

## 식생하천의 현장자료를 이용한 조도계수 관계식 유도

### Derivation of Roughness Coefficient Relationships Using Field Data in Vegetated Rivers

이 종 석\* / Julien, P. Y.\*\* / 김 재 훈\*\*\* / 이 태 우\*\*\*\*

Lee, Jong-Seok / Pierre Y. Julien / Kim, Jaehoon / Lee, Tae-Woo

#### Abstract

Field measurements of resistance to flow are analyzed for 739 rivers vegetated with grass (281 channels), shrubs (150 channels) and trees (308 channels). The measured distribution of Manning roughness coefficients ranges from 0.015~0.250 for grass, 0.016~0.250 for shrubs, 0.018~0.310 for trees. Significant trends are obtained between Darcy-Weisbach (or Manning roughness coefficients) and flow discharge, friction slope, and relative submergence. The regression equations for Darcy-Weisbach and Manning roughness coefficients in vegetated rivers are:  $f_{veg} = 0.436Q^{-0.363}$ ,  $f_{veg} = 3.305S_f^{0.508}$ , and  $n_{veg} = 0.061Q^{-0.124}$ ,  $n_{veg} = 0.144S_f^{0.199}$ ,  $V = 5.3(h/d_{50})^{1/8.3} \sqrt{ghS_f}$ ,  $\sqrt{8/f} (= V/u_*) = 5.75 \log(5h/d_{50})$ , respectively. These semi-empirical relationships should be useful for hydraulic engineering practice.

**Keywords** : vegetated rivers, roughness coefficients, relative submergence, roughness coefficient relationships, semi-empirical relationships

#### 요 지

본 연구는 흐름 저항에 대한 분석을 위해 초본 281개, 관목 150개, 교목 308개의 현장실측 자료로 구성된 739개 식생하천을 대상으로 수행되었다. 실측자료의 Manning 조도계수 분포는 초본자료에서 0.015~0.250, 관목자료에서 0.016~0.250, 교목자료에서 0.018~0.310의 범위를 갖는다. 이들 조도계수의 중요한 분포경향은 Darcy-Weisbach (또는 Manning의 조도계수)와 유량, 마찰경사 및 상대 잠수비에 대한 관계식으로 제시하였다. 식생하천에서 Darcy-Weisbach와 Manning 조도계수에 관한 회귀 방정식은  $f_{veg} = 0.436Q^{-0.363}$ ,  $f_{veg} = 3.305S_f^{0.508}$  와  $n_{veg} = 0.061Q^{-0.124}$ ,  $n_{veg} = 0.144S_f^{0.199}$  및  $V = 5.3(h/d_{50})^{1/8.3} \sqrt{ghS_f}$ ,  $\sqrt{8/f} (= V/u_*) = 5.75 \log(5h/d_{50})$ 로 유도되었다. 이들 반 경험적 관계식은 수공 실무에서 유용하게 사용될 것이다.

**핵심용어** : 식생하천, 조도계수, 상대 잠수비, 조도계수 관계식, 반 경험적 관계식

\* 교신저자, 한밭대학교 토목공학과 교수 (e-mail: ljs96@hanbat.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Department of Civil Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

\*\* 콜로라도대학교(CSU) 토목환경공학과 교수 (e-mail: pierre@engr.colostate.edu)

Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

\*\*\* 콜로라도대학교(CSU) 토목환경공학과 박사과정 (e-mail: jaehoonk@engr.colostate.edu)

Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

\*\*\*\* 상지엔지니어링(주) 대표이사 (e-mail: Itw640@naver.com)

CEO, Sangji Engineering and Construction Co., Gyeonggi-do Anyang-si 431-810, Korea

## 1. 서론

개수로에서 흐름에 대한 저항은 제방과 운반에 식생과 하상재료에 의해 유속의 변화를 초래하게 되는데, 이들 현상은 수공학을 전공하는 기술자들의 주요 과제로 오래 전부터 연구되어왔다. Rouse (1965)에 의하면 흐름 저항은 표면의 면 마찰, 형상에 의한 저항인 항력, 표면의 일그러짐에 의한 파 저항 및 국지적 가속에 따른 흐름의 비정상 상태로 분류할 수 있다. 하천의 흐름에 관한 많은 연구 중에 Chow (1959)는 Manning 조도계수표를 제시하였고, Engelund (1966)는 충적하천에 대한 수리학적 저항에 관해 연구하였으며, Chen (1976)은 초본류가 식재된 광폭 수로의 흐름 저항에 관해 연구하였다. Ree and Grow (1977)의 작은 수로경사의 식생수로에 대한 마찰계수, Schneider et al. (1977)은 홍수터에 많은 식재로 인한 수로폭 감소에 따른 배수영향과 유량의 산정, Pasche and Rouve (1985)는 식생에 의해 거친 홍수터를 갖는 제방의 흐름에 대해 연구하였고, White et al. (1987)은 충적하천의 상하류 영역내 마찰특성을 연구하였으며, Kadlec (1990)은 지표면에서의 식생저항, 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), Jeffrey et al. (2010)은 초본이 식재된 수로의 Manning 조도계수 및 식생과 흐름간의 이론적인 해석 등에 관해 연구하였다. 식생의 저항특성은 흐름 상태, 식생구조와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이는 하천의 지형적 특성과 수로구간의 위치, 식생의 수종별 분포정도 및 범위 등에 따라 다양한 분포를 갖는다. 하천에서 마찰경사와 유량이 갖는 관계식은 흐름에 대한 식생과 하상재료의 저항에 의해 지배된다. 하천 흐름에 대한 저항은 마찰, 하상의 불규칙성, 식생, 하상형상, 수로 선형 등과 같은 원초적인 변화성에서 발생된다. 이러한 저항의 정량적 해석은 접근방법의 응용과 저항에 관한 이들 모든 근원적인 변화성을 이해해야만 가능하다.

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 현장실측자료가 연구되었으며, 이들 현장측정과 조사연구로부터 수집된 자료가 본 연구에 사용되었다.

본 연구에서 사용된 자료는 위와 같은 현장조사와 실측을 바탕으로 기록된 보고서와 자료들을 수집하여 식생하천 자료의 조도계수 관계식과 Manning-Strickler 관계식을 유도하기 위해 필요한 여러 가지 변수들을 수리량으로 활용할 수 있도록 3개국, 9개 자료기록, 287개 하천에 대한 총 739개 식생자료를 엄선하였다. 이들 많은 자료의 분석에는 Box-Whisker 분석법을 적용 하였다. 이는 통계적으로 분석된 자료를 표시하기 위해 상자를 사용하는데, 이 상자의 아래와 윗부분은 항상 상위 1/4분위와 3/4분위를 위치시키고 상자의 중앙에는 2/4분위인 중앙값(median)을 위치시키며, 최대값과 최소값은 맨 아래와 맨 위에 위치시킨다(Tukey, 1977; Michael et al. 1989; Rousseeuw, 1999). 이를 통해 많은 자료의 통계적 분석이 용이함은 물론 자료의 변동성(variability) 파악이 용이하여 본 연구에 사용되었다.

본 연구에서 현장 실측자료를 이용하여 식생하천 흐름의 조도계수를 결정하기 위해 식생하천에서 실측된 초본 281개 자료, 관목 150개 자료, 교목 308개 자료로 구성된 현장자료 739개 자료를 대상으로 Box-Whisker 4분위 분석과 곡선적합에 의한 관계식을 도출하고자 한다. 또한 본 연구는 이들 식생하천 자료를 이용하여 오랜 기간동안 연구되어온 식생자료의 조도계수를 분석하여 그 종류별 분포 범위를 제시하고, 실무적인 활용성 확보를 위해 유량과 마찰경사를 함수로 하는 Darcy-Weisbach 및 Manning의 조도계수 관계식을 유도하며, 상대 잠수비와 전단 속도비 관계식을 유도하여 수공실무에 활용할 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 조도계수

하천에서 수로조도의 근원은 수로 경계를 따르는 전단 응력의 발생과 관련되는 마찰저항이다. 초본, 관목, 교목으로 구성되는 식생은 침식을 저감시킴으로써 수로와 제방의 안정성, 수생동물을 위해 다양한 서식처를 제공하는 하천생태계의 중요한 요소이다. 또한 상대 잠수비와 전단 속도비의 관계식은 식생하천의 흐름 및 저항 분석을 위해 중요하다.

마찰 저항계수로 개수로 흐름에 일반적으로 적용되고

가장 널리 사용되는 방정식은 Chézy (1769)의 평균유속계수  $C[V = CR^{2/3} S_f^{1/2}]$ 와 1845년 Weisbach가 유도하고 1857년 Darcy에 의해 Darcy-Weisbach 공식으로 명명된 Darcy-Weisbach 마찰손실계수  $f[V = \sqrt{8/f} \sqrt{gRS_f} = \sqrt{8/f} u_*]$  및 Manning (1889)의 조도계수  $n[V = (k/n)R^{2/3} S_f^{1/2}]$ 이 있다. 여기서  $V$ =평균유속이고,  $g$ =중력가속도이며,  $k$ =단위환산계수로 SI단위(m/s)일 때는 1, 영국계단위(ft/s)일 때는 1.49를 쓴다(Julien, 2010; Lee, 2010).

Manning 공식은 하천 수리학 실무에서 저항 방정식으로 가장 널리 사용되고 있으며, 이 식은 위에서 언급한 저항계수와 편리하게  $V/u_* \equiv C/\sqrt{g} \equiv \sqrt{8/f} \equiv (1/\sqrt{g})(R^{1/6}/n)$ 로 변환시킬 수 있다. 여기서  $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 인 전단속도이고  $\rho$ =물의 밀도이다. 이들 관계로부터 흐름의 저항은 수위가 감소함에 따라 상대 잠수비가 감소되고, 흐름 저항에 대한 조도요소의 영향은 요소항력과 유효경계 전단력의 조합으로 이루어짐을 알 수 있다. 그 외의 식생 하천 조도계수에 관한 연구는 Table 1과 같다.

Table 1에서  $T$ =수면폭(ft)이고,  $S_w$ =수면경사이며,  $d_{50}$ =중양입경(ft),  $A$ =식생에 의해 막히는 흐름의 정면 면적(ft<sup>2</sup>),  $A_*$ =부분 잠수 식생의 잠수된 순 정면 면적(ft<sup>2</sup>),  $A_s$ =식생 개개 줄기이 총 횡단면적(ft<sup>2</sup>)이다. 또한  $E_s$ =식물의 강성계수(lb/ft<sup>2</sup>)이고,  $\rho$ =유체 밀도이며,  $h$ =수심(ft),  $H$ =편향된 식물의 평균높이(ft),  $k$ =Manning 공식의 단위환산계수,  $M$ =ft<sup>2</sup>당 식물의 수로인 상대식생밀도,  $R$ =동수반경(ft),  $V$ =평균유속(ft/s),  $\nu$ =동점성계수(ft<sup>2</sup>/s)이다.

## 2.2 조도계수 결정

식생하천의 조도계수의 경험적인 결정방법에는 사진이

용방법, USGS 방법, ASCE 방법, 직접측정방법, Manning 조도계수표 이용방법 등 여러 가지가 있는데 이중 대표적인 방법을 간단히 기술한다.

### 2.2.1 사진이용 방법

사진과 대조하여 조도계수를 산정하는 방법은 조도계수가 연구되지 않은 비슷한 지점의 조도계수를 결정하기 위한 기준지점으로 이 하천지점을 사용한다. 이 방법은 조도계수를 알고 있는 몇 어떤 표본적인 외관에 대해 알고 조사함으로써 경험을 얻게 된다. 이들 하천 지점의 외관, 형상, 하상, 제방과 식생특성을 잘 알고 있는 것은 다른 지점에 대한 조도계수를 결정하는 수리학 전문가의 능력을 개선시킬 것이다. 이 방법은 다른 조도계수 결정방법의 초기평가로서 수리학적 모형에 사용하기 위한 조도계수, 다른 조도계수 결정방법을 검증하는데 사용할 수 있다.

Chow (1959)는 수로조건과 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.

### 2.2.2 USGS 방법

Cowan (1956)에 의해 제시된 USGS 방법(Arcement and Schneider, 1984)은 수로의 전체조도계수를 결정하기 위한 방법이다. 이 방법은 규칙적이고 균일, 직선인 자연

Table 1. Equations for Roughness Coefficients in Vegetated Rivers

References	Equations
Bray (1979)	$n = 0.104S_w^{0.177}$ (1a)
	$n = 0.048d_{50}^{0.179}$ (1b)
	$n = \frac{0.0927R^{1/6}}{0.248 + 2.36 \log(R/d_{50})}$ (1c)
Jobson and Froehlich (1988)	$n = 0.0245 (R/d_{50})^{-0.44} (T/R)^{-0.3}$ (2)
Sauer (1990), (Coon, 1998)	$n = 0.115S_w^{0.18} R^{0.08}$ (3)
Freeman et al. (1998)	$n = 0.039k_n \left( \frac{E_s A_s}{\rho V^2 A} \right)^{0.141} \left( \frac{H}{h} \right)^{0.175} (MA)^{0.191} \left( \frac{\nu}{VR} \right)^{0.0155}$ (4a)
	$n = 2.2 \times 10^{-6} k_n \left( \frac{E_s A_s}{\rho V^2 A_*} \right)^{0.242} (MA_*)^{0.0623} \left( \frac{\nu}{VR} \right)^{0.662}$ (4b)

하천에 대한 Manning의 조도계수 값을 기본적으로 선택한다. 이 기본적인 값은 표면의 불규칙성, 수로 단면의 크기와 형상, 장애물, 식생과 흐름조건 및 수로의 만곡 등에 대한 영향을 조정하게 된다. 이것은 저항계수에 대한 다양한 요소의 주관적 평가를 필요로 하며, 이들은 Manning 조도계수 향으로 모든 조도계를 조합하게 된다.

### 2.2.3 ASCE 방법

ASCE 방법(ASCE, 1963)은 광범위한 조건의 실험자료를 갖고 있어 상관성이 더 좋기 때문에 Manning의 조도계수  $n$ 보다 Darcy-Weisbach의 조도계수  $f$ 의 사용을 추천하고 있다. 이 방법은 전단 Reynolds 수  $R_{e*}$ 에 따라 수리학적으로 매끈한 흐름( $R_{e*} < 5$ ), 천이흐름( $5 < R_{e*} \leq 70$ ), 수리학적으로 거친 흐름( $R_{e*} > 70$ )으로 구분하여 조도계수를 산정하는 것을 추천한다.

### 2.2.4 Manning 조도계수표 방법

Manning의 조도계수 값의 선정에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 수로의 형상, 수로의 제방과 하상을 구성하는 재료의 크기와 종류이다. Chow (1959)는 Table 2와 같은 식생하천에 대한 Manning 조도계수를 제안하였다.

## 2.3 상대 잠수비와 전단 속도비

하천에서 Darcy-Weisbach의 조도계수 결정은 복잡한 일이다. 이는 조도계수가 유체의 점성과 수심, 입경, 하상 형상 및 식생 등에 따라 변하기 때문이다. 하천 흐름은 난류이고 수리학적으로 거친 경계와 매끈한 경계간의 차이를 갖는다(Julien, 2010).

실용 목적상 상대 수심비( $h/d_{50}$ )의 광범위한 자료에 대해 적용할 수 있고, 대략화를 통해 다음 식으로 사용할 수 있다(Julien, 2002; 2010).

$$\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{f}} = 5.75 \log\left(\frac{2h}{d_{50}}\right) \quad (5)$$

또한, Manning-Strickler의 멱함수 방정식은 조도계수

가 중앙입경  $d_{50}$ 에 대해  $n = 0.064 d_{50}^{1/6}$ 일 때 다음 식으로 쓸 수 있다.

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

반경험적인 접근방법은 수심이 작은 규모의 하상조도와 비교해 큰 곳의 경우에 흐름 저항을 정량화함에 있어 관수로 흐름 및 경계층 이론의 결과를 도입할 수 있다. 이와 같은 흐름에서 유속은 대략적으로 하상으로부터의 거리에 따른 대수식으로 표시할 수 있다.

수리학적으로 거친 경계에서 상대 잠수비( $h/d_{50}$ )와 전단 속도비( $V/u_*$ )의 대략적인 관계식으로 다음과 같이 쓸 수 있다(Julien, 2002).

$$\sqrt{\frac{8}{f}} \left(= \frac{V}{u_*}\right) = 5.75 \log\left(\frac{12.2h}{d_{50}}\right) \quad (7)$$

여기서,  $d_{50}$ =중앙입경으로 등가조도계수  $k_s'$ 와는  $k_s' \approx 6.8d_{50}$ 의 관계가 있으며,  $h$ =수심이다.

## 3. 분석 및 요약

본 연구에는 서론에서 언급한 바와 같이 여러 연구자들의 현장측정과 조사연구에 의해 발표된 Figs. 1 and 2와 같은 방법으로 자료를 수집하여 사용하였으며, 이들 자료는 Tables 3 and 4와 같다.

### 3.1 자료 분석

9개 연구자료 중 Fig. 1은 Hicks and Mason (1998)이 뉴질랜드의 78개 하천의 조도계수 결정자료 중의 하나인 Waipaoa 강으로 유역면적이 1,582 km<sup>2</sup>이고, 이 지점을 1972년부터 1998년 현재까지 관측점으로 사용하고 있으며, 만제유량은 1,070 m<sup>3</sup>/w이며, 평수량은 34.2 m<sup>3</sup>/w이다. 하상은 가는 자갈과 실트로 구성되었고, 양 제방에는 버드나무(Willow tree)가 덮여있다.

또한, Fig. 2는 Coon (1998)이 미국 New York의 20개

Table 2. Manning's Roughness Coefficients for Vegetation by Chow (1959)

Description	Manning's n		
	Minimum	Normal	Maximum
Grass	0.025~0.030	0.030~0.035	0.035~0.050
Shrub	0.035~0.070	0.050~0.100	0.070~0.160
Trees	0.030~0.11	0.040~0.150	0.050~0.200

하천에서 식생 제방(vegetated bank)의 조도계수 평가 중의 하나인 Chenango 강(Coon, 1998)으로 유역면적 1,483  $\text{mi}^2$  (572.59  $\text{km}^2$ )이고, 최대유량 24,000  $\text{ft}^3/\text{s}$  (679.2  $\text{m}^3/\text{s}$ )에서부터 5,000  $\text{ft}^3/\text{s}$  (141.5  $\text{m}^3/\text{s}$ )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.

본 연구에 사용된 자료는 Table 3과 같이 식생하천 739

개의 현장실측 자료로 구성되었으며, 이들 자료는 유량과 마찰경사에 대한 Darcy-Weisbach, Manning 조도계수의 분포분석 및 관계식 유도, 상대 잠수비와 전단 속도비 관계식 도출에 사용되었다. 현장실측 739개 자료는 Julien이 식생의 수종명으로 제시된 수집 원자료를 식생의 분류기준을 근거로 하여 초본(grass), 관목(shrub), 교목(tree)으로 자료를 구분하여 초본 281개, 관목 150개, 교목 308개로 분류하였다. 이들 자료의 유량, 마찰경사, 중앙입경, 평



(a) View of reach looking downstream



(b) View of reach looking upstream

Fig. 1. Photographs of Waipaoa River at Kanakanaia in New Zealand (Hicks and Mason, 1998)



(a) View of upstream toward left bank



(b) View of upstream toward right bank

Fig. 2. Photographs of Chenango River near Chenango Forks, N.Y. (Coon, 1998)

Table 3. Field Measured Data for Vegetated Rivers Used in This Study

Type	Data no.	Flow discharge $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Friction slope $S_f$ (-)	Median diameter $d_{50}$ (mm)	Average velocity $V$ (m/s)	Flow depth $h$ (m)
Grass	281	0.01 ~ 750.48	0.00007 ~ 0.0179	0.33 ~ 304.8	0.06 ~ 3.66	0.16 ~ 3.96
Shrub	150	0.38 ~ 542	0.00001 ~ 0.034	16 ~ 893	0.10 ~ 3.64	0.16 ~ 3.96
Tree	308	0.02 ~ 3,220.00	0.0001 ~ 0.0405	0.17 ~ 397	0.07 ~ 5.11	0.10 ~ 9.17
Total	739	0.01 ~ 3,220.00	0.00001 ~ 0.0405	0.17 ~ 893	0.06 ~ 5.11	0.10 ~ 3.96

균유속, 수심의 최소값과 최대값의 범위는 Table 3과 같으며, 본 연구에서 중요하게 사용된 유량과 마찰경사는 Table 4에 그 분포범위를 세분하여 상세하게 제시하였다.

본 연구는 Darcy-Weisbach 조도계수  $f$ 와 Manning 조도계수  $n$ 에 대한 에너지경사  $S_f$ 와 유량  $Q$  뿐만 아니라 매개변수  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$ ,  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$  및 Manning-Stickler 관계식  $h/d_s \sim V/u_*$ 에 대한 분석을 각각 수행하였다. 분석에 사용된 자료는 Tables 3 and 4와 같이 초본, 관목 및 교목으로 구성된 식생하천 739 자료로 구성되었다.

조도계수  $f$ 와  $n$ , 매개변수  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$  과  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 는 Box-Whisker 4분위 분석에 의해 수행되었으며, 4분위(%) 분석은 대상자료의 상위 1%인 최소값이 맨 아래 수평선으로 표시되고, 가운데 상자의 중심에는 중앙치 및 그 위와 아래로는 상위 25%, 75%값이 표시되며, 맨 위쪽

수평선이 100%인 최대값을 나타낸다. 이는 조도계수와 매개변수의 분포특성 분석함에 있어 자료의 변동성 파악이 용이하여 본 연구에 적용되었다.

### 3.1.1 Darcy-Weisbach 조도계수

739개의 식생하천은 초본, 관목, 교목으로 구성된 식생 자료이다. 이들 자료를 사용하여 Darcy-Weisbach의 조도계수 관계식은 Figs. 3 and 4와 같이 유량과 마찰경사를 함수로 하는 곡선적합에 의해 유도되었다.

식생하천에서 Darcy-Weisbach의 조도계수 관계식은  $f_{L.Veg} = \alpha_{f.L.Veg} Q^{\beta_{f.L.Veg}}$ 와  $f_{L.Veg} = \alpha_{f.L.Veg} S_f^{\beta_{f.L.Veg}}$ 인 멱함수 형태로 유도되었다. 여기서  $Q$ =유량( $m^3/s$ )이고,  $S_f$ =마찰경사이며,  $\alpha_{f.L.Veg}$ ,  $\beta_{f.L.Veg}$ =식생하천의 Darcy-Weisbach 조도계수 관계식에 대한 상수와 지수이다. 각 수리량에 대한 조

Table 4. Detailed Data for Vegetated Rivers in Table 3

Flow property	Detailed range	Grass		Shrub		Tree	
		Data no.	Distribution	Data no.	Distribution	Data no.	Distribution
Flow discharge $Q$ ( $m^3/s$ )	$Q \leq 50$	213	0.01~49.56	123	0.38~42.3	157	0.02~49.87
	$50 < Q \leq 500$	62	50.41~447.46	25	50.6~413	127	50.98~448
	$500 < Q \leq 1,000$	6	563~750.48	2	527~542	12	511~962
	$1,000 < Q$	-	-	-	-	12	1,059~3,220
	Total	281	0.01~750.48	150	0.38~542	308	0.02~3,220
Friction slope $S_f$ (-)	$S_f \leq 0.0001$	42	0.00007~0.00048	19	0.0001~0.00039	24	0.0001~0.00035
	$0.0001 < S_f \leq 0.001$	76	0.0005~0.00099	6	0.00043~0.00091	80	0.00041~0.00099
	$0.001 < S_f \leq 0.005$	91	0.001~0.00488	31	0.00102~0.003	80	0.01~0.00298
	$0.005 < S_f$	72	0.00511~0.0179	94	0.00391~0.0340	124	0.003~0.0405
	Total	281	0.00007~0.0179	150	0.0001~0.034	308	0.0001~0.0405

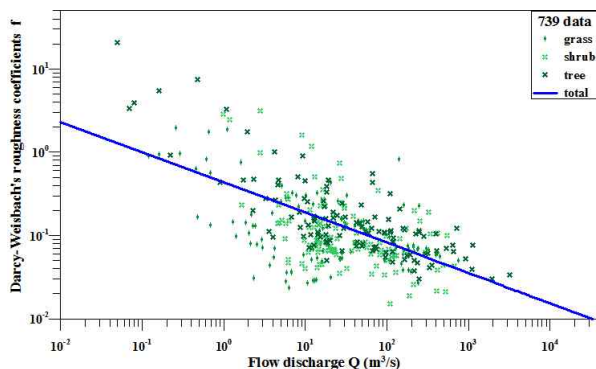


Fig. 3. Relationship Analysis for  $\log Q - \log f$  of 739 Data in Vegetated Rivers

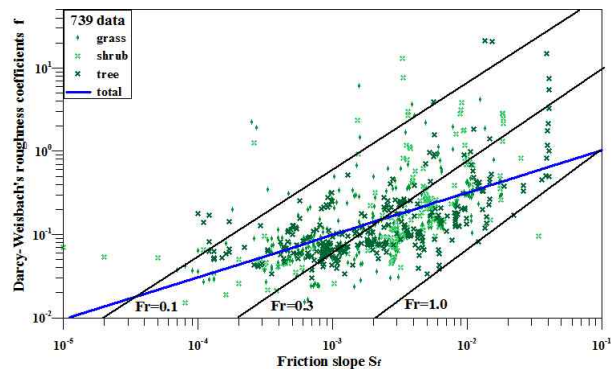
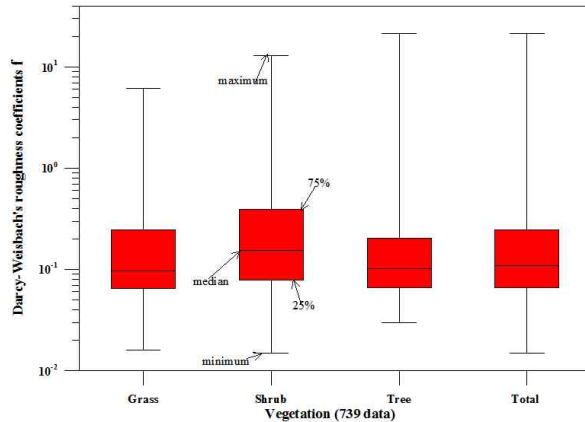
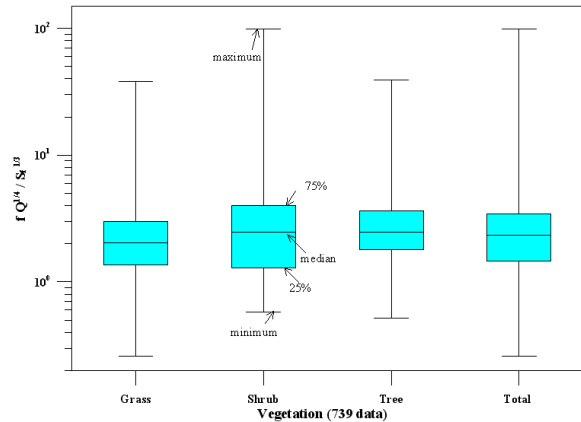


Fig. 4. Relationship Analysis for  $\log S_f - \log f$  of 739 Data in Vegetated Rivers



(a) Analysis for roughness coefficient  $f$



(b) Analysis for parameter  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$

Fig. 5. Box-Whisker Plot for Darcy-Weisbach's  $f$  and  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$  in Vegetated Rivers

Table 5. Summary of Box-Whisker Plot for Darcy-Weisbach's  $f$  and  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$  in Vegetated Rivers

Items	Name	Number	A Min.	B Max.	C Median	D Mean	Quartile (percentile)		B/A	D/C	F/E
							E First (25th)	F Third (75th)			
$f$	Grass	281	0.016	6.121	0.097	0.271	0.065	0.245	382.56	2.79	3.77
	Shrub	150	0.015	12.910	0.155	0.581	0.078	0.39	860.67	3.75	5.00
	Tree	308	0.030	21.462	0.102	0.434	0.066	0.204	715.40	4.25	3.09
	Total	739	0.015	21.462	0.109	0.402	0.066	0.244	1,430.80	3.69	3.70
	Average		0.02	15.49	0.12	0.42	0.07	0.27	847.36	3.62	3.89
$\frac{fQ^{1/4}}{S_f^{1/3}}$	Grass	281	0.261	38.245	2.024	2.816	1.367	2.987	146.53	1.39	2.19
	Shrub	150	0.580	98.223	2.457	5.073	1.294	3.981	169.35	2.06	3.08
	Tree	308	0.520	39.358	2.462	3.246	1.815	3.628	75.69	1.32	2.00
	Total	739	0.261	98.228	2.354	3.453	1.471	3.418	376.35	1.47	2.32
	Average		0.41	68.51	2.32	3.65	1.49	3.50	191.98	1.56	2.40

도계수의 관계식은  $f_{Lveg} = 0.436 Q^{-0.363} (R^2=0.41)$ 과  $f_{Lveg} = 3.305 S_f^{0.508} (R^2=0.36)$ 로 유도되었다. 실제 하천에서 식생은 초본, 관목, 교목 등이 혼합돼 있는 점을 고려한다면 이들 관계식은 실용적 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Figs. 5(a) and (b)와 Table 5는 각각 식생하천 739개 자료에 대한 Darcy-Weisbach 조도계수  $f$ 와 매개변수  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$ 의 Box-Whisker 분석결과이다.

Fig. 5(a)의 Darcy-Weisbach  $f$ 에 대한 식생하천 자료에서 Box-Whisker 분석결과는 Table 5와 같이 281개 초본 자료는 0.016~6.121, 150개 관목 자료는 0.015~12.910, 308개 교목 자료는 0.030~21.462, 739개 전체 자료에서는 0.015~12.462로 각각 나타났다. Fig. 5(b)의 Darcy-Weisbach 조도계수  $f$ 와 매개변수  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$ 에 대한 분

석결과를 비교할 때 평균값/중앙값의 비와 상위(3/4)값/상위(1/4)값의 비에서 이들 평균값은 3.6, 3.9 및 1.6, 2.4로 나타났다.

### 3.1.2 Manning 조도계수

739개의 식생하천은 초본, 관목, 교목으로 구성된 식생 자료이다. 이들 자료를 사용하여 Manning의 조도계수 관계식은 Figs. 6 and 7과 같이 유량과 마찰경사를 함수로 하는 곡선적합에 의해 유도되었다.

자료에 대한 Manning의 조도계수 관계식은  $n_{Lveg} = \alpha_{n \cdot Lveg} Q^{\beta_{n \cdot Lveg}}$ ,  $n_{Lveg} = \alpha_{n \cdot Lveg} S_f^{\beta_{n \cdot Lveg}}$ 인 멱함수 형태로 유도되었다. 여기서  $Q$ =유량( $m^3/s$ )이고,  $S_f$ =마찰경사이며,  $\alpha_{n \cdot Lveg}$ ,  $\beta_{n \cdot Lveg}$ =자연하천에 대한 Manning 조도계수 관계식의 상수와 지수이다. 각 수리량에 대한 조도계수 관계식은

$n_{L,cat} = 0.061 Q^{-0.124}$  ( $R^2=0.24$ ),  $n_{L,cat} = 0.144 S_f^{0.199}$  ( $R^2=0.28$ )로 각각 유도되었다. 실제 하천에서 식생은 초본, 관목, 교목 등이 혼합돼 있는 점을 고려한다면 이들 관계식은 실용적 측면에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

Figs. 8(a) and (b)와 Table 6은 각각 식생하천 739개 자

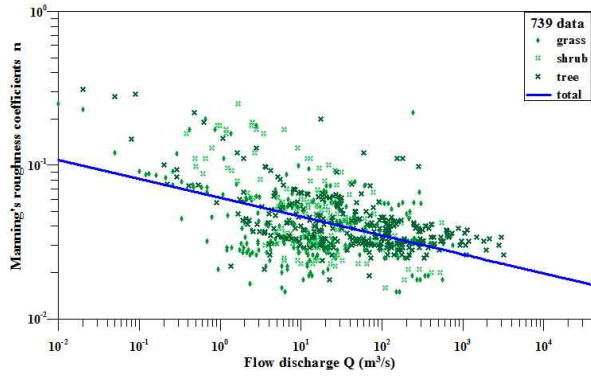


Fig. 6. Relationship Analysis for  $\log Q$ - $\log n$  of 739 Data in Vegetated Rivers

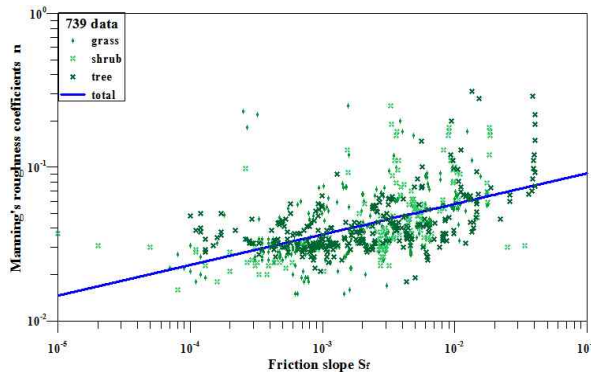
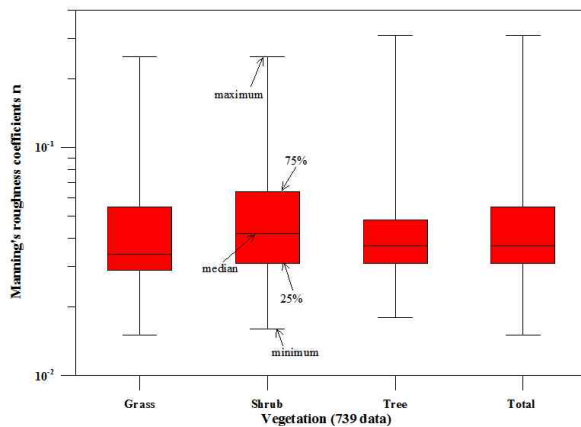


Fig. 7. Relationship Analysis for  $\log S_f$ - $\log n$  of 739 Data in Vegetated Rivers



(a) Analysis for roughness coefficient  $n$

료에 대한 Manning 조도계수  $f$ 와 매개변수  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 의 Box-Whisker 분석결과이다.

Fig. 8(a)의 Manning 조도계수  $n$ 에 대한 식생하천 자료에서 Box-Whisker 분석결과는 Table 6과 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. Fig. 8(b)의 Manning 조도계수  $n$ 과 매개변수  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 에 대한 분석결과를 비교할 때 평균값/중앙값의 비와 상위(3/4)값/상위(1/4)값의 비에서 이들 평균값은 각각 1.1, 1.6 및 1.1, 1.6으로 같은 비율을 갖는 것으로 나타났다.

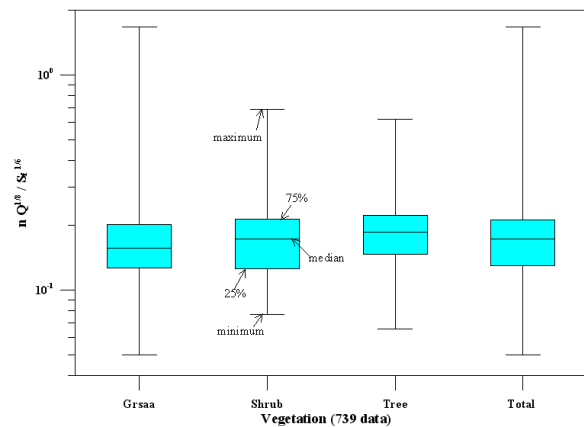
### 3.1.3 상대 잠수비와 전단 속도비

Fig. 9는 739개 자료의 상대 잠수비  $h/d_{50}$ 와 전단 속도비  $V/u_*$ 에 대한 관계식을 곡선 적합을 통해 반경험적 방법에 의해 유도하였다.

Fig. 9와 같이 Manning-Strickler 관계식은  $h/d_{50}$  항의 계수는 5보다 약간 큰 5.3, 지수는 1/6보다 약간 작은 1/8.3을 갖는  $V=5.3(h/d_{50})^{1/8.3} \sqrt{ghS_f}$ 로 각각 유도되었고, 상대 잠수비  $h/d_{50}$ 와 전단 속도비  $V/u_*$ 에 대한 관계식은 실용 목적 및 수리학적 거친 경계인 식보다 우수한 값을 갖는  $\sqrt{8/f} (= V/u_*)=5.75 \log(5h/d_{50})$ 로 유도되었다.

### 3.2 결과 요약

본 연구에 사용된 초본, 관목, 교목으로 구성된 식생하천의 자료는 Table 7과 같이 Darcy-Weisbach 조도계수  $f$ 와 Manning 조도계수  $n$ 의 값을 갖는 것으로 분석되었다. 이들 자료는 Darcy-Weisbach 조도계수에서 281개 초



(b) Analysis for parameter  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$

Fig. 8. Box-Whisker Plot for Manning's  $n$  and  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$  in Vegetated Rivers



Table 6. Summary of Box-Whisker Plot for Manning's  $n$  and  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$  in Vegetated Rivers

Items	Name	Number	A Min.	B Max.	C Median	D Mean	Quartile(percentile)		B/A	D/C	F/E
							E First (25th)	F Third (75th)			
$n$	Grass	281	0.015	0.250	0.034	0.046	0.029	0.055	16.67	1.35	1.90
	Shrub	150	0.016	0.250	0.042	0.058	0.031	0.064	15.63	1.38	2.06
	Tree	308	0.018	0.310	0.037	0.047	0.031	0.037	17.22	1.27	1.19
	Total	739	0.015	0.310	0.037	0.049	0.031	0.055	20.67	1.32	1.77
	Average		0.02	0.28	0.04	0.05	0.03	0.05	17.55	1.33	1.73
$\frac{nQ^{1/8}}{S_f^{1/6}}$	Grass	281	0.05	1.67	0.157	0.178	0.126	0.200	33.40	1.13	1.59
	Shrub	150	0.077	0.69	0.172	0.195	0.125	0.214	8.96	1.13	1.71
	Tree	308	0.066	0.622	0.185	0.196	0.148	0.223	9.42	1.06	1.51
	Total	739	0.05	1.67	0.173	0.189	0.13	0.212	33.40	1.09	1.63
	Average		0.06	1.16	0.17	0.19	0.13	0.21	21.30	1.10	1.61

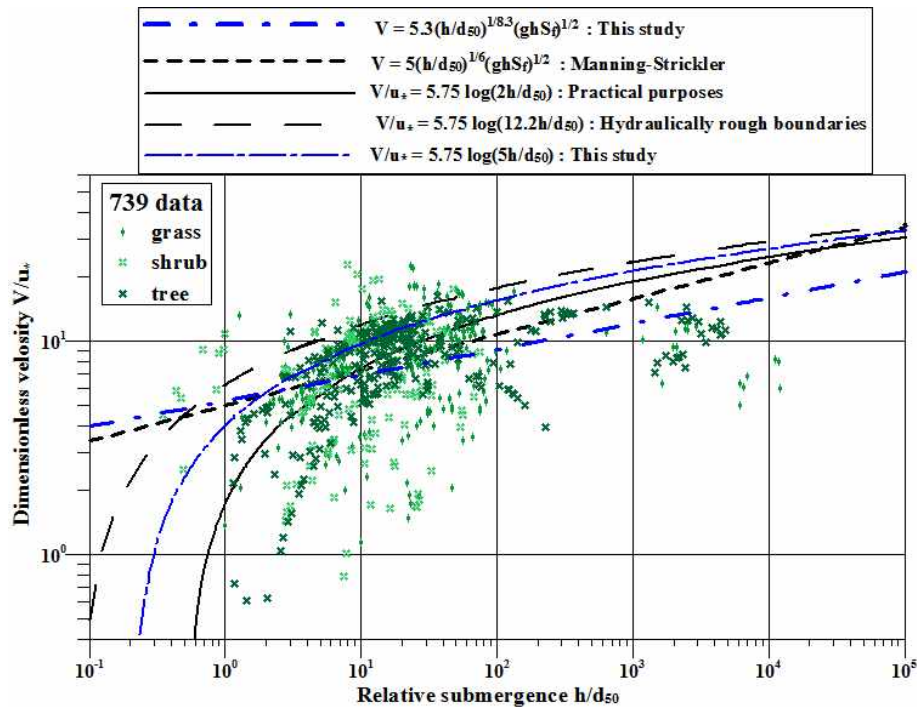


Fig. 9. Analysis of Manning-Strickler and Relative Submergence in Vegetated Rivers

Table 7. Summary of Darcy-Weisbach and Manning Roughness Coefficients in Vegetated Rivers

Name	Number	Roughness coefficients					
		Manning $n$			Darcy-Weisbach $f$		
		Min.	Average	Max.	Min.	Average	Max.
Grass	281	0.015	0.046	0.250	0.016	0.097	6.121
Shrub	150	0.016	0.058	0.250	0.015	0.155	12.910
Tree	308	0.018	0.047	0.310	0.030	0.102	21.462
Total	739	0.015	0.049	0.310	0.015	0.109	21.462

본 자료는 0.016~6.121, 150개 관목 자료는 0.015~12.910, 308개 교목 자료는 0.030~21.462, 739개 전체 자료에서는 0.015~12.462로 나타났다. Manning 조도계수에서 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 나타났다.

Box-Whisker 분석 결과에서 Darcy-Weisbach 조도계수의 상위 25%와 75%의 값에서 초본은 0.065~0.245, 관목은 0.078~0.309, 교목은 0.066~0.034, 전체 평균은 0.07~0.27로 나타났다. Manning의 조도계수에서 초본은 0.029~0.055, 관목은 0.031~0.064, 교목은 0.031~0.037, 전체 평균은 0.03~0.05로 나타났다. Box-Whisker에 의한 Darcy-Weisbach 및 Manning의 조도계수와 매개변수의 평균값/중앙값, 상위(3/4)/상위(1/4)의 분석은 Table 8과 같이 나타났다.

Table 8과 같이 Darcy-Weisbach 조도계수와 매개변수의 평균값/중앙값과 상위(3/4)/상위(1/4)의 평균값은 3.6, 3.9 및 1.6, 2.4로 두 경우의 값은 차이를 갖는 것으로 나타났고, Manning의 조도계수와 매개변수의 경우에 평균값은 1.3, 1.7 및 1.1, 1.6으로 그 값의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 Darcy-Weisbach 매개변수로  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$ 와 Manning의 매개변수로  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$ 를 사용하여 유량

과 마찰경사 간의 조도계수 관계를 분석하는데, Box-Whisker 분석을 이용하였다. 이 분석법을 이용해 자료의 변동성을 쉽게 파악함으로써 Darcy-Weisbach와 Manning의 조도계수 분포범위 제시와 정확한 매개변수 분석이 가능하였다. Darcy-Weisbach 마찰계수  $f$ 의 경우는 평균값/중앙값, (3/4)분위/(1/4)분위 값이 2.7~4.25, 3.09~5.00인 것에 비해 Manning의 조도계수  $n$ 은 1.27~1.38, 1.19~2.05로 나타났다. 또한  $fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$ 과  $nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$  값은 1.32~2.06, 2.00~3.08 및 1.06~1.13, 1.51~1.71로 나타났는데, 이는 Darcy-Weisbach의 조도계수나 매개변수가 Manning의 조도계수나 매개변수 보다 변동성이 크다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 실무에서는 변동성이 작은 Manning의 조도계수나 매개변수를 활용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서 유량과 마찰경사에 대한 조도계수의 관계식은 멱함수 형의 식으로 유도되었는데, Darcy-Weisbach 조도계수 관계식은  $f_{Lveg} = 0.436 Q^{-0.363}$ ,  $f_{Lveg} = 3.305 S_f^{0.508}$ 로 유도되었고, Manning 조도계수 관계식은  $n_{Lveg} = 0.061 Q^{-0.124}$ ,  $n_{Lveg} = 0.144 S_f^{0.199}$ 로 각각 유도되었다.

본 연구 결과와 Chow (1959) 및 Julien (2002)의 Manning 조도계수 비교 결과는 Table 9와 같이 나타났다.

Table 9에서와 같이 식생하천의 경우에도 비슷한 경향으로 최소값은 본 연구와 Julien (2002)의 값보다 Chow

Table 8. Summary of Box-Whisker Plot for the Coefficients and Parameters in Vegetated Rivers

Name	Darcy-Weisbach				Manning			
	$f$		$fQ^{1/4}/S_f^{1/3}$		$n$		$nQ^{1/8}/S_f^{1/6}$	
	Mean /Median	Third (75th) /First (25th)	Mean /Median	Third (75th) /First (25th)	Mean /Median	Third (75th) /First (25th)	Mean /Median	Third (75th) /First (25th)
Grass	2.79	3.77	1.39	2.19	1.35	1.90	1.13	1.59
Shrub	3.75	5.00	2.06	3.08	1.38	2.06	1.13	1.71
Tree	4.25	3.09	1.32	2.00	1.27	1.19	1.06	1.51
Average	3.6	3.9	1.6	2.4	1.3	1.7	1.1	1.6

Table 9. Comparisons with between This Study and Chow(1959) and Julien(2002) in Manning's  $n$

Name	Manning roughness coefficients								
	Minimum			Average			Maximum		
	This study	Chow	Julien	This study	Chow	Julien	This study	Chow	Julien
Grass	0.015	0.025~0.030	0.03	0.046	0.030~0.035	0.05	0.250	0.035~0.050	0.07
Shrub	0.016	0.035~0.070		0.058	0.050~0.100		0.250	0.070~0.160	
Tree	0.018	0.030~0.11		0.047	0.040~0.150		0.310	0.050~0.200	

(1959) 값이 크게 나타났고, 평균값은 세 경우가 비슷한 범위 값을 나타냈으며, 최대값은 본 연구의 경우가 두 경우도 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이들 값이 차이를 보이는 것은 Chow (1959)의 Manning 조도계수는 1950년대 전후의 자료를 중심으로 한 값이고, 본 연구는 1960년대부터 1990년대의 광범위한 자료를 분석한 것이 때문에 여러 가지 측면에서 관측자료에 차이가 생길 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구 결과를 실무에서 Manning 조도계수 결정할 때 사용할 경우에는 제시된 평균값을 선정하면 적절할 것이다.

그리고 Manning-Strickler 관계식은 상대잠수비  $h/d_{50}$  항의 계수는 5보다 약간 큰 5.3, 지수는 1/6보다 약간 작은 1/8.3인  $V=5.3(h/d_{50})^{1/8.3} \sqrt{ghS_f}$  로 유도되었고, 상대잠수비  $h/d_{50}$ 와 전단속도비  $V/u_*$ 에 대한 관계식은 실용 목적인 경우와 수리학적으로 거친 경계 조건의 식보다 우수한 값을 갖는  $\sqrt{8/f} (= V/u_*) = 5.75 \log(5h/d_{50})$  으로 유도되었는데, 이들 식은 수공 실무에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 초본, 관목, 교목으로 구성된 739개 식생하천 현장 실측자료를 대상하였다. 이들 자료를 이용한 조도계수의 결정은 수공 실무에서 활용할 수 있도록 Darcy-Weisbach 및 Manning 조도계수의 분포, 조도계수의 관계식, 상대 잠수비에 대한 전단 속도비의 관계식을 유도하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Darcy-Weisbach 조도계수의 경우 281개 초본 자료는 0.016~6.121, 150개 관목 자료는 0.015~12.910, 308개 교목 자료는 0.030~21.462, 739개 전체 자료에서는 0.015~12.462로 나타났다. Manning 조도계수의 경우 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 나타났다.
- 2) 유량과 마찰경사에 대한 조도계수 관계식은 멱함수형 계식은  $f_{Lveg} = 0.436Q^{-0.363}$ ,  $f_{Lveg} = 3.305S_f^{0.508}$  및 Manning 조도계수 관계식은  $n_{Lveg} = 0.061Q^{-0.124}$ ,  $n_{Lveg} = 0.144S_f^{0.199}$ 로 각각 유도되었다.
- 3) Manning-Strickler 관계식은 기울기가 1/6보다 작은 1/8.3을 갖는  $V=5.3(h/d_{50})^{1/8.3} \sqrt{ghS_f}$  로 유도되었고, 상대 잠수비와 전단 속도비에 대한 관계식은 실용 목적인 경우와 수리학적으로 거친 경계 조건의 식보다 우수

한 값을 갖는  $\sqrt{8/f} (= V/u_*) = 5.75 \log(5h/d_{50})$  으로 유도되었는데, 이들 식은 수공 실무에 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

- 4) 본 연구에서는 Box-Whisker 분석을 이용해 자료의 변동성을 쉽게 파악함으로써 Darcy-Weisbach와 Manning의 조도계수 분포범위 제시와 정확한 매개변수 분석이 가능하였으며, Darcy-Weisbach의 조도계수나 매개변수는 Manning의 경우보다 변동성을 크다는 것이 확인되었다. 실무에서는 변동성이 작은 Manning의 조도계수나 매개변수를 활용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 제1저자의 국제공동 연구과제 수행 기간 동안 콜로라도대학교에서 수행되었으며, 이를 원활히 수행할 수 있도록 지원해준 상지엔지니어링(주)과 한밭대학교에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 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.
- Annable, W.K. (1996). Database of morphologic characteristics of watercourse in Southern Ontario, Ontario, Ministry of Natural Resources, 212.
- 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, USGS.
- 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, 213.
- Bray, D.I. (1979). "Estimating average velocity in gravel-bed rivers." *J. Hydraul Div.*, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1122.
- 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, 133.
- Cowan, W.L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficients." *Agric. Eng.*, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
- Darcy, H. (1857). "Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux." Mallet-Bachelier, Paris, 268 and atlas(in French).
- 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, 93.
- 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.
- Jarrett, R.D. (1985). Determination of roughness coefficients for streams in Colorado, USGS, WRI Report 85-4004, 54.
- Jeffrey, T.R., Anne, F.L., and Heidi, M.N. (2010). "Effects of added vegetation on sand bar stability and stream hydrodynamics." *J. Hydraul Eng.*, Vol. 136, No. 12, pp. 994-1002.
- Jobson, H.E., and Froehlich, D.C. (1988). Basic hydraulic principles of open-channel flow, USGS, Open-File Report 88-707, 150.
- 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.
- 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).
- 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.
- Michael, F., David, C., and Hoaglin, B.I. (1989). "Some implementations of the boxplot." *The American Statistician*, Vol. 43, No. 1, pp. 50-54.
- 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.
- 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, 77.
- Ree, W.O., and Grow, F.R. (1977). Friction factors for vegetated waterways of small slope, Agricultural Research Service, ARS-S-151, 56.
- Rouse, H. (1965). "Critical analysis of open-channel resistance." *J. Hydraul Div.*, Vol. 91, No. 4, pp. 1-25.
- Rousseeuw, P.J., Ruts, I., and Tukey, J.W. (1999). "The bagplot: A bivariate oplot." *The American Statistician*, Vol. 53, No. 4, pp. 382-387.
- 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, 64.
- 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.
- Tukey, J.W. (1977). Exploratory data analysis, Addison-Wesley.
- 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), Vol. 83, No. Part 2, pp. 685-700.
- Weisbach, J. (1845). "Lehrbuch der ingenieur-und maschinen-mechanik." 1, Theoretische Mechanik, Vieweg und Sohn, Braunschweig, 535 (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.

논문번호: 11-111	접수: 2011.10.04
수정일자: 2011.11.10/12.01	심사완료: 2011.12.01