

Salt-dilution 방법을 이용한 산지소하천의 유량과 유속 관계 분석

양현제¹ · 이성재² · 임상준^{1*}

¹서울대학교 산림과학부, ²서울대학교 학슬림

Hydraulic Relation of Discharge and Velocity in Small, Steep Mountain Streams Using the Salt-dilution Method

Hyunje Yang¹, Sung-Jae Lee² and Sangjun Im^{1*}

¹Department of Forest Science, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Seoul National University Forest, Seoul 08826, Korea

요약: 산지하천의 평균유속을 정확하게 추정하는 것은 하천의 수리적 흐름을 이해하고, 사방댐과 같은 사방구조물 최적 설계를 위해 중요하다. 산지하천의 평균 유속에 대한 연구는 부족한 실정이나 최근에는 상대적으로 자료 확보가 용이한 유량 자료를 이용하여 유량과 평균유속의 관계를 파악하는 연구들이 많이 진행되고 있다. 이 연구에서는 8개소의 서로 다른 산지소하천에서 조사된 87회의 유량과 평균 유속 자료를 분석하였다. 산지하천의 유량과 평균유속을 측정하기 위해 salt-dilution 방법을 사용하였으며, 평균유속은 도달 시간의 조화 평균을 적용하여 구하였다. 하천의 거칠기 높이를 이용하여 유량과 유속과의 무차원 관계식을 도출하였다. 거칠기 높이는 하상재료의 D_{50} , D_{84} 와 하상변위의 σ_{pro} , IPR_{90} 를 이용하였으며, σ_{pro} 와 IPR_{90} 의 정확성이 더 높게 나타났다. 일반적으로 유량과 평균 유속은 지수함수 관계를 보였다.

Abstract: Reach-average velocity prediction in steep mountain streams is important for understanding fluvial processes and practical applications of erosion control in mountain streams. little studies have been conducted in reach-average velocity, but hydraulic researches have been carried out to examine the relationship between discharge and reach-average velocity in torrent reaches using a relatively large amount of discharge data. In this study, a total of 87 data were measured in 8 torrent reaches. Salt-dilution method was used to estimate discharge. Reach-average velocity was calculated from harmonic mean of travel time that were measured by salt-dilution technique. In order to explore the hydraulic relation, both discharge and velocity were non-dimensionalized by using D_{50} , D_{84} , σ_{pro} and IPR_{90} . It also indicated that σ_{pro} and IPR_{90} were good variables as roughness height for develop the relationship between non-dimensional discharge and velocity in mountain streams. Generally, reach-average velocity could increase exponentially as discharge increases.

Key words: reach-average velocity, discharge, salt-dilution method, roughness height, dimensionless analysis

서론

산지하천의 흐름유속은 하천의 수리적 특성을 결정하는 요소이며, 하천을 따라 하류로 이송되는 오염물질을 추적 하거나(Rossman, 1990), 사방댐 등 사방구조물의 수리적


설계에 사용된다(Eu et al., 2017; Ferguson, 2007; Schneider et al., 2015). 1890년 Manning 공식이 개발된 이후에 하도 경사가 상대적으로 완만한 중·대형 하천의 유속을 산정하기 위한 연구가 많이 시도되었으나 산지하천에 대해서는 제한적으로 연구가 이루어져 왔다(Yochum et al., 2012). 하도경사가 급한 산지하천은 국부적 난류흐름이 지배적이고, 거석(boulder)이나 유목(large woody debris)이 많아 사류(supercritical flow)와 상류(subcritical flow) 흐름이 교차로 발생하여 에너지 손실이 많고, 이로 인해 수리적 흐름특성의 파악이 어렵기 때문이다(Ferguson, 2007; Lenzi et al., 2004).

* Corresponding author

E-mail: junie@snu.ac.kr

ORCID

Sangjun Im  <https://orcid.org/0000-0003-3782-9288>

Hyunje Yang  <https://orcid.org/0000-0001-7686-3206>

하천의 유속은 수심 기반의 경험적인 방법을 많이 이용한다. Chezy 공식, Manning 공식과 Darcy-Weisbach 공식 등이 여기에 속하며(Bjerklie et al., 2005), 등류 흐름(uniform flow) 조건에 잘 적용되며 레이놀즈수가 큰 난류 흐름에서는 적용에 있어 한계를 가진다. 산지하천은 하도형상의 변화가 불규칙적이고 유속이 국부적으로 심하게 변하기 때문에 난류 흐름이 지배적이며, 하천 구간을 따라 유속이 달라지기 때문에 특정지점의 점(point) 유속보다는 구간 평균(reach-averaged) 유속이 더욱 더 중요하다.

유속계를 이용하여 일정구간의 평균유속을 산정하기는 현실적으로 어려우며, 최근에는 상대적으로 자료를 얻기 용이한 유량자료를 이용하여 하천구간의 평균유속을 추정한다(Ferguson, 2010; Zimmermann, 2010). 이를 위하여 하천의 수리적 특성으로부터 유량과 유속과의 관계를 분석하고(Schneider et al., 2015; Yochum et al., 2010), 일반화하여 유량과 평균유속 간의 무차원 관계식을 도출한다(Nitsche et al., 2012; Rickenmann and Recking, 2011; Schneider et al., 2015; Yochum et al., 2012).

거칠기 높이는 유량과 유속과의 관계를 설명하는 가장 중요한 변수이며, 다양한 방법을 이용하여 표현한다. Aberle and Smart(2003)와 Ferguson(2007)는 하상재료 크기의 84분위 수(D_{84}), Aberle and Smart(2003)는 하상변위의 표준편차(Standard Deviation of de-trended elevation, σ_{pro})를 이용하여 거칠기 높이를 나타내었다. Rickenmann(1990)은 D_{90} 으로부터 거칠기 높이를 추정하였으며, Schneider et al.(2015)는 하상변위의 90% 백분위 범위인 IPR_{90} 과 중간분산도(semi-variogram)의 sill, D_{84} , σ_{pro} 를 유속 추정의 거칠기 높이로 사용하였다. 거칠기 높이는 하천의 지형적·수리적 특성에 따라 서로 다른 변수가 이용되고 추정방법도 다르기 때문에, 우리나라 산지하천의 특성에 적합한 거칠기 높이 변수를 도입하는 것이 필요하다.

하천의 흐름관계를 파악하기 위해서는 유량과 평균유속을 현장계측 하여야 한다. 산지하천의 유량과 평균 유속을 측정하기 위해 추적자(tracer)를 이용하는 방법을 널리 사용

하고 있으며(Merz and Doppmann, 2006), 추적자로는 소금(NaCl)이 많이 이용된다. 유속계(current meter)에 의한 유속 측정은 산지하천과 같이 유속의 국부 변위가 심하고 난류가 발달된 곳에서는 적용하기 어렵다(Yang et al., 2016). 추적자를 이용한 방법(tracer-dilution method)은 조사자가 직접 접근하기 어려운 환경에서도 유량이나 유속 측정이 가능하다. 그리고 데이터 분석이 비교적 간단하며, 흐름의 난류 성분이 크게 나타나는 산지계류에 적합하다(Merz and Doppmann, 2006).

이 연구는 salt-dilution 방법을 사용하여 8개소의 서로 다른 산지하천의 유량과 평균유속을 현장조사하고, 수리적 특성을 이용하여 유량과 평균유속의 관계를 분석하기 위해 수행되었다. 또한, 선행연구와의 비교를 통해 이 연구의 타당성과 현장적용 가능성을 분석하였다.

재료 및 방법

1. 산지소하천의 선정

산지하천의 평균 유속을 산정하기 위하여 서울대학교 교내에 있는 우수배수로 2개소, 서울대학교 태화산학술림 내 산지소하천 5개소, 서울대학교 남부학술림 내 산지소하천 1개소 등 총 8개소의 산지소하천을 선정하였다(Table 1). 현장조사를 위하여 조사구간에 걸쳐 황유입이 없고 유량이 일정하며, 분지 혹은 합류점이 없는 단일하천 구간을 선정하였다. 서울대학교 우수배수로(SNU)는 배후 유역의 강우유출량을 배제하는 자연배수로이며, 태화산학술림 산지소하천(TH)은 최하류 유역면적이 379 ha이고, 유역구간의 표고는 190~615 m이었으며, 백운산학술림(BU)의 조사지점은 상류 유역면적이 293 ha, 유역의 최고 고도점의 높이는 1,126 m로 조사되었다.

연구대상지로 선정된 산지소하천의 수리적 특성은 Table 2와 같다. 전체 8개소의 산지소하천은 유로 흐름특성에 따라 cascade 유형, riffle 유형, step-pool 유형으로 분류하였다. 남부학술림 산지소하천(BU-1)은 cascade 유형으로 분류되었으며, 서울대학교 내 우수배수로(SNU-2)는 riffle 수로

Table 1. Characteristics of selected mountain streams.

Location	Abbreviation	Numb. of study reach	Basin area (km ²)	Basin elevation range (m)	Mean annual precipitation ^b (mm)
Seoul National University	SNU	2	- ^a	- ^a	1333
Baekun san SNU Forests ^c	BU	1	2.93	759~1126	2113
Taehwa san SNU Forests ^c	TH	5	3.79	190~615	1274

^a SNU reach is naturalization channel whose water is coming from Gwan-ak mountain flows artificially.

^b Calculated from recent 10-years data.

^c These forest are managed by Seoul National University Forest.

Table 2. Hydraulic characteristics of selected stream reaches.

Parameter	Symbol	SNU-1	SNU-2	BU-1	TH-1	TH-2	TH-3	TH-4	TH-5
Channel type	-	step-pool	riffle	cascade	step-pool	step-pool	step-pool	step-pool	step-pool
Reach length(m)	Lr	23.8	17.4	16.6	35.9	32.1	32.7	34.2	59.7
Height differences(m)	Hr	2.45	0.82	4.41	4.20	2.33	3.22	2.59	3.99
Channel slope(m m ⁻¹)	S	0.11	0.05	0.26	0.12	0.07	0.10	0.07	0.07
Grain size dispersion ^a (m)	σ_g	0.02	0.02	0.08	0.14	0.11	0.07	0.09	0.12
Number of steps(-)	n	11	-	10	7	5	8	8	12

^a Standard deviation of the grain size distribution.

유형이었고, 그 외 산지소하천은 모두 step-pool 특성을 보였다. 하도경사는 5~26%의 범위를 보였으며, 현장조사 및 유량 조사는 16.6~59.7 m의 하천구간에서 진행되었다.

2. 물리적 특성인자 조사

산지소하천의 유속은 하상재료의 마찰저항과 하도형상으로 인한 흐름저항에 의해 영향을 받는다. 하상을 구성하는 물질의 물리적 특성을 파악하기 위하여 Wolman pebble count 방법(Wolman, 1954)을 이용하였다. Pebble count 방법은 하상재료의 중간축(intermediate axis)크기를 무작위로 측정하여 하상재료의 크기 분포를 측정하는 방법이다.

산지하천의 종단 기울기를 조사하기 위하여 하천을 따라 종단측량을 실시하였다. 태화산 학술림 산지하천은 0.3 m 간격으로 측정하였으며, 기타 산지소하천은 0.2 m 간격으로 하류에서 상류로 진행하면서 종단측량을 실시하였다.

3. Salt-dilution 방법

산지하천의 유량 측정은 추적자 방법(tracer-dilution)의 하나인 salt-dilution 방법을 사용하였다. 유량 측정을 위한 추적자로 로다민(rhodamine)과 플루오레세인 나트륨(fluorescein sodium) 등의 형광물질이나 소금이 널리 이용된다. 형광물질은 물 속에서 일정 시간동안 유지되고 소량의 물질도 측정가능하기 때문에 긴 하천구간의 유량측정에 많이 이용된다. 그러나 햇빛 반사에 의해 형광물질의 광도가 왜곡될 수 있으며, 일부 물질은 유전적 변이를 일으킬 수 있는 독성물질을 내포하고 있기 때문에 자연상태의 하천에서는 사용에 주의하여야 한다(Yochum, 2010). 또한, 형광물질이 상대적으로 비싸고 정밀한 측정장비를 사용하기 때문에 현장조사에 많은 비용이 요구된다. 소금추적자는 가격이 저렴하고 주변에서 쉽게 구할 수 있으며, 소금이 수생태계에 미치는 영향은 크지 않아 소규모 산지하천의 유량 측정에 널리 이용된다(Moore, 2004). 이 연구에서 유량 측정에 사용된 소금의 최대농도는 200 mg L⁻¹로, 미국 환경

보호청(US EPA)의 하천사용기준(<400 mg L⁻¹)에 따라 적은 양을 사용하였다.

Salt-dilution 방법은 흐르는 물 속에 녹아있는 소금농도를 이용하여 물의 통과유량이나 이동속도를 산정하는 방법이다(Merz and Doppmann, 2006). 유량은 하천의 상류에서 일정량의 소금물을 투입한 후에 정해진 거리에 위치한 하류지점에 도달하는 소금농도를 측정하여 식 1로부터 구한다. 소금의 농도는 전기전도도(EC)를 이용하여 측정하였으며, 전기전도도 측정은 Hydrolab Series의 MS5를 사용하였다.

$$Q = \frac{M_s}{K \cdot \int_0^{\infty} (C_t - C_0) dt} \quad (1)$$

여기서, Q는 유량(L s⁻¹)이며, M_s는 투하된 소금의 양(g), K는 조정계수(g L⁻¹/μS cm⁻¹), C_t는 t시간 이후의 전기전도도(μS cm⁻¹), C₀는 자연상태의 하천이 가지고 있는 전기전도도(μS cm⁻¹)이다.

Salt-dilution 방법을 이용하여 하천의 구간 평균유속을 산정하였다. 조사구간의 평균유속은 구간의 길이를 소금이 이동하는 데 걸리는 도달시간의 조화평균(harmonic mean) 값을 이용하여 산정하였다. 조화평균은 평균치 산정방법 중에서 통계적으로 가장 안정적이며(Yochum, 2010), 측정치의 분포에 상관없는 평균값을 나타낸다(Waldon, 2004). 소금추적자 이동시간의 조화평균(T_{HM})은 다음 식을 이용하여 산정하였다.

$$T_{HM} = \frac{1}{\int_0^{\infty} \frac{1}{t} P_x(t) dt} \quad (2)$$

여기서, t는 소금추적자의 이동시간(s)이며, P_x(t)는 시간에 따른 소금농도의 확률밀도함수이다. T_{HM}은 모든 소금 입자가 일정거리를 이동한 시간에 대한 조화평균을 의미한다.

다. 최종적으로 하천구간의 이동거리를 추적자가 도달한 시간의 조화평균으로 나누어 평균유속을 산정한다. 한편, 확률밀도함수 $P_x(t)$ 는 다음과 같다.

$$P_x(t) = \frac{1}{I_x} c(x,t) \quad (3)$$

여기서, $c(x,t)$ 는 시간에 따른 소금농도의 변화곡선을 나타낸다. I_x 는 시간에 따른 $c(x,t)$ 의 적분합을 의미하며, 아래 식을 이용하여 구한다.

$$I_x = \int_{t=0}^{\infty} c(x,t) dt \quad (4)$$

4. 평균 유속-유량 관계식의 추정

수리학적으로 평균 유속과 유량은 아래 식과 같이 지수적인 관계를 가진다(Aberle and Smart, 2003).

$$v = c_1 Q^m \quad (5)$$

위 식에서 c_1 , m 은 경험상수, v 는 유속($m s^{-1}$)이며, Q 는 유량($m^3 s^{-1}$)이다.

식 5는 일반적으로 하천에서 나타나는 유량과 유속 간의 관계를 나타낸다. c_1 과 m 은 하천의 형상, 하도경사, 유역면적 등에 따라 결정되는 변수로서, 하천의 흐름 특성을 표현한다.

한편, 하천의 수리적 흐름특성을 일반화하여 평균 유속과 유량과의 관계를 나타내기 위하여 무차원 접근법이 이용된다. 이는 각 하천에서 조사된 유속과 유량을 무차원화시켜 하천의 수리학적 크기에 따른 영향을 배제하고 일반화된 평균 유속-유량 관계식을 도출하는 방법이다(Comiti et al., 2007; Ferguson, 2007; Rickenmann, 1990). 이때 중력 가속도 (g , $9.81 m s^{-2}$), 거칠기 높이(k , m), 하천의 경사(S , m/m)와 하도의 평균 폭(w , m)을 이용하여 무차원 유속 ($v^{**} = v / \sqrt{gkS}$)과 무차원 유량($q^{**} = (Q/w) / \sqrt{gk^3S}$)을 산정한다.

산지하천의 흐름은 흐름단면의 형태, 하도의 종단변위, Reynolds 수, 거칠기 높이, 수심, 하상경사 등에 많은 영향을 받는다(Rouse, 1965). 선행연구에서는 유속에 영향력이 큰 거칠기 높이, 하도경사를 이용하여 유량과의 무차원 관계식을 많이 유도하였다(Curran and Wohl, 2003; Lee and Ferguson, 2002; Rickenmann and Recking, 2011; Smart et al., 2002; Yochum et al., 2012). 따라서, 이 연구는 거칠기 높이와 하도경사를 이용하여 무차원 관계식을 도출하였다.

결과 및 고찰

1. 평균 유속-유량 관계 분석

연구대상 8개 산지소하천의 유속-유량 관계는 Table 3과 같다. Table 3에서 평균 유속과 유량은 연구대상 소하천의 조사구간에서 salt-dilution 방법을 이용하여 산정하였다. 전체적으로 유량이 증가함에 따라서 평균 유속이 멱함수의 형태($r^2 > 0.97$)로 증가하였다. 평균 유속과 유량 간의 관계식에서 상수(c_1)은 0.88~6.71의 범위를 보이고 있으며, 지수 상수(m)는 0.58~0.75의 범위를 나타내었다. Table 3에서 평균 유속-유량 관계식의 경험상수인 c_1 , m 은 산지하천의 물리적, 지형적 특성에 따라 결정되는 하천의 흐름 특성치이다. Figure 1은 산지소하천 8개소의 평균 유속-유량 관계를 도시하여 나타낸 것이다.

Table 3. Discharge-mean velocity relationship of selected study reaches.

Study Reach	Mean Velocity-Discharge Relationship ($V = c_1 Q^m$)
SNU-1	$V = 3.79 Q^{0.58}$
SNU-2	$V = 5.68 Q^{0.60}$
BU-1	$V = 6.71 Q^{0.75}$
TH-1	$V = 1.13 Q^{0.59}$
TH-2	$V = 1.74 Q^{0.67}$
TH-3	$V = 1.37 Q^{0.66}$
TH-4	$V = 0.88 Q^{0.59}$
TH-5	$V = 1.07 Q^{0.65}$

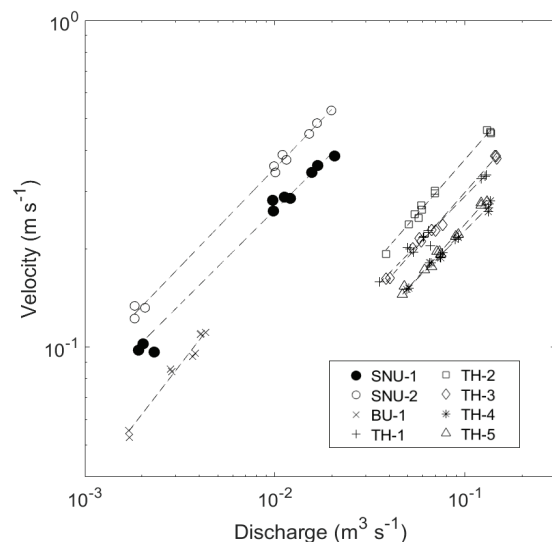


Figure 1. Relation between velocity and discharge in 8 selected stream reaches; velocity increased as discharge increased in all site and velocity-discharge relation can explain by power function.

2. 평균 유속-유량의 무차원 관계식 산정

산지하천의 거칠기 높이를 이용하여 평균 유속과 유량 간의 무차원 관계식을 추정하였다. 거칠기 높이로는 하천 바닥의 마찰 특성을 나타내는 50분위와 84분위 하상재료 크기(D₅₀, D₈₄)와 하상변위의 표준편차(σ_{pro}), 하상변위의 90% 백분위차(IPR₉₀)를 이용하였다. 산지소하천의 거칠기 높이 변수는 Table 4와 같다. 서울대학교 교내 우수배수로 (SNU-1, 2)에는 작은 조약돌(small cobble)이 하천 바닥에 놓여 있으며, TH-2와 TH-3 산지소하천은 큰 조약돌(large cobble)이 많고, 그 외 조사하천 매우 큰 조약돌(very large cobble)이 많았다. Table 4와 같이 σ_{pro} 는 0.03-0.19 m의 범위를 보였으며, TH-1의 하상변위가 가장 큰 폭으로 변화하였다. IPR₉₀는 전체 산지소하천에 대해 0.07-0.13 m의 범위를 가졌다.

Table 4의 거칠기 높이 변수를 이용하여 유속과 유량을 무차원화하여 비교하였으며, 그 결과는 Table 5와 같다. 무차원 관계식은 잔차의 비중을 균등하게 하도록 비선형 회귀분석이 아닌 데이터를 선형화시킨 후 선형 함수를 이용하여 추정하였다. Table 5와 같이 무차원 유량과 유속은

뚜렷한 지수함수적 관계를 보였으며, 무차원 유량이 증가함에 따라서 무차원 유속이 급격히 증가하였다.

하천구간별 무차원 관계식의 r^2 값은 0.97~1.00로 매우 높은 설명력을 보였다. 또한 평균 제곱근 오차(RMSE)는 모두 0.09 이하의 값을 가지며, 작은 σ_{pro} 값 때문에 상대적으로 큰 q^{**} 값이 계산되어 RMSE가 크게 계산된 SNU-2를 제외하면 RMSE의 범위는 0.05 이하로 오차의 크기가 매우 작았다(Table 3). 하천구간별로 관계식에 따른 오차 차이는 존재하였으며, 거칠기 높이로 IPR₉₀을 사용하는 경우 가장 설명력이 높았다(Figure 2). D₅₀을 사용한 경우 r^2 가 0.65로 가장 낮은 설명력을 보였고, D₈₄는 0.88, σ_{pro} 는 0.96 그리고 IPR₉₀는 0.98로 가장 높은 설명력을 보였다. 하상재료 크기를 나타내는 D₅₀, D₈₄보다 하도 종단변위를 의미하는 σ_{pro} 또는 IPR₉₀을 적용하는 것이 v^{**} 와 q^{**} 의 관계를 더 잘 설명하였다. 이는 우리나라와 같은 소규모 산지하천에서는 하천 형상이 하상재료보다 흐름에 더 많은 영향을 주는 것을 의미한다. 결과적으로 거칠기 높이로 IPR₉₀을 사용하는 것이 가장 적절하며, 다음과 같은 유량과 평균유속의 관계식을 도출하였다.

Table 4. Estimated roughness heights of selected stream reaches.

Parameter	Symbol	SNU-1	SNU-2	BU-1	TH-1	TH-2	TH-3	TH-4	TH-5
D50 ^a (m)	D ₅₀	0.06	0.07	0.13	0.11	0.09	0.07	0.13	0.11
D84 ^b (m)	D ₈₄	0.08	0.09	0.20	0.26	0.15	0.15	0.22	0.23
STDEV. of elevation ^c (m)	σ_{pro}	0.13	0.03	0.15	0.19	0.12	0.16	0.14	0.18
IPR90 ^d (m)	IPR ₉₀	0.07	0.07	0.13	0.11	0.09	0.07	0.13	0.11

^a 50th percentile of the grain size.

^b 84th percentile of the grain size.

^c Standard deviation of the de-trended elevation.

^d 90% Inter percentile range of the de-trended elevation (95th percentile minus 5th percentile of the de-trended elevation).

Table 5. Dimensionless hydraulic geometry regression coefficients($v^{**} = cq^{**m}$) by using different roughness heights.

reach	n ^a	D50				D84				σ_{pro}				IPR90			
		c	m	r^2	RMSE ^b	c	m	r^2	RMSE ^b	c	m	r^2	RMSE ^b	c	m	r^2	RMSE ^b
Total	87	0.87	0.65	0.65	0.35	1.19	0.71	0.88	0.19	0.98	0.58	0.96	0.19	1.66	0.63	0.98	0.08
SNU-1	10	1.05	0.58	0.99	0.04	1.15	0.58	0.99	0.04	1.36	0.58	0.99	0.03	2.11	0.58	0.99	0.02
SNU-2	10	1.54	0.60	1.00	0.05	1.67	0.60	1.00	0.05	1.03	0.60	1.00	0.09	1.62	0.60	1.00	0.05
BU-1	9	1.08	0.75	0.97	0.01	0.41	0.75	0.97	0.01	1.15	0.75	0.97	0.01	2.42	0.75	0.97	0.00
TH-1	12	0.75	0.59	0.98	0.02	1.00	0.59	0.98	0.01	0.90	0.59	0.98	0.02	1.39	0.59	0.98	0.01
TH-2	11	1.02	0.67	0.99	0.03	1.29	0.67	0.99	0.03	1.17	0.67	0.99	0.03	2.25	0.67	0.99	0.02
TH-3	11	0.66	0.66	0.99	0.03	0.93	0.66	0.99	0.02	0.97	0.66	0.99	0.02	1.75	0.66	0.99	0.01
TH-4	12	0.73	0.59	0.99	0.01	0.90	0.59	0.99	0.01	0.75	0.59	0.99	0.01	1.19	0.59	0.99	0.01
TH-5	12	0.62	0.65	0.99	0.02	0.89	0.65	0.99	0.01	0.79	0.65	0.99	0.01	1.39	0.65	0.99	0.01

^a n=number of data

^b RMSE=Root Mean Square Error.

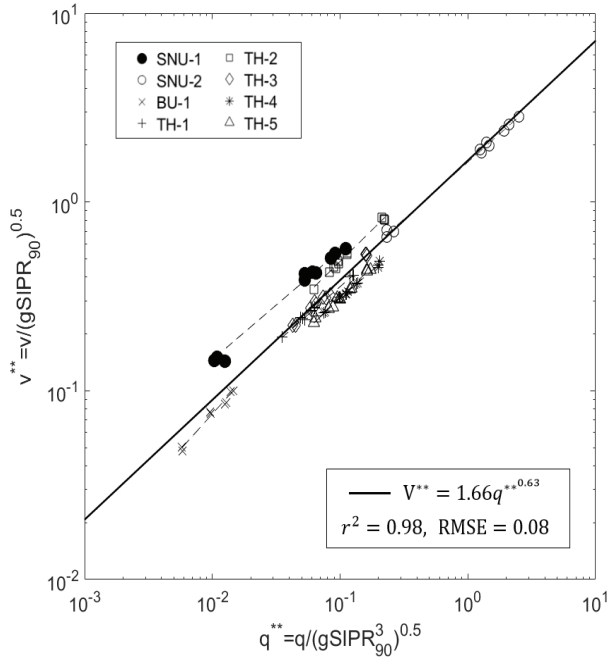


Figure 2. Dimensionless hydraulic geometry relation by using IPR_{90} as roughness height; dimensionless discharge and velocity collapse well and can explain between-site relation by a power function.

$$v^{**} = 1.66q^{**0.63}, k = IPR_{90} \quad (6)$$

또한 식 6을 통해 얻어진 유량과 평균유속의 관계식은 다음과 같다.

$$v = 1.66g^{0.19}q^{0.63}IPR_{90}^{-0.45}S^{0.19} \quad (7)$$

3. 선행 연구와의 비교

Rickenmann and Recking(2011)는 2,890개의 현장 자료를 통해 거칠기 높이로 D_{84} 를 사용하여 유량과 유속의 관계를 분석하였다. 이 연구에 의하면 유속과 유량의 무차원 관계식에서 $0.54 \leq c \leq 0.72$, $0.62 \leq m \leq 0.71$ 의 범위를 보였다. 동일한 거칠기 높이 변수를 적용한 이 연구에서 $c=1.19$, $m=0.71$ 로 추정되어, 두 연구결과 간에 차이가 있었으며, 거칠기 높이 변수로 D_{50} 를 사용한 무차원 분석은 거의 없었다.

Schneider et al.(2015)과 Yochum et al.(2012)는 거칠기 높이로 σ_{pro} 를 사용하였다. 이들 연구에 의하면 $c=1.00$, $0.59 \leq m \leq 0.60$ 의 범위를 가졌으며, 이는 이 연구의 결과인 $c=1.00$, $m=0.58$ 와 유사하였다. 또한, IPR_{90} 를 변수로 사용한 경우(Schneider et al., 2015)에서는 $c=1.58$, $m=0.59$ 의 값을 가졌으며, 이 연구에서는 $c=1.66$, $m=0.63$ 의 값을 나타내었다.

D_{84} 를 거칠기 높이 변수로 사용한 경우에는 무차원 관계식의 c 값이 선행 연구결과와 차이를 보였으나, σ_{pro} 와 IPR_{90} 를 사용한 경우는 선행 연구결과와 잘 일치하였다, 이는

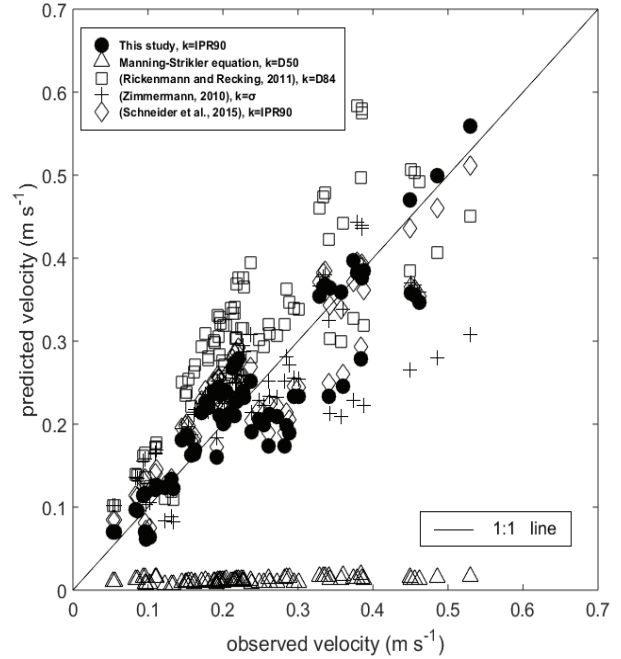


Figure 3. Measured and predicted velocity where predicted velocity was derived from different roughness heights and equations suggested by this study and previous researches (Rickenmann and Recking, 2011; Schneider et al., 2015; Zimmermann, 2010).

선행연구 사례에서 조사된 하천이 크고 하상재료가 상대적으로 높은 값을 보였기 때문이다.

Figure 3은 8개 산지소하천에 대하여 여러 가지 유속 추정식의 적용 결과를 비교하여 나타낸 것이다. IPR_{90} 을 거칠기 높이로 하여 유속을 추정한 이 연구의 RMSE는 0.05 m s^{-1} 였으며 전체 87개 유속 측정치의 78%를 설명하였다. 1923년 제시된 Manning-Strickler식은 0.26 m s^{-1} 의 RMSE를 보였으며, 2,890개의 현장조사 자료를 이용하여 거칠기 높이로 D_{84} 를 사용한 Rickenmann and Recking(2011)은 0.10 m s^{-1} 의 RMSE를 나타내었다. 거칠기 높이로 σ_{pro} 를 사용한 Zimmermann(2010)은 0.07 m s^{-1} 의 RMSE를 가졌으며, IPR_{90} 을 사용한 Schneider et al.(2015)는 0.05 m s^{-1} 의 RMSE를 보였다. 이러한 분석 결과를 종합하면, 거칠기 높이를 표현하기 위해 하상재료의 크기인 D_{50} , D_{84} 를 사용하는 것보다 하도 형상을 나타내는 σ_{pro} , IPR_{90} 를 사용하는 경우의 추정 정확도가 높게 나타났다.

상류유역이 잘 발달되고 유역 면적이 큰 외국의 산지하천은 규모가 큰 거석들이 하천 내에 많이 존재하여 거석의 영향으로 종단면의 형상이 결정되며, 이로 인해 하상의 종단변화(σ_{pro} , IPR_{90})와 하상재료의 크기(D_{50} , D_{84})가 유의한 상관성을 가진다(Schneider et al., 2015). 그러나 국지적인 지형 변화가 많은 우리나라의 산지소하천에서는 하상재료의 크기와 종단면과의 상관성이 낮아지게 된다. 이러한 지

형·물리적 특성으로 인해 외국에서 연구된 유량-유속 관계식을 국내 산지소하천에 이용하기 위해서는 적용성에 대한 검토가 선행되어야 한다.

결론

이 연구는 우리나라 산지소하천에서 유량과 유속 간의 관계를 살펴보기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 산지하천 8개소를 선정하여 총 87개의 유량 및 평균 유속 자료를 측정하였으며, 하천의 수리적 특성을 분석하였다.

산지소하천에서는 유량이 증가함에 따라 평균 유속이 지수적으로 증가하였으며, 그 형태는 하천의 흐름 특성에 따라 다르게 나타났다. 따라서, 하천의 수리적 특성을 일반화하여 유량과 유속 간의 관계를 분석하였다. 이를 위하여 거칠기 높이에 대해 유량과 평균 유속의 무차원 관계식을 유도하였다. 산지하천의 유량-유속 무차원 관계식을 이용하여 산지소하천의 유량과 평균 유속과의 관계를 잘 설명하였다. 한편, 거칠기 높이 변수는 하천의 종단면 특징을 나타내는 σ_{pro} 와 IPR_{90} 를 사용하는 것이 더 효과적이었다.

앞으로 우리나라 산지소하천에 적합한 거칠기 높이 변수를 도출하고, 하도 특성 및 하상 변위를 LiDAR 또는 드론을 이용하여 3D 형상으로 분석하게 되면, 흐름특성에 따른 수리적 변화를 정확하게 파악할 수 있을 것이다. 또한, 이 연구에 이용된 산지하천은 $S < 26\%$, $0.002 < q < 0.06(m^3 s^{-1})$ 의 범위에 국한되지만, 더욱 다양한 조건에서 얻은 자료를 활용한다면 일반적인 산지하천의 유속과 유량 관계를 파악할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(협동과제[학술림(시험림) 교육·연구 활성화 기반 구축] : 2014109C10-1820-AA01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Aberle, J. and Smart, G. 2003. The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research* 41(3): 259-269.
- Bathurst, J. 1993. Flow resistance through the channel network. *Channel Network Hydrology*: 69-98.
- Bjerklie, D.M., Dingman, S.L. and Bolster, C.H. 2005. Comparison of constitutive flow resistance equation based on the Manning and Chezy equations applied to natural rivers. *Water Resources Research* 41(11).
- Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E.E. and Lenzi, M.A. 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology* 340(1): 48-62.
- Eu, S., Im, S.J., Kim, D. and Chun, K.W. 2017. Flow and deposition characteristics of sediment mixture in debris flow flume experiments. *Forest Science and Technology* 13(2): 61-65.
- Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel-and boulder-bed streams. *Water Resources Research* 43(5).
- Ferguson, R. 2010. Time to abandon the manning equation? *Earth Surface Processes and Landforms* 35(15): 1873-1876.
- Hicks, D.M. and Mason, P.D. 1991. Roughness characteristics of new zealand rivers: A handbook for assigning hydraulic roughness coefficients to river reaches by the "visual comparison" approach. *Water Resources Survey*. Wellington, NZ, pp. 329.
- Kondolf, G.M. and Li, S. 1992. The pebble count technique for quantifying surface bed material size in instream flow studies. *Rivers* 3(2): 80-87.
- Lenzi, M., Mao, L. and Comiti, F. 2003. Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment. *Hydrological Sciences Journal* 48(6): 899-915.
- Lenzi, M., Mao, L. and Comiti, F. 2004. Magnitude-frequency analysis of bed load data in an alpine boulder bed stream. *Water Resources Research* 40(7).
- Merz, J. and Dopplmann, G. 2006. Measuring mountain stream discharge using the salt dilution method—a practical guide. *International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)*, Kathmandu. Kathmandu.
- Moore, R. 2004. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement: Part 1. *Streamline Watershed Management Bulletin* 7(4): 20-23.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Kirchner, J., Turowski, J. and Badoux, A. 2012. Macroroughness and variations in reach-averaged flow resistance in steep mountain streams. *Water Resources Research* 48(12).
- Rickenmann, D. 1990. Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. *Swiss Federal Institute of Technology in Zurich*.
- Rickenmann, D. and Recking, A. 2011. Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research* 47(7).
- Rossman, L.A. 1990. Design stream flows based on harmonic means. *Journal of Hydraulic Engineering* 116(7): 946-950.
- Rouse, H. 1965. Critical analysis of open-channel resistance. *Journal of the Hydraulics Division* 91(4): 1-23.
- Schneider, J.M., Rickenmann, D., Turowski, J.M. and Kirchner, J.W. 2015. Self-adjustment of stream bed roughness and

- flow velocity in a steep mountain channel. *Water Resources Research* 51(10): 7838-7859.
- Waldon, M.G. 2004. Estimation of average stream velocity. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(11): 1119-1122.
- Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions American Geophysical Union* 35(6): 951-956.
- Yang, H.J., Im, S.J., Lee, Q., Eu, S. and Lee, E.J. 2016. Flow measurement of mountain streams using the salt-dilution method. *Journal of Korea Forest Engineering* 14(1): 1-6.
- Yochum, S.E. 2010. Flow resistance prediction in high-gradient streams. (Dissertation). Colorado State University.
- Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., David, G.C. and Wohl, E. 2012. Velocity prediction in high-gradient channels. *Journal of Hydrology* 424: 84-98.
- Zimmermann, A. 2010. Flow resistance in steep streams: An experimental study. *Water Resources Research* 46(9).
-

Manuscript Received : November 29, 2017

First Revision : February 26, 2018

Second Revision : April 24, 2018

Accepted : April 25, 2018