

# 충적하천 실측자료의 저항계수와 관계식

## Resistance Factors and Relationships for Measurements in Fluvial Rivers

이종석\*, Julien, P.Y\*\*

한밭대학교 토목공학과\*, Colorado State University\*\*

Jong-Seok Lee(ljs96@hanbat.ac.kr)\*, Pierre Y. Julien(pierre@engr.colostate.edu)\*\*

### 요약

본 연구는 충적하천에서 실측된 현장자료를 이용하여 흐름에 관한 저항계수와 관계식을 분석하고 유도하였으며, 연구에는 자연하천 자료 1,865개와 식생하천 자료 739개가 포함된 2,604개 자료가 사용되었다. 회귀분석에 의해 Manning 조도계수와 Darcy-Weisbach 마찰계수 관계식이 자연하천 하상재료와 식생하천 식생자료의 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멱함수 형의 식으로 각각 유도되었다.

■ **중심어** : | 충적하천 | 실측자료 | 회귀분석 | 멱함수 형 | Darcy-Weisbach 마찰계수 |

### Abstract

This study is used to analyze the distribution of resistance factors and the relationships of flow resistance with the field measurements which consist of the total 2,604 rivers for 1,865 bed material in natural channels and 739 vegetation in vegetated channels. Resistance factor relationships and distribution range of Manning roughness coefficients and Darcy-Weisbach friction coefficients by the regression analysis are derived from the power law form as a function of flow discharge and friction slope with bed materials and vegetations in natural and vegetated rivers, respectively.

■ **keyword** : | Fluvial Rivers | Measurements | Regression Analysis | Power Law Form | Darcy-Weisbach Friction Factor |

## 1. 서론

충적하천에서 흐름 저항은 하상과 제방을 구성하고 있는 재료와 그에 분포하고 있는 각종 식생 등의 상호작용에 의해 유속의 변화를 초래하여 하상과 제방의 세굴을 퇴적을 초래하게 된다. 이들 현상은 오랜 시간을 두고 토목공학 기술자들의 중요한 관심의 대상이 되었고, 수공학 전공자들의 많은 연구대상으로 되어오고 있다. 흐름의 저항은 주로 자연하천의 하상재료를 중심으로 저항계수 분포와 그 관계식의 유도를 중심으로 연구되어왔다. 최근에는 하천 복원과 관련된 식생하천 조성

이 부각 되면서 식생조도계수와 관련된 연구가 주요 관심의 대상이 되고 있다.

충적하천의 흐름 저항에 관한 연구에서 Cowan [11]은 조도계수가 하천 내 에너지 손실에 기여하는 많은 요소의 조합에 의해 이루어지나 주요한 요소는 윤향을 형성하고 있는 수로 양측면과 하상 구성재료 입자의 크기, 형상, 분포에 의해 결정되는 수로 표면조도로 제안했다. Chow[9]는 하상재료나 식생과 관련된 조도계수 뿐만 아니라 금속 및 비금속재료 등의 조도계수값을 범위별로 구분해 표로 제시하였다. Limerinos[24]는 미 캘리포니아에 위치한 11개 지점에서 현장측정된 50개의

유량자료를 사용하여 Manning의 조도계수 관계식을 동수반경과 하상재료의 입경으로 표시하였다. Chen[7]은 초본류가 식재된 광폭수로의 흐름 저항에 대해 연구하였고, Pasche and Rouve[27]는 식생에 의해 거친 홍수터를 갖는 제방의 흐름에 대해 연구하였으며, Wu 등[32]은 침수 및 비침수 식생의 조도계수 변화에 대해 연구하였다. Yen[33]은 개수로 흐름의 저항에 대해 많은 이론과 실험적 연구결과 및 사례를 분석하여 제시하였고, 그 외에도 Nikora et al.[26], Chen[8] 등은 초본이 식재된 수로의 Manning 조도계수 및 식생과 흐름간의 이론적인 해석 등에 대해 연구하였다.

충적하천의 실측자료는 Barnes[5]가 미국 Washington의 50개 하천에 대한 자연수로 조도계수를 연구하였고, Jarrett[17]는 미국 Colorado의 21개 하천에 관한 조도계수를 결정하였으며, Annable[4]은 미국서부 Ontario의 47개 하천에서 유로의 지형학적 특성을 연구하였다. Gillen[13]은 미국 남부 Florida의 10개 하천에 대한 조도계수를 결정하였고, Phillips and Ingersoll[28]은 미국 Arizona의 14개 하천에서 조도계수를 검증하는 연구를 수행하였으며, Hicks and Mason[16]은 뉴질랜드의 78개 하천을 대상으로 현장실측을 통한 조도계수를 결정하였다. Lang et al.[22]은 오스트레일리아 Victoria의 4개 하천에 대한 조도계수를 결정하는데 사진방법을 이용하여 연구하였고, Lee and Julien[23]은 자연하천의 하상재료를 이용해 하천하류의 안정 형상에 관한 관계식을 유도하였으며, Soong et al.[31]은 미국 Illinois의 43개 하천에 대한 Manning 조도계수의 평가에 대한 현장실측 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 충적하천의 현장측정과 조사연구로부터 실측된 자료를 사용하여 저항계수의 분포분석과 관계식을 유도하기 위해 문헌[2]에서 사용했던 자연하천 자료 1,865개 외에 식생하천 자료 739개를 추가해 2,604개의 자료가 사용되었다. 이들 자료의 저항계수 분포 분석에는 상자의 아래와 윗부분은 항상 상위 1/4분위와 3/4분위를 위치시키고 상자의 중앙에는 2/4분위인 중앙값을 위치시키며, 최대값과 최소값은 맨 아래와 맨 위에 위치시키는 Box-Whisker 분석법을 적용 하였다 [29][30]. 또한 Darcy-Weisbach 마찰계수와 Manning

조도계수의 관계식을 회귀분석에 의해 유량과 마찰계수를 함수로 하는 멱함수 형의 식으로 유도하였다.

## II. 이론적 배경

충적하천에서 전단응력은 흐름과 이에 접하는 하상 및 제방을 구성하고 있는 경계층 사이에서 발생하는 마찰에 의한 상호작용에 의해 발생되며, 이는 하상면에 의한 마찰(skin friction)과 하상형에 의한 마찰(bed-form friction)로 구성된다[1]. 저항계수는 크게 Darcy-Weisbach 마찰계수  $f$ 와 Manning의 조도계수  $n$ 으로 대별하며, 이들 계수는 Chézy 평균유속계수  $C$ 와 편리하게 변환하여 다음과 같이 사용된다 [19][20].

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

여기서  $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 인 전단속도이고,  $V$ =평균유속이며,  $R_h$ =동수반경,  $g$ =중력가속도,  $\rho$ =물의 밀도이다.

수로내의 마찰계수와 조도계수에 대한 관계식은 수많은 연구가 하상재료와 식생자료를 대상으로 수행되었으며, 그 중 주요한 자연하천의 연구자로는 Meyer-Peter and Müller[25], Lane and Carlson[21], Henderson[15], Griffiths[14], Jobson and Froehlich[18], Freeman et al.[12]이 있다[2]. 또한 식생하천의 저항계수에 대한 연구자는 Bray[6], Coon[10] 등이 있다. 이들 저항계수의 경험적인 결정방법에는 Manning 조도계수표 이용방법, 사진 이용방법, ASCE 방법, 직접 측정방법, USGS 방법 등 여러 가지가 있다[3].

## III. 자료구성과 분석

본 연구에 사용된 [표 1]의 자료 중 Hicks와 Mason[16]은 뉴질랜드 내 78개 하천의 조도계수 결정하였다. 그중하나를 예를 들면, 그는 연구자료에서 Waipaoa 강은 하천 유역면적이 1,582km<sup>2</sup>이고, 이 지점

을 1972년부터 1998년까지 관측점으로 사용하였으며, 만제유량은 1,070m<sup>3</sup>/s, 평수량은 34.2m<sup>3</sup>/s, 하상은 가는 자갈과 실트로 구성되었다. 또한, Coon [10]은 미국 New York의 20개 하천에서 식생제방의 조도계수 평가 중의 하나인 Chenango 강을 대상으로 유역면적 1,483 mi<sup>2</sup>이고, 최대유량 24,000-5,000ft<sup>3</sup>/s까지 분포하며, 하상은 조약돌, d<sub>50</sub>은 0.37ft, 좌우측 제방은 경사가 급하고 낮은 부분에 초본, 관목, 적은 수의 교목들이 산재해 있다는 등의 내용을 기록하고 있어 이들 자료에서 본 연구에 필요한 자료를 선택적으로 취득하였다.

### 1. 자료구성

본 연구는 문헌[2]로 기 발표할 때에 사용했던 현장 실측 자료인 모래, 자갈, 조약돌, 호박돌로 구성된 1,865개 자연하천의 하상재료 외에 초본, 관목, 교목으로 구성된 739개 식생하천의 식생자료를 추가해 2,604개 자료로 재구성하였다. 이들 추가된 식생하천의 식생자료는 자연하천 자료와 함께 하천별로 유량, 마찰경사, 중앙입경, 평균유속 및 수심에 대한 최소값과 최대값의 범위를 [표 1]과 같이 제시하였다.

표 1. 본 연구에 사용된 자료의 분포범위

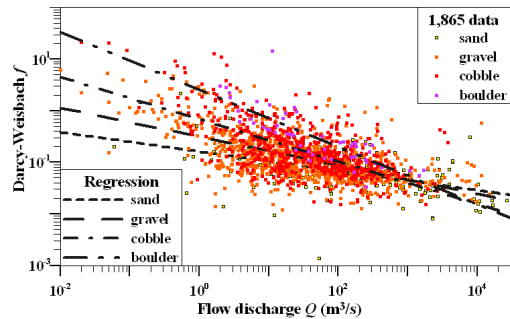
자료	구분	수	유량 Q(m <sup>3</sup> /s)	마찰경사 S(-)	중앙입경 d <sub>50</sub> (mm)	유속 V(m/s)	수심 h(m)
자연하천	모래	172	0.14-26,560	0.00010-0.02860	0.01-1.64	0.02-3.64	0.10-15.67
	자갈	989	0.01-14,998	0.00009-0.08100	2-63.6	0.04-4.70	0.04-11.15
	조약돌	651	0.02-3,820	0.00001-0.05080	64-253	0.07-4.29	0.10-6.94
	호박돌	53	2.00-1,700	0.02060-0.03730	263-945	0.32-5.11	0.28-4.09
	소계	1,865	0.01-26,560	0.00001-0.08100	0.01-945	0.02-5.11	0.04-15.67
식생하천	초본	281	0.01-750	0.00007-0.01790	0.33-304.8	0.06-3.66	0.16-3.96
	관목	150	0.38-542	0.00001-0.03400	16-893	0.1-3.64	0.04-3.08
	교목	308	0.02-3,220	0.00010-0.04050	0.17-397	0.07-5.11	0.10-9.17
	소계	739	0.01-3,220	0.00001-0.04050	0.17-893	0.06-5.11	0.04-9.17
계	2,604	0.01-26,560	0.00001-0.08100	0.01-945	0.02-5.11	0.04-15.67	

### 2. 자료분석

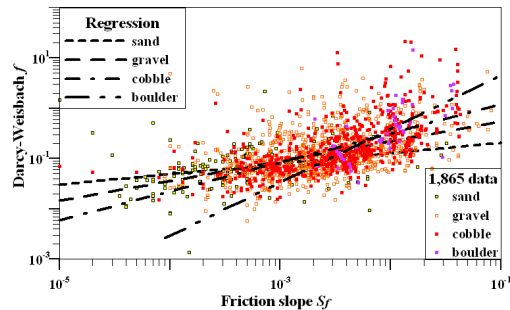
본 연구는 Darcy-Weisbach 마찰계수  $f$ 와 Manning 조도계수  $n$ 의 분포범위를 제시하고, 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멱함수 형의 저항계수 관계식을 유도하였다. 이들 분석에는 대상자료의 상위 1%인 최소값과 100%인 최대값은 맨 아래와 위에 수평선으로 표시되고, 가운데 상자 위와 아래 부분은 상위 25%와 75% 및 상자 안의 수평선은 중앙값을 나타내는 Box-Whisker 분석이 사용되었다.

#### 2.1 자연하천의 저항계수

[그림 1(a)]와 [그림 1(b)]는 자연하천의 Darcy-Weisbach 마찰계수 관계식을 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멱함수 형을 구성자료별로 유도한 결과이다. 또한 [그림 2(a)]와 [그림 2(b)]는 자연하천의 Manning 조도계수 관계식을 구성자료별로 유도한 결과이다.



(a) 유량과 마찰계수



(b) 마찰경사와 마찰계수

그림 1. 자연하천의 Darcy-Weisbach 마찰계수 관계식

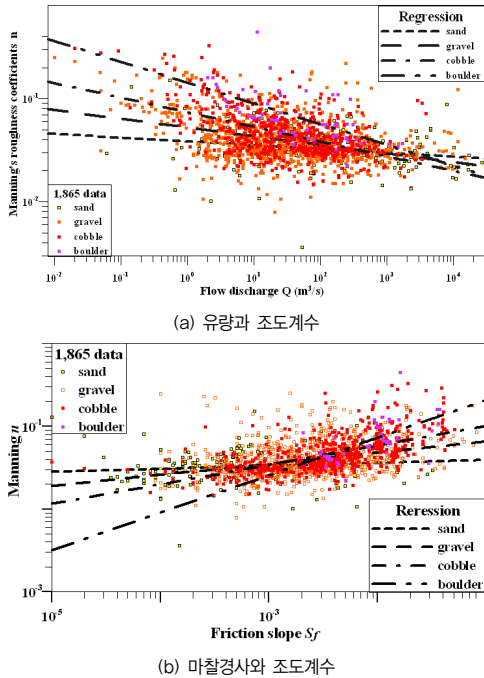


그림 2. 자연하천의 Manning 조도계수 관계식

자연하천에서 Darcy-Weisbach의 마찰계수와 Manning의 조도계수 관계식은 유량  $Q(m^3/s)$ 와 마찰경사  $S_f$ 를 함수로 모래, 자갈, 조약돌 및 호박돌 자료별로 [표 2]와 같이 유도되었다.

표 2. 자연하천에서 유도된 저항계수 관계식

자료 범위	저항계수 관계식	번호
모래 $Q=2.0-1,700m^3/s$ $S_f=0.00001-0.0810$	Darcy-Weisbach $f_{bou} = 2.56 Q^{-0.56} (R^2=0.66)$	(2a)
	Darcy-Weisbach $f_{bou} = 51.60 S_f^{1.06} (R^2=0.46)$	(2b)
	Manning $n_{bou} = 0.14 Q^{-0.20} (R^2=0.40)$	(2c)
	Manning $n_{bou} = 0.59 S_f^{0.45} (R^2=0.39)$	(2d)
조약돌 $Q=0.02-3,820m^3/s$ $S_f=0.00001-0.0508$	Darcy-Weisbach $f_{cob} = 0.68 Q^{-0.41} (R^2=0.42)$	(3a)
	Darcy-Weisbach $f_{cob} = 4.48 S_f^{0.58} (R^2=0.41)$	(3b)
	Manning $n_{cob} = 0.07 Q^{-0.14} (R^2=0.27)$	(3c)
	Manning $n_{cob} = 0.17 S_f^{0.23} (R^2=0.36)$	(3d)
자갈 $Q=0.01-14,998m^3/s$ $S_f=0.00009-0.0810$	Darcy-Weisbach $f_{gra} = 0.31 Q^{-0.28} (R^2=0.36)$	(4a)
	Darcy-Weisbach $f_{gra} = 1.33 S_f^{0.39} (R^2=0.20)$	(4b)
	Manning $n_{gra} = 0.05 Q^{-0.08} (R^2=0.15)$	(4c)
	Manning $n_{gra} = 0.09 S_f^{0.13} (R^2=0.11)$	(4d)
모래 $Q=0.06-26,560m^3/s$ $S_f=0.0001-0.0320$	Darcy-Weisbach $f_{san} = 0.16 Q^{-0.19} (R^2=0.25)$	(5a)
	Darcy-Weisbach $f_{san} = 0.31 S_f^{0.20} (R^2=0.09)$	(5b)
	Manning $n_{san} = 0.04 Q^{-0.04} (R^2=0.04)$	(5c)
	Manning $n_{san} = 0.04 S_f^{0.04} (R^2=0.01)$	(5d)
비고	유량 또는 마찰경사가 결정된 개략치 저항계수 값은 $R^2 > 0.25$ 인 관계식을 추천한다.	

하상재료별 저항계수 관계식은 [표 2]와 같이 식 (2)-(5)로 유도되었고, 호박돌, 조약돌, 자갈, 모래자료 순으로 입경 크기가 클수록 결정계수는 크게 나타났다. 이는 자료의 분포 범위가 큰 반면에 결정계수는 그리 크지 않아 통계적 측면의 유효성은 낮지만, 모래자료를 제외한 관계식은 실무에서 강수-유출에 의한 계획 홍수량이 결정되었거나 마찰경사가 결정된 예비조사의 저항계수 산정에 유용할 수 있을 것이다.

[표 3]은 자연하천의 하상재료에 대한 마찰계수  $f$ 와 조도계수  $n$ 의 분포범위를 Box-Whisker 분석에 의해 최소치, 최대치, 중앙치 및 평균치로 구분하여 제시하였다.

표 3. 자연하천의 저항계수 분석결과

자료 구분	수	Darcy-Weisbach $f$				Manning $n$			
		최소	최대	중앙	평균	최소	최대	중앙	평균
모래	172	0.011	2.188	0.064	0.115	0.014	0.151	0.031	0.036
자갈	989	0.010	6.121	0.103	0.251	0.011	0.250	0.036	0.045
조약돌	651	0.015	21.462	0.129	0.465	0.015	0.327	0.040	0.051
호박돌	53	0.034	14.592	0.244	0.794	0.023	0.444	0.062	0.080

마찰계수  $f$ 는 172개 모래 자료에서 0.011-2.188, 989개 자갈 자료에서 0.010-6.121, 651개 조약돌 자료에서 0.015-21.462, 53개 호박돌 자료에서 0.034-14.592로 나타났다. 조도계수  $n$ 은 179개 모래자료는 0.014-0.151, 989개 자갈 자료는 0.011-0.250, 651개 조약돌 자료는 0.015-0.327, 53개 호박돌 자료는 0.023-0.444로 나타났다.

### 2.2 식생하천의 저항계수

[그림 3(a)]와 [그림 3(b)]는 식생하천에서 Darcy-Weisbach 마찰계수 관계식을 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멱함수 형태로 구성자료별로 유도한 결과이다. 또한 [그림 4(a)]와 [그림 4(b)]는 식생하천에서 Manning의 조도계수 관계식을 구성자료별로 각각 유도한 결과이다.

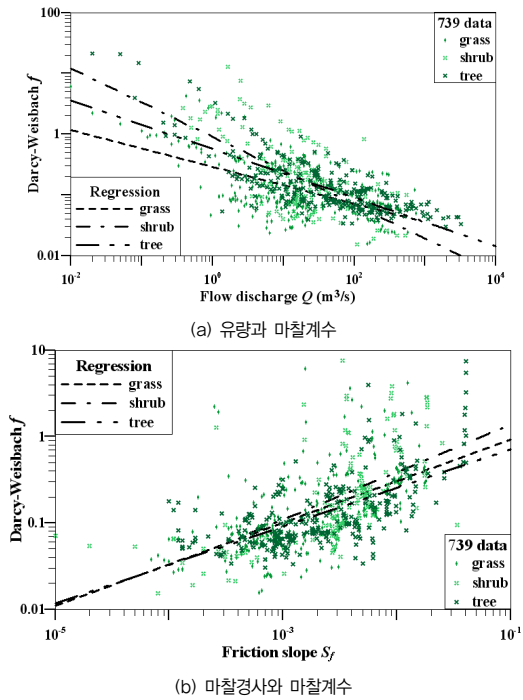


그림 3. 식생하천의 Darcy-Weisbach 마찰계수 관계식

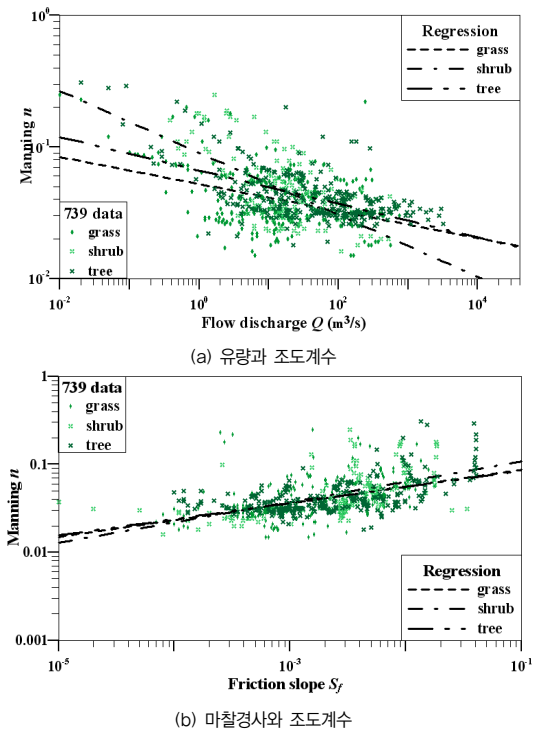


그림 4. 식생하천의 Manning 조도계수 관계식

식생하천에서 Darcy-Weisbach의 마찰계수와 Manning의 조도계수 관계식은 유량  $Q(m^3/s)$ 와 마찰경사  $S_f$ 를 함수로 초본, 관목, 교목자료별로 [표 4]와 같이 유도되었다.

표 4. 식생하천에서 유도된 저항계수 관계식

자료	범위	저항계수 관계식	번호
교목	$Q=0.02-3,220m^3/s$ $S_f=0.0001-0.0405$	Darcy-Weisbach	$f_{tr} = 0.57 Q^{-0.40}$ ( $R^2=0.59$ ) (6a)
		Darcy-Weisbach	$f_{tr} = 1.99 S_f^{0.45}$ ( $R^2=0.41$ ) (6b)
		Manning	$n_{tr} = 0.07 Q^{-0.13}$ ( $R^2=0.33$ ) (6c)
		Manning	$n_{tr} = 0.13 S_f^{0.18}$ ( $R^2=0.31$ ) (6d)
관목	$Q=0.38-542m^3/s$ $S_f=0.00001-0.034$	Darcy-Weisbach	$f_{sh} = 0.91 Q^{-0.56}$ ( $R^2=0.39$ ) (7a)
		Darcy-Weisbach	$f_{sh} = 4.84 S_f^{0.55}$ ( $R^2=0.35$ ) (7b)
		Manning	$n_{sh} = 0.09 Q^{-0.24}$ ( $R^2=0.35$ ) (7c)
		Manning	$n_{sh} = 0.18 S_f^{0.23}$ ( $R^2=0.30$ ) (7d)
초본	$Q=0.01-750.48m^3/s$ $S_f=0.00007-0.0179$	Darcy-Weisbach	$f_{gr} = 0.29 Q^{-0.30}$ ( $R^2=0.36$ ) (8a)
		Darcy-Weisbach	$f_{gr} = 2.80 S_f^{0.48}$ ( $R^2=0.32$ ) (8b)
		Manning	$n_{gr} = 0.05 Q^{-0.10}$ ( $R^2=0.17$ ) (8c)
		Manning	$n_{gr} = 0.13 S_f^{0.19}$ ( $R^2=0.23$ ) (8d)
비고	유량 또는 마찰경사가 결정된 개략치 저항계수 값은 $R^2 > 0.25$ 인 관계식을 추천한다.		

식생재료별 저항계수 관계식은 [표 4]와 같이 식 (6)-(8)로 유도되었고, 교목, 관목, 초본 순으로 수종의 크기가 작을수록 결정계수는 작게 나타났다. 이는 자료의 분포 범위가 큰 반면에 결정계수가 작아 통계적 측면의 유효성은 크지 않으나, 수공실무에서 강수-유출에 의한 계획 홍수량이 산정된 경우, 수로경사 또는 마찰경사가 결정된 예비조사의 저항계수 산정에 활용할 수 있을 것이다.

[표 5]는 식생하천의 식생자료에 대한 마찰계수  $f$ 와 조도계수  $n$ 에 대한 분포범위를 Box-Whisker 분석에 의해 최소치, 최대치, 중앙치 및 평균치로 구분하여 제시하였다.

표 5. 식생하천의 저항계수 분석결과

자료	구분 수	Darcy-Weisbach f				Manning n			
		최소	최대	중앙	평균	최소	최대	중앙	평균
초본	281	0.016	6.121	0.097	0.271	0.015	0.250	0.034	0.045
관목	150	0.015	12.910	0.155	0.580	0.016	0.250	0.042	0.057
교목	308	0.030	21.462	0.102	0.434	0.018	0.310	0.037	0.047

마찰계수  $f$ 는 281개 초본 자료는 0.016-6.121, 150개 관목 자료는 0.015-12.910, 308개 교목 자료는 0.030-21.462로 나타났다. 조도계수  $n$ 은 281개 초본 자료는 0.015-0.250, 150개 관목 자료는 0.016-0.250, 308개 교목 자료는 0.018-0.310으로 나타났다.

### 2.3 저항계수 분석

[표 6]은 본 연구에 사용된 모래, 자갈, 조약돌, 호박돌 자료로 구성된 자연하천 하상자료와 초본, 관목, 교목으로 구성된 식생하천 식생자료의 저항계수분석결과이다.

표 6. 자연하천과 식생하천의 저항계수분포

하천	자료		Darcy-Weisbach $f$			Manning $n$		
	구분	수	최소	평균	최대	최소	평균	최대
자연하천	모래	172	0.011	0.115	2.188	0.014	0.036	0.151
	자갈	989	0.010	0.251	6.121	0.011	0.045	0.250
	조약돌	651	0.015	0.465	21.462	0.015	0.051	0.327
	호박돌	53	0.034	0.794	14.592	0.023	0.080	0.444
식생하천	초본	281	0.016	0.271	6.121	0.015	0.045	0.250
	관목	150	0.015	0.580	12.910	0.016	0.057	0.250
	교목	308	0.030	0.434	21.462	0.018	0.047	0.310

Box-Whisker 분석에 의해 제시된 이들 Darcy-Weisbach 마찰계수  $f$ 와 Manning 조도계수  $n$ 은 실무에 적용 시 평균값을 선정하면 적절할 것이다.

## IV. 결론

본 연구는 모래, 자갈, 조약돌, 호박돌로 구성된 자연하천 하상재료와 초본, 관목, 교목으로 구성된 식생하천 식생자료의 현장 실측자료들을 대상으로 저항계수 분석 및 그 관계식을 유도한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Darcy-Weisbach 마찰계수 값은 자연하천의 172개 모래자료는 0.011-2.188, 989개 자갈자료는 0.010-6.121, 651개 조약돌자료는 0.015-21.462, 53개 호박돌 자료는 0.034-14.592로, 식생하천의 281개 초본자료는 0.016-6.121, 150개 관목자료는

0.015-12.910, 308개 교목자료는 0.030-21.462로 각각 나타났다.

2. Manning 조도계수 값은 자연하천의 172개 모래자료는 0.014-0.151, 989개 자갈자료는 0.011- 0.250, 651개 조약돌 자료는 0.015-0.327, 53개 호박돌 자료는 0.023-0.444로, 식생하천의 281개 초본자료는 0.015-0.250, 150개 관목자료는 0.016- 0.250, 308개 교목자료는 0.018-0.310로 각각 나타났다.
3. 자연하천과 식생하천에서 마찰계수  $f$ 와 조도계수  $n$  관계식은 유량과 마찰경사를 함수로 하는 멱함수 형의 회귀 방정식으로 유도되었다. 이들 관계식은 자연하천의 식 (2)-(5), 식생하천의 식 (6)-(8)과 같고, 결정계수가 0.25 이상인 관계식은 계획홍수량 또는 마찰경사가 결정된 예비조사 시 저항계수 산정에 활용할 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- [1] 이종석, *하천공학 및 설계*, 도서출판 새론, p.600, 2010.
- [2] 이종석, “자연하천 현장자료를 이용한 저항계수의 결정”, 대한토목학회 논문집, 제32권, 제2B호, pp.139-147, 2012.
- [3] 이종석, P. Y. Julien, 김재훈, 이태우, “식생하천의 현장자료를 이용한 조도계수 관계식 유도”, 한국수자원학회 논문집, 제45권, 제2호, pp.137-149, 2012.
- [4] W. K. Annable, *Database of morphologic characteristics of watercourse in Southern Ontario*, Ontario, Ministry of Natural Resources, p.212, 1996.
- [5] H. H. Barnes, *Roughness characteristics of natural channels*, USGS Water-Supply, Paper 1849, Washington, p.213, 1967.
- [6] D. I. Bray and K. S. Davar, “Resistance to flow in gravel-bed rivers,” *CJCE*, Vol.14, No.1, pp.77-86, 1987.

- [7] C. L. Chen, "Flow resistance in broad shallow grassed channels," J. Hydraul Div., Vol.102, No.3, pp.307-322, 1976.
- [8] L. Chen, "Theoretical analyses for interaction between vegetation bending and flow," Conference Proc., Division of Hydrologic Sciences, Desert Research Institute, pp.1443-1450, 2010.
- [9] V. T. Chow, *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [10] W. F. Coon, *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, p.133, 1998.
- [11] W. L. Cowan, "Estimating hydraulic roughness coefficients," Agric. Eng., Vol.37, No.7, pp.473-475, 1956.
- [12] G. E. Freeman, R. R. Copeland, and W. J. Rahmeyer, "Field determination of Manning's n values for shrubs and woody vegetation," Proc. of the Wetlands Engineering River Restoration Conference, ASCE, Denver, Colorado, 1998.
- [13] D. F. Gillen, *Determination of roughness coefficients for streams in West-Central Florida: Tampa, FL*, USGS, Open-File report OFR-96-226, 1996.
- [14] G. A. Griffiths, "Flow resistance in coarse gravel bed rivers," J. Hydraul Div., Vol.107, No.7, pp.899-918, 1981.
- [15] F. M. Henderson, *Open channel flow*, New York, Macmillan, 1966.
- [16] D. M. Hicks and P. D. Mason, *Roughness characteristics of New Zealand rivers*, National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd, New Zealand, p.329, 1998.
- [17] R. D. Arrett, *Determination of roughness coefficients for streams in Colorado*, USGS, WRI Report 85-4004, 1985.
- [18] H. E. Jobson and D. C. Froehlich, *Basic hydraulic principles of open-channel flow*, USGS, Open-File Report 88-707, 1988.
- [19] P. Y. Julien, *River mechanics*, Cambridge University Press, p.434, 2002.
- [20] P. Y. Julien, *Erosion and sedimentation*, 2nd edition, Cambridge University Press, p.371, 2010.
- [21] E. W. Lane and E. J. Carlson, "Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials," Proc. IAHR, 5th Congress, Minneapolis, 1953.
- [22] S. Lang, A. Ladson, B. Anderson, and I. Rutherford, *An Australian handbook of stream roughness coefficients. Stream roughness*, Four case studies from Victoria, AJWR, p.28, 2004.
- [23] J. S. Lee and P. Y. Julien, "Downstream hydraulic geometry of alluvial channels," J. Hydraul Engr., Vol.132, No.12, pp.1347-1352, 2006.
- [24] J. T. Limerinos, *Determination of the Manning coefficient for measured bed toughness in natural channels*, Water Supply paper 1898-B, USGS, Washington D.C., 1970.
- [25] E. Meyer-Peter and R. Müller, "Formulas for bed-load transport," Proc. IAHR, Third Annual Conference, Stockholm, Sweden, pp.39-64, 1948.
- [26] V. Nikora, S. Larned, N. Nikora, K. Debnath, G. Cooper, and M. Reid, "Hydraulic resistance due to aquatic vegetation in small streams: Field study," J. Hydraul Engr., Vol.134, No.9, pp.1326-1332, 2008.
- [27] E. Pasche and G. Rouve, "Overbank flow with vegetatively roughed flood plains," J. Hydraulic Engr., Vol.111, No.9, pp.1262-1278, 1985.
- [28] J. V. Phillips and T. L. Ingersoll, *Verification of*

*roughness coefficients for selected natural and constructed stream channels in Arizona*, USGS, Professional Paper 1584, 1998.

- [29] P. L. Rousseeuw, I. Ruts, and J. W. Tukey, "The bagplot: A bivariate boxplot," *The American Statistician*, Vol.53, No.4, pp.382-387, 1999.
- [30] J. W. Tukey, *Exploratory data analysis*, Addison-Wesley, 1977.
- [31] D. T. Soong, T. M. Halfar, and C. D. Prater, *Estimating Manning's roughness coefficients for natural and man-made streams in Illinois*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2009.
- [32] F. C. Wu, H. W. Shen, and Y. J. Chou, "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation," *J. Hydraul Engr.*, Vol.125, No.9, pp.934-942, 1999.
- [33] B. C. Yen, "Open channel flow resistance," *J. Hydraul Engr.*, Vol.128, No.1, pp.20-39, 2002.

Julien, Y. Pierre(Pirre Y. Julien) 정회원



- 1977년 : Laval University (Quebec, Canada) B.Sc.A. Civil Engineering
  - 1980년 : Laval University M.Sc. Civil Engineering (hydraulics)
  - 1983년 : Laval University (Quebec, Canada) Ph.D. Civil Engineering (hydraulics)
  - 1983년 ~ 현재 : Professor, Colorado State University, Civil and Environmental Engineering
- <관심분야> : Hydraulic Engineering, Sedimentation and Erosion, River Mechanics

저 자 소 개

이 종 석(Jong-Seok Lee) 종신회원



- 1987년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학사)
  - 1995년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학사)
  - 1989년 2월 : 단국대학교 토목공학과(공학박사)
  - 1996년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목공학과 교수
- <관심분야> : 수리·수문, 하천·생태환경