat} 는 자연하천 조도계수 관계식의 상수와 지수이다.

표 6과 같이 4개의 하상재료로 유도된 조도계수 관계식은 입자의 크기가 작을수록 결정계수 값이 작게 나타났다. 이는 수리량의 분포 범위가 상당히 크기 때문에 통계적인 측면에서는 유효성이 낮으나, 모래를 제외한 호박돌, 조약돌의 관계

(a) 조도계수 n 분석

(b) 매개변수 $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 분석

그림 2. 자연하천의 Manning 조도계수와 매개변수의 Box-Whisker 분석

식은 수공실무에서 강수-유출에 의한 계획 홍수량이 주어졌거나 수로경사 또는 마찰경사를 결정한 상태에서 예비조사 등을 위한 조도계수 산정에 유용할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 2는 자연하천 자료에 대한 Manning 조도계수 n 과 매개변수 $nQ^{1/8}S_f^{1/6}$ 의 Box-Whisker 분석한 결과이다.

표 7은 자연하천의 자료에 대한 Manning 조도계수 n 과 매개변수 $nQ^{1/8}S_f^{1/6}$ 의 Box-Whisker 분석한 결과를 요약한 것이다.

Manning 조도계수 n 에 대한 자연하천 자료에서 Box-Whisker 분석결과는 표 7과 같이 179개 모래자료는 0.004-0.151, 992개

표 6. 자연하천의 Manning 조도계수 관계식

자료명	범위	자료 분포범위	관계식	식 번호
자연하천	호박돌	$Q=2.0\sim 1,700 \text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.00001\sim 0.0810$	$n_{bou}=0.14Q^{-0.20}(R^2=0.40)$	(21a)
			$n_{bou}=0.59S_f^{-0.45}(R^2=0.39)$	(21b)
	조약돌	$Q=0.02\sim 3,820 \text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.00001\sim 0.0508$	$n_{cob}=0.07Q^{-0.14}(R^2=0.27)$	(22a)
			$n_{cob}=0.17S_f^{-0.23}(R^2=0.36)$	(22b)
	자갈	$Q=0.01\sim 14,998 \text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.00009\sim 0.081$	$n_{gra}=0.05Q^{-0.08}(R^2=0.15)$	(23a)
			$n_{gra}=0.09S_f^{-0.13}(R^2=0.11)$	(23b)
	모래	$Q=0.06\sim 26,560 \text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.0001\sim 0.0320$	$n_{san}=0.04Q^{-0.04}(R^2=0.04)$	(24a)
			$n_{san}=0.04S_f^{0.04}(R^2=0.01)$	(24b)

표 7. 자연하천 자료의 Manning 조도계수와 매개변수 요약

분석	내용	구분	수	A 최소값	B 최대값	C 중앙값	D 평균값	4분위값(%)		B/A	D/C	F/E
								E 상위1/4	F 상위3/4			
조도 계수	모래	179	0.004	0.151	0.031	0.036	0.025	0.042	37.75	1.16	1.68	
	자갈	992	0.008	0.250	0.036	0.045	0.029	0.051	31.25	1.25	1.76	
	조약돌	651	0.015	0.327	0.040	0.052	0.032	0.057	21.80	1.30	1.78	
	호박돌	53	0.023	0.444	0.062	0.080	0.044	0.101	19.30	1.29	2.30	
	소 계	1,875	0.004	0.444	0.037	0.047	0.030	0.053	111.00	1.27	1.77	
	평 균		0.01	0.32	0.04	0.05	0.03	0.06	44.22	1.25	1.86	
매개 변수	모래	179	0.046	9.328	1.259	1.771	0.339	2.330	202.78	1.41	6.87	
	자갈	992	0.050	8.026	0.402	0.700	0.184	0.884	160.52	1.74	4.80	
	조약돌	651	0.063	4.168	0.293	0.529	0.175	0.731	66.16	1.81	4.18	
	호박돌	53	0.177	3.219	0.254	0.483	0.206	0.578	18.19	1.90	2.81	
	소 계	1,875	0.046	9.328	0.392	0.483	0.206	0.578	202.78	1.23	2.81	
	평 균		0.08	6.81	0.52	0.79	0.22	1.02	130.09	1.62	4.29

(a) $\log Q$ - $\log n$ 관계

(b) $\log S_f$ - $\log n$ 관계

그림 3. 식생하천의 회귀분석에 의한 Manning 조도계수 관계식 유도

자갈 자료는 0.008~0.250, 651개 조약돌 자료는 0.015~0.327, 53개 호박돌 자료는 0.023~0.444, 1,875개 전체 자료에서는 0.004~0.444로 각각 나타났다. 또한 Manning 조도계수 n 과 매개변수 $nQ^{1/8}S_f^{1/6}$ 에 대한 분석결과는 평균값/중앙값, 상위

(3/4)값/상위(1/4)값의 평균값에서 각각 1.3, 1.9 및 1.6, 4.3으로 나타났다.

그림 3은 식생하천에서 회귀분석에 의한 Manning의 조도계수 관계식을 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멱함수 형으로 유도한 결과이다.

식생하천 자료에 대한 Manning의 조도계수 관계식은 표 8과 같이 유량 $Q(m^3/s)$ 와 마찰경사 S_f 를 함수로 하는 $n_{veg} = \alpha_{veg} Q^{\beta_{veg}}$, $n_{veg} = \alpha_{veg} S_f^{\beta_{veg}}$ 인 멱함수 형으로 유도되었으며, α_{veg} 와 β_{veg} 는 식생하천 조도계수 관계식의 상수와 지수이다.

표 8과 같이 3개의 식생자료로 유도된 조도계수 관계식은 수종의 크기가 작을수록 결정계수 값이 작게 나타났다. 이는 수리량의 분포 범위가 상당히 크기 때문에 통계적인 측면에서는 유효성이 낮으나, 관계식은 수공실무에서 강수-유출에 의한 계획 홍수량이 주어졌거나 수로경사 또는 마찰경사를 결정할 상태에서 예비조사 등을 위한 조도계수 산정에 유용할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 4는 식생하천 자료에 대한 Manning 조도계수 n 과 매개변수 $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 의 Box-Whisker 분석한 결과이다.

표 9는 식생하천 자료에 대한 Manning 조도계수 n 과 매개변수 $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 의 Box-Whisker 분석결과를 요약한 것이다 (Lee et al. 2012).

Manning 조도계수 에 대한 식생하천 자료에서 Box-Whisker 분석결과는 표 9와 같이 281개 초본 자료는 0.015~0.250, 150개 관목 자료는 0.016~0.250, 308개 교목 자료는 0.018~0.310, 739개 전체 자료에서는 0.015~0.310으로 각각 나타났다. 또한 Manning 조도계수 n 과 매개변수 $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 에 대한 분석결과는 평균값/중앙값, 상위(3/4)값/상위(1/4)값의 평균값에서 각각 1.1, 1.6 및 1.1, 1.6으로 같은

표 8. 식생하천의 Manning 조도계수 관계식

자료명	범위	자료 분포범위	관계식	식 번호
식생하천	교목	$Q=0.02\sim3,220\text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.0001\sim0.0405$	$n_{tr} = 0.07Q^{0.13}(R^2=0.33)$	(25a)
			$n_{tr} = 0.13S_f^{0.18}(R^2=0.31)$	(25b)
	관목	$Q=0.38\sim542\text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.00001\sim0.034$	$n_{sh} = 0.09Q^{0.24}(R^2=0.35)$	(26a)
			$n_{sh} = 0.18S_f^{0.23}(R^2=0.30)$	(26b)
	초본	$Q=0.01\sim750.48\text{ m}^3/\text{s}$ $S_f=0.00007\sim0.0179$	$n_{gr} = 0.05Q^{0.10}(R^2=0.17)$	(27a)
			$n_{gr} = 0.13S_f^{0.19}(R^2=0.23)$	(27b)

(a) 조도계수 n 분석

(b) 매개변수 $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 분석

그림 4. 식생하천 자료에 대한 Manning 조도계수와 매개변수의 Box-Whisker 분석

비율을 갖는 것으로 나타났다.

그림 5는 자연하천과 식생하천 자료의 상대 잠수비 h/d_{50} 에 따른 무차원 전단속도 V/u_* 의 관계식을 회귀분석을 통한 반경험적 방법에 의해 유도한 결과이다.

그림 5(a)와 같이 자연하천의 Manning-Strickler 관계식은 절편은 5보다 약간 큰 5.4, 기울기는 1/6보다 약간 작은 1/

10을 갖는 $V = 5.4(h/d_{50})^{1/10} \sqrt{ghS_f}$ 로 유도되었고, 그림 5(b)와 같이 식생하천의 Manning-Strickler 관계식은 절편은 5보다 약간 큰 5.3, 기울기는 1/6보다 약간 작은 1/8.3을 갖는 $V = 5.3(h/d_{50})^{1/8.3} \sqrt{ghS_f}$ 로 각각 유도되었다. 또한 자연하천과 식생하천에서 상대 잠수비 h/d_{50} 에 따른 무차원 전단속도 V/u_* 에 대한 관계식은 실용 목적 및 수리학적 거친 경계 식보다 우수한 값을 갖는 $\sqrt{(8/f)} (= V/u_*) = 5.75 \log(5h/d_{50})$ 로 유도되었다.

3.3 결과 요약

본 연구에 사용된 자연하천의 모래, 자갈, 조약돌, 호박돌로 구성된 하상재료와 초본, 관목, 교목으로 구성된 식생하천의 자료는 표 10과 같이 Manning 조도계수 n 의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 표 10과 같이 Manning 조도계수는 자연하천의 179개 모래 자료에서 0.004~0.151, 992개 자갈 자료에서 0.008~0.250, 651개 조약돌 자료에서 0.015~0.327, 53개 호박돌 자료에서 0.023~0.444, 1,875개 전체 자료에서는 0.004~0.444로 나타났다. 또한 식생하천에서는 281개 초본 자료에서 0.015~0.250, 150개 관목 자료에서 0.016~0.250, 308개 교목 자료에서 0.018~0.310, 739개 전체 자료에서는 0.015~0.310으로 나타났다.

표 11은 자연하천과 식생하천의 Box-Whisker 분석에 의한 Darcy-Weisbach, Manning 조도계수와 매개변수의 평균값/중앙값, 상위(3/4)분위/상위(1/4)분위 분석결과이다(Lee et al, 2012). 그리고, 표 11에서와 같이 Manning 조도계수와 매개변수의 평균값/중앙값, 상위(3/4)분위/상위(1/4)분위 평균값은 자연하천에서 1.3, 1.9 및 1.6, 4.3으로 약간 차이를 갖는 것으로 나타났고, 식생하천에서는 1.3, 1.7 및 1.1, 1.6으로 그 값의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

표 12는 자연하천과 식생하천에서의 본 연구 결과와 Chow(1959) 및 Julien(2002)의 Manning 조도계수를 비교한 결과이다. 표 12와 같이 Manning의 조도계수는 자연하천의 경우 최소값은 본 연구와 Julien(2002)의 값보다 Chow(1959) 값이 상당히 크게 나타났고, 평균값은 호박돌을 제외하고는 세 경우가 비슷한 범위 값을 나타냈으며, 최대값은 본 연구

표 9. 식생하천 자료의 Manning 조도계수와 매개변수 요약

내용 분석	구분	수	A 최소값	B 최대값	C 중앙값	D 평균값	4분위값(%)		B/A	D/C	F/E
							E 상위1/4	F 상위3/4			
조도계수	초본	281	0.015	0.250	0.034	0.046	0.029	0.055	16.67	1.35	1.90
	관목	150	0.016	0.250	0.042	0.058	0.031	0.064	15.63	1.38	2.06
	교목	308	0.018	0.310	0.037	0.047	0.031	0.037	17.22	1.27	1.19
	소계	739	0.015	0.310	0.037	0.049	0.031	0.055	20.67	1.32	1.77
	평균		0.02	0.28	0.04	0.05	0.03	0.05	17.55	1.33	1.73
매개변수	초본	281	0.05	1.67	0.157	0.178	0.126	0.200	33.40	1.13	1.59
	관목	150	0.077	0.69	0.172	0.195	0.125	0.214	8.96	1.13	1.71
	교목	308	0.066	0.622	0.185	0.196	0.148	0.223	9.42	1.06	1.51
	소계	739	0.05	1.67	0.173	0.189	0.13	0.212	33.40	1.09	1.63
	평균		0.06	1.16	0.17	0.19	0.13	0.21	21.30	1.10	1.61

(a) 자연하천의 분석

(b) 식생하천의 분석

그림 5. 상대 잠수비에 따른 무차원 전단속도 관계식 유도

표 10. 자연하천과 식생하천의 Manning 조도계수 분포범위

자료구분	자료구성	자료명	자료수	Manning 조도계수		
				최소값	평균값	최대값
자연하천	모래		179	0.004	0.036	0.151
	자갈		992	0.008	0.045	0.250
	조약돌		651	0.015	0.052	0.327
	호박돌		53	0.023	0.080	0.444
	소계		1,875	0.004	0.047	0.444
식생하천	초본		281	0.015	0.046	0.250
	관목		150	0.016	0.058	0.250
	교목		308	0.018	0.047	0.310
	소계		739	0.015	0.049	0.310
합계			2,614	0.004	0.050	0.444

표 11. Box-Whisker 분석에 의한 조도계수와 매개변수 관계

자료구분	분석내용	Manning			
		조도계수 n		매개변수 $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$	
		평균값/중앙값	상위(3/4)/상위(1/4)	평균값/중앙값	상위(3/4)/상위(1/4)
자연하천 (1,875자료)	모래	1.16	1.68	1.41	6.87
	자갈	1.25	1.76	1.74	4.80
	조약돌	1.30	1.78	1.81	4.18
	호박돌	1.20	2.30	1.90	2.81
	평균	1.3	1.9	1.6	4.3
식생하천 (739자료)	초본	1.35	1.90	1.13	1.59
	관목	1.38	2.06	1.13	1.71
	교목	1.27	1.19	1.06	1.51
	평균	1.3	1.7	1.1	1.6

의 경우가 두 경우보다 상당히 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 식생하천의 경우에도 자연하천과 비슷한 경향으로 최소값은 본 연구와 Julien(2002)의 값보다 Chow(1959) 값이 상당히 크게 나타났고, 평균값은 세 경우가 비슷한 범위 값을 나타냈으며, 최대값은 본 연구의 경우가 두 경우도 상당히 큰

값을 갖는 것으로 나타났다. 이들 값이 큰 차이를 보이는 것은 본 연구의 경우가 방대한 자료를 대상으로 하였기 때문에 분포 범위가 큰 것으로 판단되며, 실무에서 Manning의 조도계수를 적용할 경우에는 평균값을 선정하면 적절할 것으로 판단된다.

표 12. Manning 조도계수의 타 연구 결과와 비교

조도계수 하천	종류	Manning 조도계수								
		최소			평균			최대		
		본 연구	Chow	Julien	본 연구	Chow	Julien	본 연구	Chow	Julien
자연 하천	모래	0.004	0.025	0.018	0.036	0.030	0.048	0.151	0.033	0.076
	자갈	0.008	0.030	0.011	0.045	0.035	0.027	0.250	0.040	0.042
	조약돌	0.015	0.035	0.018	0.052	0.045	0.028	0.327	0.050	0.057
	호박돌	0.023	0.045	0.029	0.080	0.050	0.053	0.444	0.060	0.076
식생 하천	초본	0.015	0.025~0.030	0.03	0.046	0.030~0.035	0.05	0.250	0.035~0.050	0.07
	관목	0.016	0.035~0.070		0.058	0.050~0.100		0.250	0.070~0.160	
	교목	0.018	0.030~0.11		0.047	0.040~0.150		0.310	0.050~0.200	

4. 결 론

본 연구는 모래, 자갈, 조약돌, 호박돌로 구성된 자연하천의 하상재료 1,875개 자료와 초본, 관목, 교목으로 구성된 739개 식생하천의 식생자료를 포함한 2,614개 현장 실측자료를 대상으로 하였다. 이들 방대한 자료를 이용한 본 연구는 수공 실무에서 활용할 수 있도록 자연하천과 식생하천에 대한 Manning 조도계수의 분포 분석, 조도계수 관계식 및 무차원 전단속도 관계식의 유도를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Manning 조도계수는 자연하천의 179개 모래 자료에서 0.004~0.151, 992개 자갈 자료에서 0.008~0.250, 651개 조약돌 자료에서 0.015~0.327, 53개 호박돌 자료에서 0.023~0.444, 1,875개 전체 자료에서는 0.004~0.444로 나타났다. 또한 식생하천은 281개 초본 자료에서 0.015~0.250, 150개 관목 자료에서 0.016~0.250, 308개 교목 자료에서 0.018~0.310, 739개 전체 자료에서는 0.015~0.310으로 각각 나타났다.
- 2) 자연하천과 식생하천에서 Manning의 조도계수 관계식은 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멍함수 형으로 유도되었다. 자연하천의 조도계수 관계식은 표 6과 같이 8개의 식으로 유도되었고, 식생하천은 표 8과 같이 6개의 식으로 각각 유도되었다. 이들 유도된 식 중 결정계수가 아주 낮은 모래자료에 관한 2개의 관계식을 제외한 나머지는 수공실무에서 강수-유출에 의한 계획 홍수량이 주어졌거나 수로경사 또는 마찰경사를 결정한 상태에서 예비조사 등을 위한 조도계수 산정에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 자연하천의 Manning-Strickler 관계식은 기울기가 1/6보다 작은 1/10을 갖는 $V=5.4(h/d_{50})\sqrt{ghS_f}$ 및 식생하천의 경우는 1/6보다 작은 1/8.3을 갖는 $V=5.3(h/d_{50})\sqrt{ghS_f}$ 로 유도되었다. 자연하천과 식생하천에서 상대 잠수비를 함수로 하는 무차원 전단속도 관계식은 실용목적이나 수리학적 거친 경계 조건의 식보다 우수한 $\sqrt{8/f}(=V/u_*)=5.75\log(5h/d_{50})$ 로 유도되었으며, 이는 수공 실무에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

Ab Ghani, A., Zakaria, N.A., Chang, C.K., Ariffin, J., Abu, H.Z. and

- Ghaffar, A. (2007) Revised equations for Manning's coefficient for sand-bed rivers, *JBM, IAHR*, Vol. 5, No. 4, pp. 329-346.
- Abood, M.M., Yusuf, B., Mohammed, T.A. and Ghazali, A.H. (2006) Manning roughness coefficient for grass-lined channel, *Suranaree J. Sci. Tech.*, Vol. 13, No. 4, pp. 317-330.
- Alfonso, U. and Manuel, M. (1994) Roughness coefficient in mountain rivers, *Proc. of the 1994 Conference*, Buffalo, New York, pp. 652-656.
- Annable, W.K. (1996) *Database of morphologic characteristics of watercourse in Southern Ontario*, Ontario, Ministry of Natural Resources, 212p.
- Arcement, G.J. and Schneider, V.R. (1984) *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*, USGS, Water-supply Paper 2339.
- ASCE (American Society of Civil Engineers, Task Force on Friction Factors) (1963) Friction factors in open channels, *J. Hydraul Div.*, Vol. 89, No. 2, pp. 97-143.
- Barnes, H.H. (1967) *Roughness characteristics of natural channels*, USGS Water- Supply, Paper 1849, Washington, 213p.
- Bray, D.I. (1979) Estimating average velocity in gravel-bed rivers, *J. Hydraul Div.*, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1122.
- Bray, D.I. and Davar, K.S. (1987) Resistance to flow in gravel-bed rivers, *CJCE*, Vol. 14, No. 1, pp. 77-86.
- Chen, L. (2010) Theoretical analyses for interaction between vegetation bending and flow, *Conference Proc., Division of Hydrologic Sciences*, Desert Research Institute, pp. 1443-1450.
- Chen, C.L. (1976) Flow resistance in broad shallow grassed channels, *J. Hydraul Div.*, Vol. 102, No. 3, pp. 307- 322.
- Chézy, A. (1769) *Developed and verified by experiments made on an earthen channel, The Courpalet Canal, and on the Seine River*.
- Chow, V.T. (1959) *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
- Coon, W.F. (1998) *Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks*, USGS, Water Supply Paper 2441, Prepared in cooperation with the New York State Department of Transportation, 133p.
- Darcy, H. (1857) *Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*, Mallet-Bachelier, Paris, 268p. and atlas (in French).
- Desai, A.Y. and Chicktay, I. (2005) Simulation of 2d velocity distribution associated with large, *J. Hydraul Div.*, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1122.
- Engelund, F. (1966) Hydraulic resistance of alluvial streams, *J. Hydraul Div.*, Vol. 92, No. 2, pp. 315-326.
- Freeman, G.E., Copeland, R.R. and Rahmeyer, W.J. (1998) Field determination of Manning's n values for shrubs and woody vegetation, *Proc. of the Wetlands Engineering River Restoration Conference*, ASCE, Denver, Colorado.

- Gillen, D.F. (1996) *Determination of roughness coefficients for streams in West-Central Florida*, Tampa, FL, USGS, Open-File report OFR-96-226.
- Gladki, H. (1979) Resistance to flow in alluvial channels with coarse bed materials, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 17, No. 2, pp. 121-128.
- Griffiths, G.A. (1981) Flow resistance in coarse gravel bed rivers, *J. Hydraul. Div.*, Vol. 107, No. 7, pp. 899-918.
- Henderson, F.M. (1966) *Open channel flow*, New York, Macmillan.
- Hicks, D.M. and Mason, P.D. (1998) *Roughness characteristics of New Zealand rivers*, National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd, New Zealand, 329.
- James, C.S., Birkhead, A.L., Jordanova, A.A., Kotschy, K.A., Nicolson, C.R., Makoa, M.J. (2001) *Interaction of reeds, hydraulics and river morphology*, WRC Report No. 856/1/01, Water Research Commission, South Africa.
- Jarrett, R.D. (1984) Hydraulics of high-gradient streams, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539.
- Jarrett, R.D. (1985) *Determination of roughness coefficients for streams in Colorado*, USGS, WRI Report 85-4004.
- Jobson, H.E. and Froehlich, D.C. (1988) *Basic hydraulic principles of open-channel flow*, USGS, Open-File Report 88-707.
- Julien, P.Y. (2002) *River mechanics*, Cambridge University Press.
- Julien, P.Y. (2010) *Erosion and sedimentation*, 2nd edition, Cambridge University Press.
- Kadlec, R. (1990) Overland flow in wetlands: Vegetation resistance, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 116, No. 5, pp. 691-706.
- Lane, E.W. and Carlson, E.J. (1953) Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials, *Proc. IAHR*, 5th Congress, Minneapolis.
- Lang, S., Ladson, A., Anderson, B. and Rutherford, I. (2004) *An Australian handbook of stream roughness coefficients*, Stream roughness, Four case studies from Victoria, AJWR, 28.
- Lee, J.S. (2010) *River engineering and design*, SRP (in Korean).
- Lee, J.S., Julien, P.Y., Kim, J.H., Lee, T.W. (2012) Derivation of roughness coefficient relationships using field data in vegetated rivers, *J. KWRA*, Vol. 45, No. 2, pp. 137-149 (in Korean).
- Lee, J.S. and Julien, P.Y. (2006) Downstream hydraulic geometry of alluvial channels, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 132, No. 12, pp. 1347-1352.
- Limerinos, J.T. (1970) *Determination of the Manning coefficient for measured bed toughness in natural channels*, Water Supply paper 1898-B, USGS, Washington D.C.
- Manning, R. (1889) On the flow of water in open channels and pipes, *Trans., Inst. of Civil Engrs. of Ireland*, Dublin, Ireland, Vol. 20, pp. 161-166.
- Meyer-Peter, E. and Müller, R. (1948) Formulas for bed-load transport, *Proc. IAHR, Third Annual Conference*, Stockholm, Sweden, pp. 39-64.
- Naot, D., Nezu, I. and Nakagawa, H. (1996) Hydrodynamic behaviour of partly vegetated open channels, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 122, No. 11, pp. 625-633.
- Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G. and Reid, M. (2008) Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field study, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 134, No. 9, pp. 1326-1332.
- Pasche, E. and Rouve, G. (1985) Overbank flow with vegetatively roughed flood plains, *J. Hydraulic Engr.*, Vol. 111, No. 9, pp. 1262-1278.
- Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975) Analysis of flow through vegetation, *J. Hydraul. Div.*, Vol. 101, No. 7, pp. 871-884.
- Phillips, J.V. and Ingersoll, T.L. (1998) *Verification of roughness coefficients for selected natural and constructed stream channels in Arizona*, USGS, Professional Paper 1584.
- Ree, W.O. and Crow, F.R. (1977) *Friction factors for vegetated waterways of small slope*, Agricultural Research Service, ARS-S-151.
- Rominger, J.T., Lightbody, A.F. and Nepf, H.M. (2010) Effects of added vegetation on sand bar stability and stream hydrodynamics, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 136, No. 12, pp. 994-1002.
- Rouse, H. (1965) Critical analysis of open-channel resistance, *J. Hydraul. Div.*, Vol. 91, No. 4, pp. 1-25.
- Sauer, V.B. (1990) USGS, *written communication*.
- Schneider, V.R., Board, J.W., Colson, B.E. and Lee, F.N. (1977) *Computation of backwater and discharge at width constrictions of heavily vegetated flood plains*, USGS, Water-Resources Investigations 76-129.
- Soong, D.T., Halfar, T.M. and Prater, C.D. (2009) *Estimating Manning's roughness coefficients for natural and man-made streams in Illinois*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- Strickler, A. (1923) Beiträge zur frage der geschwindigkeitsformel und der rauheitszahlen für strome. kanäle und geschlossene leitungen, *Mitteilungen des Eidgenossischen Amtes für Wasserwirtschaft* 16, Bern, Switzerland.
- van Rijn, L. (1982) Equivalent roughness of alluvial bed, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 108, No. 10, pp. 1215-1218.
- White, W.R., Paris, E., Bettess, R. and Wang, S. (1987) Frictional characteristics of alluvial streams in the lower and upper regimes, *Proc., Institute of Civil Engineers* (London), 83(Part 2), pp. 685-700.
- Weisbach, J. (1845) *Lehrbuch der ingenieur-und maschinenmechanik*, 1, *Theoretische Mechanik*, Vieweg und Sohn, Braunschweig (in German).
- Wu, F.C., Shen, H.W. and Chou, Y.J. (1999) Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 125, No. 9, pp. 934-942.
- Yen, B.C. (2002) Open channel flow resistance, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 128, No. 1, pp. 20-39.

◎ 논문접수일 : 11년 10월 23일
 ◎ 심사외퇴일 : 11년 11월 01일
 ◎ 심사완료일 : 11년 12월 05일