

염료추적자법을 이용한 산지하천의 구간 평균 유속 추정

김태현¹ · 이제만¹ · 이철원¹ · 임상준^{1,2*}

¹서울대학교 농림생물자원학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원

Estimation of the Reach-average Velocity of Mountain Streams Using Dye Tracing

Tae-Hyun Kim¹, Jeman Lee¹, Chulwon Lee¹ and Sangjun Im^{1,2*}

¹Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

요약: 산지하천에서 발생하는 돌발홍수는 특정 지점의 점(Point) 유속보다는 전체 구간의 평균 유속에 따라 이동속도가 결정되며, 구간 평균유속은 하천경사, 하상재료, 수리적 거칠기에 많은 영향을 받는다. 이 연구에서는 하천경사 및 거칠기 높이를 이용하여 산지하천의 구간 평균유속 추정방법을 개발하였다. 염료추적자법(Dye Tracing)을 이용하여 특정 구간의 평균유속을 측정하고, LiDAR 영상으로부터 하천 지형 및 형상을 추출하였다. 거칠기 높이를 산정하기 위해 표면 거칠기 변수(R_a , R_{max} , R_z)와 하상재료의 크기(D_{50} , D_{84})를 이용하였다. 현장 계측자료로부터 무차원 접근법을 이용하여 구간 평균유속과 유량과의 관계식 $v = 0.5499Q^{0.6165}$ 을 도출하였으며, $R^2=0.77$ 의 설명력을 나타냈다. 이 연구에 이용된 5개의 거칠기 높이 중 평균 거칠기 높이(R_a)의 RMSE가 0.45로서 다른 거칠기 높이의 범위(0.47-1.04)보다 낮게 나타나 평균 거칠기 높이(R_a)가 구간 평균유속 산정을 위한 거칠기 높이 인자로 가장 적합하다고 판단되었다.

Abstract: The travel time of flash floods along mountain streams is mainly governed by reach-average velocity, rather than by the point velocity of the locations of interest. Reach-average velocity is influenced by various factors such as stream geometry, streambed materials, and the hydraulic roughness of streams. In this study, the reach-average velocity in mountain streams was measured for storm periods using rhodamine dye tracing. The point cloud data obtained from a LiDAR survey was used to extract the average hydraulic roughness height, such as R_a , R_{max} , and R_z . The size distribution of the streambed materials (D_{50} , D_{84}) was also considered in the estimation of the roughness height. The field experiments revealed that the reach-average velocities had a significant relationship with flow discharges ($v = 0.5499Q^{0.6165}$), with an R^2 value of 0.77. The root mean square error in the roughness height of the R_a -based estimation (0.45) was lower than those of the other estimations (0.47-1.04). Among the parameters for roughness height estimation, the R_a -based roughness height was the most reliable and suitable for developing the reach-average velocity equation for estimating the travel time of flood waves in mountain streams.

Key words: dye tracing, rhodamine, reach-average velocity, roughness height, dimensionless analysis

서론

최근 기후변화의 영향으로 국지성 집중호우에 의한 산지하천의 돌발홍수(Flash Flood) 피해가 잦아지고 있다

(Lee, 2010). 돌발홍수는 유역 크기가 작고 하천경사가 급한 산지소유역에서 주로 발생하며, 짧은 유하시간과 빠른 유속으로 인하여 막대한 인명 및 재산피해를 가져온다 (Kim and Kim, 2008). 돌발홍수에 효과적으로 대비하기 위해서는 흐름 유속을 추정하여 홍수파의 이동시간을 정확하게 예측하는 것이 필요하다.

하천 유속을 구하는 데는 수심 기반의 간접적인 추정방법을 주로 사용해 왔으며 대표적으로 Chezy, Manning,

* Corresponding author

E-mail: junie@snu.ac.kr

ORCID

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

Darcy-Weisbach 공식 등이 있다(Bjerklie et al., 2005). 그러나 수심 기반의 유속공식은 산지하천과 같이 유속의 변화가 심하고 난류가 발달된 곳에는 적용하기 어렵다(Yang et al., 2018). 특히, 산지하천은 하천경사가 매우 급하고, 거석(Boulder)과 유목(Large Woody Debris)이 하상에 많이 쌓여 있으며, 하상 및 경사조건에 따라 사류(Supercritical Flow)와 상류(Subcritical Flow)가 교차하여 발생하며, 수리도수(Hydraulic Jump)에 의한 에너지 손실이 크다(Lenzi et al., 2004; Ferguson, 2007; Yang et al., 2018).

유속은 일반적으로 유속계를 이용하여 현장에서 직접 측정한다. 산지하천은 하천구간에 따라 유속 변화가 심하기 때문에, 산지에서 발생하는 홍수파의 이동속도는 특정 위치의 점(Point) 유속보다는 하도구간의 평균적인 유속에 의해 결정된다(Yang et al., 2018). 구간 평균 유속(Reach-average Velocity)은 상류에서 발생한 홍수파가 하류 지점까지 이동하는 동안의 평균적인 속도를 말하며, 하도추적(Flow Routing)을 통해 홍수파 흐름을 예측하는 데 매우 중요한 수리 특성이다.

홍수시에 하천구간의 평균유속을 직접 측정하는 방법에는 부자에 의한 방법(Rising Float Method)과 염료추적자법(Dye Tracer Method) 등이 있다. 부자법은 유속계를 사용할 수 없는 홍수시에 수표면에 부자(Float)를 띄워 특정 지점까지 이동하는 데 걸린 시간을 측정하여 유속을 구한다. 이 방법은 일반하천에서는 효과적이지만 산지하천과 같이 하천 폭이 좁고, 수심이 얇으며, 거석이나 유목이 많은 곳에서는 적용하기 어렵다. 염료추적자법은 산지하천과 같은 소하천과 짧은 계류구간에 적합하다(Yoon, 2007). 이 방법은 상류의 특정 지점에서 추적물질(염료)을 주입하고 일정 거리에 위치한 하류에서 투입된 염료 농도를 측정하여 유속을 구하는 방법이다(Hubbard et al., 1982). 염료추적자법은 주로 두 지점 혹은 영역 사이의 수리적 연결성을 확인하거나(Lee, 1996), 대수층에서 용질 이동에 영향을 주는 요인을 파악하기 위해 널리 사용한다(Drost and Moser, 1983; KAERI, 2006). 최근에는 조사자가 직접 접근하기 어려운 환경에서도 적용 가능하며, 지형이나 유량에 관계없이 정확한 유속을 측정할 수 있고, 계측 방법이 간단하여 난류 흐름이 크게 나타나는 산지계류에서 유속이나 유량을 측정하는 데 널리 사용되고 있다(Merz and Doppmann, 2006).

염료추적자법에 사용되는 염료는 로다민(Rhodamine)과 같은 형광물질이나 나트륨(NaCl) 성분의 소금이 이용된다(Yang, 2018). 소금희석법(Salt Dilution Method)은 간단하게 사용할 수 있으나, 산지하천과 같이 식생이 많이 있는 곳은 소금이 물과 잘 섞이지 않고, 염분이 주변에 흡착되

거나(Moore, 2004), 무척추 동물에 영향을 주어 생태환경 문제를 일으키기도 한다(Wood and Dykes, 2002). 또한, 홍수시에는 유량에 비례하여 매우 많은 양의 소금을 투입하여야 하며, 측정지점 간의 거리가 멀어지면 정확도가 낮아지는 한계를 가진다(Kite, 1989). 반면에, 형광물질인 로다민은 수면에서 다른 물질에 의해 잘 흡착되지 않아 흐름을 따라 안정적으로 이동하며(Runkel, 2015), 적정 농도 이하에서는 수생태계에 영향을 주지 않는다고 알려져 있다(Skjolding et al., 2021).

대상 유역의 모든 하천에 대해 유속을 직접 측정하는 것은 현실적으로 어려워 하천의 수리적 특성을 이용하여 간접적으로 유속을 추정하는 방법이 개발되어 이용되고 있다. 이 중에서도 상대적으로 쉽게 구할 수 있는 유량자료로부터 유속을 추정하는 방법들이 많이 이용되고 있다(Ferguson, 2010; Zimmermann, 2010). Yang et al.(2018)을 비롯한 많은 연구자(Yochum, 2010; Schneider et al., 2015)는 하천의 수리 특성을 반영하여 평균 유속과 유량 간의 무차원 관계식을 개발하였다(Rickenmann and Recking, 2011; Nitsche et al., 2012; Yochum et al., 2012; Schneider et al., 2015; Yang et al., 2018).

한편, 하천 흐름에는 많은 인자들이 영향을 준다. 하천의 수리적 거칠기 높이(Hydraulic Roughness Height)는 하천형상이나 하상재료에 의한 흐름 저항을 의미하며 유량과 유속과의 관계를 설명하는 중요한 수리적 변수이다(Yang, 2018). Aberle and Smart(2003)는 실내실험을 통해 하상변위의 표준편차(σ_{pro})가 하상재료의 크기 변수(D_{84} , D_{90})보다 수리학적 거칠기 높이를 표현하는 데 더 적절하다고 하였다. 반대로, Lee and Ferguson(2002)와 Ferguson (2007)의 연구에서는 하상변위 표준편차(σ_{pro})를 현장에서 측정하기 어렵기 때문에 D_{84} 를 이용하여 거칠기 높이를 구하였다. Comiti et al.(2007)은 Rio Cordon 유역 조사에서 D_{84} 가 유속과 가장 높은 상관관계를 가진다고 하였다. Schneider et al.(2015)는 하상변위 90% 백분위수 범위(Interpercentile Range) IPR_{90} , 반분산도(Semivariogram)의 sill 값 \hat{C} 와 D_{84} , σ_{pro} 를 거칠기 높이 인자로 사용하였다. Schneider et al.(2015)에 의하면 IPR_{90} 과 D_{84} , \hat{C} 와 σ_{pro} 가 서로 간에 높은 상관성을 보이며, 유속 추정에 있어 거칠기 높이 추정 방법에 따른 차이는 적다고 하였다. 이처럼 하천의 지형적·수리적 특성에 따라 거칠기 높이가 다양하게 표현되기 때문에 우리나라 산지하천에 적합한 거칠기 높이 추정방법을 개발하여 적용할 필요가 있다(Yang et al., 2018).

따라서, 이 연구의 목적은 산지하천의 흐름 특성을 반영한 구간 평균유속 추정식을 개발하는 것이다. 염료추적자법을 이용하여 하도 구간의 평균유속을 측정하고 서로 다

른 거칠기 높이 산정방법을 적용하여 정확도를 비교하였다. 산지하천의 거칠기 높이는 LiDAR 촬영을 통해 얻은 하천 횡단면의 표면 거칠기(Surface Roughness) 인자와 하상재료 크기의 50분위 수(D_{50})와 84분위 수(D_{84})를 이용하여 산정하였다.

재료 및 방법

1. 염료추적자법에 의한 유속 측정

현장실험은 경기도 안양시에 위치한 서울대학교 관악수목원의 산지하천에서 2022년 3월부터 10월까지 서로 다른 하천구간에서 총 11회 실시하였다. 이 연구에서는 다른 유입 하천으로부터 횡 유입이 없고 합류점 또는 분지가 없는 단일 하천구간을 선정하였다. 실험에 사용된 하천구간의 길이는 최소 30 m에서 최대 160 m까지 범위를 보였다.

산지하천의 평균유속은 염료추적자법을 이용하였다. 염료는 붉은 빛을 내는 형광색소인 로다민B(Rhodamine B, Alfa Aesar-USA)를 이용하였다. 24번의 사전 예비 실험을 통해 분석된 가장 안정적인 농도 값을 나타내는, 염료 1 g 과 하천수 5 L를 희석하여 상류에서 염료를 한 번에 주입하는 순간 주입법(Slug Injection Method)으로 투입하였다. 이 방법은 경사가 급하고 난류 흐름이 심한 산지하천에서 유속을 측정하는 데 많이 이용된다(Moore, 2005).

유속 측정은 상류 지점에서 염료를 주입한 뒤, 일정 거리의 하류에 위치한 측정지점에서 시간 경과에 따른 염료의 농도변화를 측정하는 방식으로 진행하였다(Figure 1). 물속에 포함된 로다민의 농도는 Turner Designs 사의 DataBank Handheld Datalogger를 이용하여 3초 간격으로 측정하였다(Figure 2). 현장실험은 동일한 하천구간에서 3회 이상 반복 실시한 뒤 평균값을 사용하였다. 한편, 현장 조사 시 실측 유량은 대상 하천 직하류에 설치되어 있는 유량계측용 웨어(Weir)를 이용하여 측정하였다. 웨어는

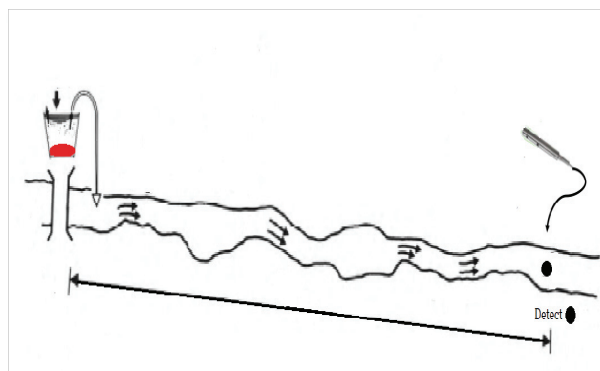


Figure 1. Schematic diagram of dye tracer method (Kilpatrick and Cobb, 1985).

1 m × 1 m 직사각형으로, 웨어의 단면에서 회전식 유속계(OTT C2 HydroMet)를 이용하여 유속과 수심을 측정하여 실측 유량을 계산하였다. 하류에서 측정된 시간에 따른 농도 변화는 Figure 3과 같으며, 실험은 염료농도가 배경농도(Background Concentration)와 같아질 때까지 측정을 하였다.

2. 하천구간 평균유속 산정

유속은 두 지점 간의 거리를 이동에 소요된 시간으로 나누어 구한다. 이 연구에서는 염료 추적자가 하천을 따라 이동하는 데 걸리는 이동시간의 조화평균(Harmonic Mean)을 이용하여 평균 유속을 산정하였다. 즉, 로다민 염료가 하천을 따라 이동한 거리를 이동시간의 조화평균으로 나누어 구간 평균유속을 구하였다(Waldon, 2004). 염료추적자 이동시간의 조화평균(T_{HM})은 다음 식으로 구한다.

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

여기서, $P_x(t)$ 는 시간에 따른 로다민 농도의 확률밀도함수를 의미하며, 다음 식으로 계산한다.



Figure 2. Turner Designs DataBank handheld datalogger.

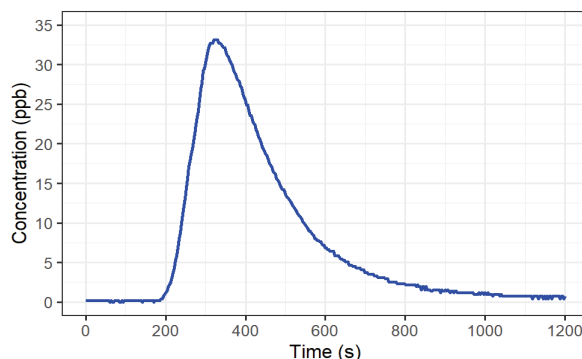


Figure 3. Time-concentration curve of rhodamine in a downstream.

$$P_x(t) = \frac{1}{I_x} c(x,t) \quad (2)$$

식 2에서 I_x 는 하류지점에서 측정한 염료의 시간별 농도 $c(x,t)$ 의 적분합을 나타낸다.

$$I_x = \int_{t=0}^{\infty} c(x,t) dt \quad (3)$$

3. 유량-유속 관계

하천의 유량과 유속은 멱함수(Power Function) 관계를 가진다(Aberle and Smart, 2003).

$$v = cQ^m \quad (4)$$

여기서, c, m 은 멱함수의 계수, v 는 유속(m/s)이고, Q 는 유량(m^3/s)이다. c, m 은 하천의 흐름 특성을 나타내며, 하천 형상, 유역면적, 하도 경사 등에 따라 결정된다(Yang et al., 2018).

최근에는 하천의 수리적 특성을 나타내기 위하여 무차원 분석을 실시한다. 이는 유속과 유량이 가지는 수리적 차원의 영향을 배제하여 무차원화된 변수 사이의 관계를 도출하는 방법이다(Rickenmann, 1990; Comiti et al., 2007; Ferguson, 2007; Yang et al., 2018). 유량과 유속은 다음 식을 이용하여 무차원 변수로 변환한다.

$$v^{**} = v / \sqrt{gks} \quad (5)$$

$$q^{**} = (Q/w) / \sqrt{gk^3s} \quad (6)$$

여기서, v^{**} 은 무차원 유속, q^{**} 은 무차원 유량을 나타내며, g 는 중력 가속도, k 는 거칠기 높이(m), 그리고 s 와 w 는 각각 하천의 경사(m/m)와 하천의 평균 폭(m)을 의미한다. 따라서, 산지하천의 구간 평균 유속과 유량과의 무차원 관계식을 도출하기 위해 현장 측정된 유량, 하천 폭, 하천경사 그리고 거칠기 높이를 인자를 이용하여 식 5, 6을 각각 계산하였다.

4. 거칠기 높이 산정

산지하천의 거칠기 높이는 LiDAR 촬영자료로부터 하상의 횡단면 자료를 추출하고, 이로부터 구한 표면의 흐름 거칠기를 이용하여 산정한다. 자연하천은 단면이 매끈하지 않고, 하상재료(Streambed Material)의 종류와 크기에 따라 표면의 거칠기 정도가 결정된다. LiDAR 촬영을 통해 얻은 전체 14개 횡단면 데이터 중에서 실험구간에 해당하는 9개 횡단면을 이용하였으며(Olson-Rutz and Marlow, 1992), 이 연구에서는 하천 단면의 기하학적 형상을 표현

하기 위하여 평균 거칠기(Arithmetical Average Roughness, R_a), 최대 높이 거칠기(Maximum Height Roughness, R_{max}), 그리고 10점 평균 거칠기(Ten Point Median Height, R_z)를 이용하였다.

평균 거칠기(R_a)는 아래 식과 같이 단면의 요철(凹凸) 정도를 산술평균하여 구한다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (7)$$

여기서, l 은 거칠기를 구하는 단면에서의 하천 폭(m)을 의미하며, $Z(x)$ 는 단면의 요철 크기(m)를 의미한다.

최대 높이 거칠기(R_{max})는 하천단면에서 가장 높은 거칠기(Peak)와 가장 깊은 거칠기(Valley) 사이의 높이차를 의미하며, 10점 평균 거칠기(R_z)는 하천 단면에서 가장 높은 5개 지점의 높이와 가장 깊은 5개 지점의 깊이를 평균하여 구한다.

$$R_{max} = \max(|Z_{peak}|) - \max(|Z_{valley}|) \quad (8)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |Z_{peak}(i)| - \sum_{i=1}^5 |Z_{valley}(i)| \right) \quad (9)$$

여기서, Z_{peak}, Z_{valley} 는 높은 지점(Peak)과 깊은 지점(Valley)의 거칠기(m)를 의미한다.

5. 하상재료 크기 측정

산지하천에서 유속은 하천의 마찰 특성을 나타내는 하상재료에 의해 영향을 크게 받는다(Yang, 2018). 하상재료 크기를 측정하기 위해 Wolman Pebble Count 방법(Wolman, 1954)을 이용하였다. 실험구간의 하류에서부터 상류까지 100개의 하상재료를 무작위로 채취하여, 장축과 중간축의 크기를 측정하였다. 이 연구에서는 하상재료의 장축에 대한 50분위 수(D_{50})와 84분위 수(D_{84})를 이용하여 거칠기 높이를 구하였다.

결과 및 고찰

1. 유속-유량 관계식 산정

산지하천의 다양한 지형 및 흐름 조건을 고려하여 로다민을 이용한 유속 측정을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. Table 1로부터 연구 대상 산지하천의 유속-유량 관계는 식 10과 같이 멱함수 형태로 나타낼 수 있다. Table 1에서 유량은 대상 하천의 유량측정 웨어로부터 구한 실측 유량이다.

$$v = 0.5499Q^{0.6165} \quad (R^2 = 0.7747) \quad (10)$$

Table 1. Results of field measurement on stream reaches.

Distance (m)	Travel time (s)	Discharge (m ³ /s)	Velocity (m/s)	Slope (m/m)
126.2	262.4	1.09	0.48	0.04
102.2	180.5	1.09	0.57	0.04
84.4	88.6	1.09	0.96	0.05
82.6	193.5	1.13	0.43	0.03
113.2	887.7	0.09	0.13	0.07
113.2	245.4	0.54	0.46	0.07
164.8	251.6	0.94	0.66	0.05
42.2	102.3	0.67	0.42	0.07
32.0	74.0	0.67	0.43	0.04
51.8	152.1	0.54	0.34	0.06
30.4	108.2	0.54	0.28	0.02

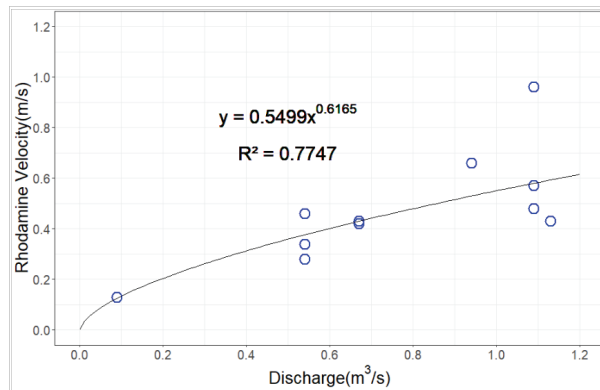


Figure 4. Reach-average velocity and discharge relationship.

Figure 4는 식 10의 웨어에서 측정된 실측 유량과 로다민 현장계측에 의해 구간 평균유속을 비교한 것이다. 식 10에 대한 통계분석을 통해 p-value가 0.009로 나왔으며, 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의미한 결과를 나타냈다. 이는 전체적으로 유량이 증가하면 유속도 증가하는 일반적인 유량-유속의 관계를 보였다.

2. 산지하천의 거칠기 높이 산정

연구대상 산지하천에서 LiDAR에 의한 횡단면 자료를 이용하여 단면형상을 추출하고 하상재료 크기 조사를 통한 D₅₀, D₈₄ 값을 구하였다. Figure 5는 산지하천에서 LiDAR 촬영을 실시한 횡단면 지점(Cross Section; CS)을 보여주며, Figure 6는 CS 1의 횡단면 변화를 나타낸 것이다. 14개의 횡단면 중 정확하게 표현되지 않은 5개의 데이터를 제외한 9개 횡단면에 대한 평균적인 표면 거칠기 계산 결과는 Table 2와 같다. 연구대상지 산지하천의 평균적인 거칠기 높이는 R_a는 0.585 m, R_{max}는 2.394 m로 계산되었으며, 그리고 R_z는 1.480 m로 나타났다. 하상재료 조

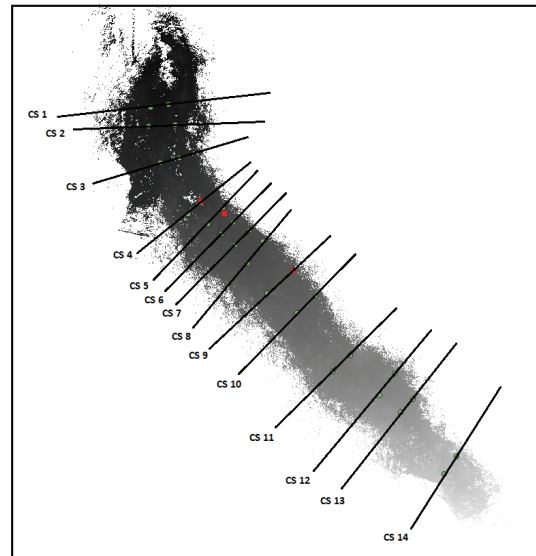


Figure 5. Data extraction points from LiDAR survey.

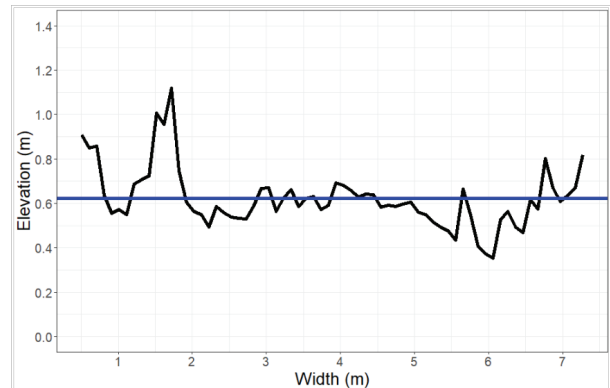


Figure 6. Surface roughness at reach CS 1 derived from LiDAR. (The blue line represents the average line)

사를 통해 구한 D₅₀과 D₈₄는 각각 0.14 m, 0.24 m로 나타났으며, Wentworth(1922)가 제시한 하상재료 크기 등급을 따르면 큰 자갈(128-180 mm)과 엄청 큰 자갈(180-256 mm)의 범위에 속한다. Yang et al.(2018)의 선행연구에서는 대한민국의 3개의 유역에서 D₅₀은 0.06-0.13 m 그리고 D₈₄은 0.8-0.26 m의 범위를 보였으며, 이는 이번 연구 실험지인 관악수목원이 선행 연구의 3개 유역보다 큰 거석이 많이 분포한다는 것을 의미한다.

3. 유속-유량 무차원 관계식 산정

거칠기 높이인 하상의 마찰 특성인 하상재료의 D₅₀과 D₈₄, 그리고 LiDAR 촬영으로부터 얻은 하상 횡단면 형상의 표면 거칠기 인자(R_a, R_{max}, R_z)를 각각 산출하였으며 (Table 3), 이를 통해 최종적으로 5개의 무차원 관계식을 도출하였다(Table 4).

Table 2. Results of surface roughness estimation.

No	R_a	R_{max}	R_z
CS 1	0.093	0.767	0.390
CS 2	0.517	2.885	2.000
CS 3	0.583	3.697	2.482
CS 4	2.229	2.022	0.888
CS 5	0.220	1.469	0.866
CS 6	0.384	2.722	1.900
CS 7	0.385	2.278	1.730
CS 8	0.449	3.610	2.446
CS 9	1.416	2.538	1.514
Average	0.585	2.394	1.480

5개의 서로 다른 거칠기 높이 추정방법을 이용하여 유속과 유량 관계를 무차원화시켜 비교한 결과는 Figure 7과 같다. Figure 7에서와 같이 거칠기 높이에 따른 무차원 유속과 유량의 관계는 멱급수 관계로 나타낼 수 있으며, 유량이 증가함에 따라 유속도 증가하는 경향을 보였다. 거칠기 높이 산정방법별 무차원 관계식의 R^2 은 R_a 는 0.92, R_{max} , R_z 는 0.93 그리고 D_{50} , D_{84} 모두 0.86의 설명력을 보였다.

선행연구를 살펴보면, Yang et al.(2018)은 3개의 유역에서 총 87개의 현장 데이터를 이용하여 R^2 가 0.98인 무차원 관계식을 도출하였고, Yochum et al.(2012)은 15개의 유역에서 59개의 데이터를 통해 R^2 가 0.97의 설명력을 보였다. Schneider et al.(2015)는 한 유역에서 경사가 다른 10개의 구간에서 실험을 통해 거칠기 높이를 반분산도의 sill 값 C' 로 사용하여 구한 무차원 관계식의 R^2 는 0.99로 나타났다. 선행연구와 비교하여 이 연구에서 개발된 무차원 관계식은 다소 설명력이 낮게 나타났다. 이는 이번 연구에서 수행된 현장조사가 집중강우 직후에 진행되어, 시

Table 3. Surface roughness height with distance.

Distance	R_a	R_{max}	R_z
126.2	0.20	1.05	0.90
102.2	0.16	0.89	0.75
84.4	0.16	0.86	0.74
82.6	0.24	1.39	1.20
113.2	0.19	1.01	0.84
113.2	0.19	1.01	0.84
164.8	0.18	0.91	0.76
42.2	0.32	1.84	1.51
32.0	0.34	1.91	1.56
51.8	0.29	1.68	1.40
30.4	0.29	1.67	1.40

Table 4. Reach-average velocity and discharge equations with roughness height.

Roughness height	Estimated model	RMSE
R_a	$v = 1.28q^{0.62}$	0.45
R_{max}	$v = 2.66q^{0.62}$	0.59
R_z	$v = 2.51q^{0.63}$	0.61
D_{50}	$v = 1.04q^{0.63}$	1.04
D_{84}	$v = 1.32q^{0.63}$	0.47

간별 유량 변동이 매우 크고 하천경사가 급한 산지하천 급류 조건을 대상으로 하였기 때문이다.

Table 4는 산지하천의 거칠기 높이 추정방법에 따른 유량과 유속 무차원 관계식에 대한 정확도를 평가한 결과이다. Table 4에서 나타난 바와 같이 거칠기 높이 인자로 R_a 를 이용한 관계식의 RMSE가 다른 거칠기 높이 추정방법보다 가장 낮게 나타났다. 이는 거칠기 높이로 R_a 를 사용하는 것이 다른 거칠기 인자보다 유속과 유량 간의 관계를 잘 설명하는 것을 의미한다. 따라서, R_a 를 거칠기 높이로 하여

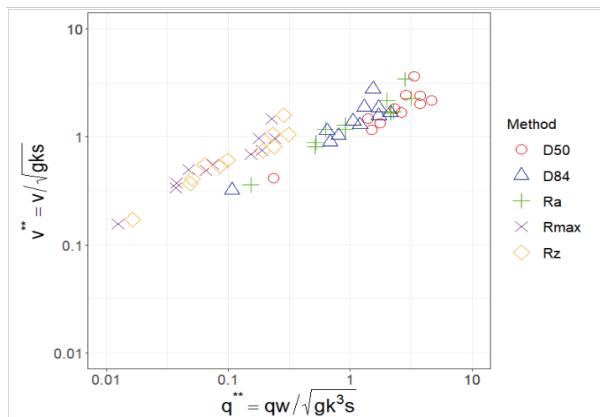


Figure 7. Dimensionless relationship between discharge and reach-average velocity with roughness height.

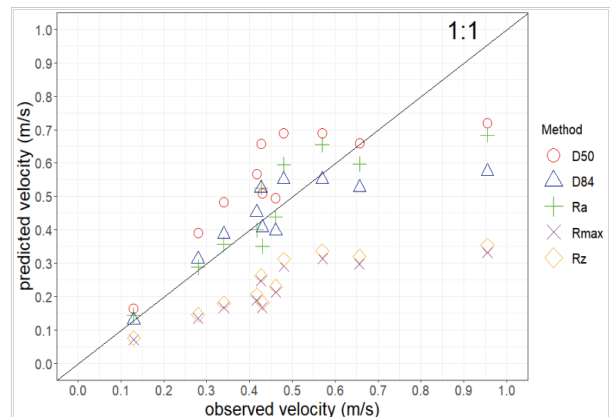


Figure 8. Relationship between observed velocity and predicted velocity.

산지하천의 구간 평균유속 추정식을 유도하면 다음과 같다.

$$v = 1.28 q^{0.62} w^{-0.62} g^{0.19} k^{-0.43} s^{0.19} \quad (11)$$

이 연구에서 얻은 무차원 추정식에 대해 각 거칠기 인자를 대입하여 얻은 구간 평균 유속의 산점도는 Figure 8과 같다. 각각의 거칠기 인자들의 R 값은 R_a , R_{max} 는 동일하게 0.76, R_z 는 0.77, D_{50} , D_{84} 는 0.65의 설명력을 보였다. 전체적으로 거칠기 높이로 하상재료보다는 표면 거칠기가 더 높은 설명력을 보였고, 이는 단면을 구성하는 하상재료 크기가 아닌 횡단면의 요철이 유속에 더 많은 영향을 주는 것을 의미한다.

이 연구에서 개발된 평균 유속 추정식은 산지하천의 유속에 영향을 주는 인자가 많고 넓은 유량값의 분포와 급한 경사를 가지는 산지하천의 급류 조건에서도 현장 적용성이 있다고 판단된다. 앞으로 보다 많은 자료를 활용하여 다양한 산지하천의 수리적 특성을 반영하여 거칠기 높이 추정 방법에 따른 영향을 계량화하면, 현장 적용성이 높은 무차원 유량-유속 관계식을 도출할 수 있을 것이다.

결론

이 연구는 서울대학교 관악수목원에 위치한 산지하천을 대상으로 하천구간의 평균유속 추정식을 개발하기 위해 진행되었다. 평균유속은 거칠기 높이와 하천 폭, 하천경사를 이용하여 산정하였다. 이를 위하여 하천구간 평균 유속은 로다민B 시료를 이용한 염료추적자법으로 현장 계측하였고, 거칠기 높이는 LiDAR 영상으로부터 구한 세 가지 표면 거칠기 인자(R_a , R_{max} , R_z)와 하상재료의 D_{50} , D_{84} 를 이용하여 산정하였다.

유량과 유속의 관계는 유량이 증가함에 따라 유속도 같이 증가하는 멱급수 형태로 나타났다. 또한 하천의 흐름 특성을 일반화한 평균유속과 유량과의 관계를 나타내는 무차원 접근법을 이용하여 거칠기 높이별 유량과 유속의 무차원 관계식을 유도하였다. 거칠기 높이 추정방법에 관계없이 유속-유량의 관계는 비례적인 모습을 보였고, 표면 거칠기 인자(R_a , R_{max} , R_z)가 하상재료 D_{50} , D_{84} 보다 높은 상관성을 보였다. 산지하천의 거칠기 높이를 가장 잘 반영할 수 있는 인자로는 평균 거칠기인 R_a 가 선정되었으며, 최종적으로 R_a 거칠기 높이를 이용한 구간 평균유속 추정식을 개발하였다.

이 연구는 단일 산림유역에서 진행되어, 다양한 지형 및 거칠기 인자를 반영하지 못했다는 한계를 가진다. 따라서 향후 연구대상지 확대를 통해 다양한 산지하천의 흐름 특

성을 반영한다면 우리나라 산지 환경에 적합한 구간 평균 유속 추정식을 개발할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2021343C10-2323-CD01)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.
- 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): W11502.
- 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.
- Curran, J.H. and Wohl, E.E. 2003. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, cascade range, washington. *Geomorphology* 51(1): 141-157.
- Drost, W. and Moser, H. 1983. Leakage from lakes and reservoirs: Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology. International Atomic Energy Agency. pp. 177-186.
- Ferguson, R. 2007. Flow resistance equations for gravel-and boulder-bed streams. *Water Resources Research* 43(5): W05427.
- Ferguson, R. 2010. Time to abandon the manning equation?. *Earth Surface Processes and Landforms* 35(15): 1873-1876.
- Hubbard, E.F., Kilpatrick, F.A., Martens, L.A. and Wilson, J.F. 1982. Measurement of time of travel and dispersion in streams by dye tracing. US Geological Survey Techniques of Water-resources Investigations. pp. 9.
- Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI). 2006. Technical Reviews on the Radioisotope Application for Leak Detection in Reservoirs. Korea Atomic Energy Research Institute. pp. 30-31.
- Kilpatrick, F. and Cobb, E. 1985. Measurement of discharge using tracer. US Geological Survey Techniques of Water-resources Investigations. pp. 25.
- Kim, B.S. and Kim, H.S. 2008. Estimation of the Flash Flood Severity using Runoff hydrograph and Flash flood index.

- Journal of Korea Water Resources Association 41(2): 185-196.
- Kite, G. 1989. An extension to the salt dilution method of measuring streamflow. *International Journal of Water Resources Development* 5(1): 19-24.
- Lee, A.J. and Ferguson, R.I. 2002. Velocity and flow resistance in step-pool streams. *Geomorphology* 46(1): 59-71.
- Lee, J.H. 2010. An assessment method for hazardous region of flash flood in mountainous areas. *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society* 11(11): 4629-4634.
- Lee, J.Y. 1996. Use of field observations to characterize a fractured porous aquifer system in Won-Ju, Korea. (Dissertation). Seoul. Seoul National University.
- 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): W07201.
- MacFarlane, W.A. and Wohl, E. 2003. Influence of step composition on step geometry and flow resistance in step-pool streams of the Washington Cascades. *Water Resources Research* 39(2): 1037.
- Merz, J. and Doppmann, G. 2006. Measuring mountain stream discharge using the salt dilution method-a practical guide. *International Centre for Integrated Mountain Development*. pp. 1-2.
- Moore, R.D. 2004. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement: Part 1. *Streamline Watershed Management Bulletin* 7(4): 20-23.
- Moore, R.D. 2005. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement: part 3. *Streamline Watershed Management Bulletin* 8(2): 1-6.
- 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): W12518.
- Olson-Rutz, K.M., and Marlow, C.B. 1992. Analysis and interpretation of stream channel cross-sectional data. *North American Journal of Fisheries Management* 12(1): 55-61.
- Richardson, M.E. 2015. Refinement of tracer dilution methods for discharge measurements in steep mountain streams. (Dissertation). Vancouver. University of British Columbia.
- Rickenmann, D. 1990. Bed load transport capacity of slurry flow at steep slopes. (Dissertation). Zurich. 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): W07538.
- Runkel, R.L. 2015. On the use of rhodamine WT for the characterization of stream hydrodynamics and transient storage. *Water Resources Research* 51(8): 6125-6142.
- 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.
- Skjolding, L.M., Jørgensen, L.V., Dyhr, K.S., Köppl, C.J., McKnight, U.S., Bauer-Gottwein, P., Mayer, P., Bjerg, P.L. and Baun, A. 2021. Assessing the aquatic toxicity and environmental safety of tracer compounds Rhodamine B and Rhodamine WT. *Water Research* 197: 117109.
- Smart, G.M., Duncan, M.J. and Walsh, J.M. 2002. Relatively rough flow resistance equations. *Journal of Hydraulic Engineering* 128(6): 568-578.
- Waldon, M.G. 2004. Estimation of average stream velocity. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(11): 1119-1122.
- Wentworth, C.K. 1922. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology* 30(5): 377-392.
- Wolman, M.G. 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions American Geophysical Union* 35(6): 951-956.
- Wood, P.J. and Dykes, A.P. 2002. The use of salt dilution gauging techniques: ecological considerations and insights. *Water Research* 36(12): 3054-3062.
- Yang, H.J. 2018. Formula for calculating mean velocity in mountain streams using the salt - dilution Method. (Dissertation). Seoul. Seoul National University.
- Yang, H.J., Lee, S.J. and Im, S.J. 2018. Hydraulic relation of discharge and velocity in small, steep mountain streams using the salt-dilution method. *Journal of Korean Society of Forest Science* 107(2): 158-165.
- Yochum, S.E. 2010. Flow resistance prediction in high-gradient streams. (Dissertation). Fort Collins. 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.
- Yoon, Y.N. 2007. Hydrology: Basic and Applied. Cheong Mun Gak. Paju, Korea. pp. 331.
- Zimmermann, A. 2010. Flow resistance in steep streams: An experimental study. *Water Resources Research* 46(9): W09536.