

소형 수로실험을 통한 토석류 유동속도 추정식 평가

유 송¹ · 임상준^{1,2*}

¹서울대학교 산림과학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원

Examining Velocity Estimation Equations of Debris Flow Using Small-scaled Flume Experiments

Song Eu¹ and Sangjun Im^{1,2*}

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

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

요약: 토석류는 빠른 속도와 넓은 퇴적 범위 등으로 인명 및 재산 피해를 야기하는 산지토사재해이다. 토석류 피해 저감을 목적으로 효과적인 사방 구조물을 설계하기 위해서는 토석류의 충격력을 정확하게 산정하여야 한다. 토석류의 유동속도는 토석류 충격력을 추정하는데 중요한 요인이다. 따라서 이 연구에서는 소형 수로실험을 통해 수로경사 및 시료 조건에 따른 토석류의 유동특성을 실험적으로 분석하고, 토석류 유동속도 추정식의 유동저항계수를 추정하였다. 유동속도는 수로의 경사조건 및 시료의 점성조건에 유의한 변화를 보였다. 유동깊이는 수로경사에 대해서 유의한 차이를 보였으나 시료의 점성변화에 대해서는 유의한 변화를 보이지 않았다. 유동저항계수를 계산하여 분석한 결과, Voellmy flow 모형의 Chezy 상수(C_1)가 상대적으로 수로실험 결과를 잘 재현하였다. 또한, 실제 토석류 사례와의 비교 결과, 유동깊이에 관계 없이 일정한 값($20.19 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$)을 보였다. 따라서, C_1 은 다양한 발생규모의 토석류에 대한 유동속도 추정에 잘 활용될 수 있을 것으로 보인다.

Abstract: With its rapid velocity and wide deposition, debris flow is a natural disaster that causes loss of human life and destruction of facility. To design effective debris barriers, impact force of debris flow should be first considered. Debris flow velocity is one of the key features to estimate the impact force of debris flow. In this study, we conducted small-scale flume experiments to analyze flow characteristics of debris flow, and determine flow resistance coefficients with different slope gradients and sediment mixtures. Flow velocity significantly varied with flume slope and mixture type. Debris flow depth decreased as slope increased, but difference in depth between sediment mixtures was not significant. Among flow resistance coefficients, Chezy coefficient (C_1) showed not only relatively highest goodness of fit, but also constant value ($20.19 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$) regardless the scale of debris flow events. The overall results suggested that C_1 can be most appropriately used to estimate flow velocity, the key factor of assessing impact force, in wide range of debris flow scale.

Key words: debris flow, flume experiment, flow characteristics, impact force, flow resistance coefficient

서론

토석류는 물과 토석이 혼합되어 계류를 따라 빠르게 흘러가는 유동현상으로, 미세한 점토부터 수 미터에 달하는 석력 등 서로 다른 크기의 입자가 섞여 이동한다(Hung

et al., 2001; Takahashi, 2014). 토석류는 계류를 따라 빠르게 흐르고, 계류의 하부에 넓은 퇴적상을 형성하지만, 이러한 유동 현상을 정확하게 예측하기는 현실적으로 어렵다(Jakob et al., 2005).

토석류로 인한 피해를 최소화하기 위하여 사방댐과 같은 사방구조물을 많이 설치한다(Jakob et al., 2005). 토석류 저지를 위한 사방구조물은 구조적으로 토석류의 유동에 의해 발생하는 충격력에 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다(Prochaska et al., 2008; Scheidl et al., 2013b).

* Corresponding author
E-mail: junie@snu.ac.kr

ORCID

Sangjun Im  <http://orcid.org/0000-0002-6332-2504>

토석류 충격력은 유동하여 이동하는 물질의 밀도와 속도 등에 밀접하게 연관되어 있는 것으로 알려져 있다(Hungr et al., 1984; Scheidl et al., 2013b; Koo et al., 2016). 따라서, 토석류의 충격력을 정확하게 추정하기 위해서는 토석류의 유동속도를 파악하여야 한다.

많은 연구자들은 이론적 고찰 및 실제 사례에 대한 분석을 바탕으로 토석류의 유동속도를 경험적으로 산정하는 방법들을 제시하였다(Takahashi, 1981; Hungr et al., 1984; Koch, 1998). 이러한 많은 경험식들은 공통적으로 유동깊이, 계류경사를 변수로 가지지만, 연구에 이용된 실험 결과 및 실제 사례에 따라 각 변수의 민감도 및 유동저항계수가 상이하게 산정되었다. 따라서 기존의 연구에서 도출된 특정한 변수 조건을 이용하여 실제 토석류 유동속도 추정에 활용하기에는 많은 제약이 따른다.

따라서 이 연구에서는 소형 수로 실험을 통해 토석류 유동속도를 산정하는 유동저항계수를 추정하고, 실제 토석류 발생 사례를 통해 도출된 유동저항계수의 적용성을 평가하였다. 이를 위해 토석류 현상을 모의하여 소형 수로에서의 실험을 수행하였다. 이후 실험을 통해 획득한 유동 속도 및 유심을 통해 유동저항계수를 추정하고, 실제 토석류 사례에서 계산된 유동저항계수와 비교하여 그 적용성을 비교하였다.

재료 및 방법

1. 토석류 유동저항계수

토석류의 유동속도를 추정하기 위한 수많은 이론적, 실험적 방법들이 개발되어 왔다(Takahashi, 1981; Hungr et al., 1984; Scheidl et al., 2013a). 이러한 연구는 유체에 대한 수리적인 해석을 통해 유동속도를 구하고, 이를 이용하여 토석류 유동속도를 추정하는 방법을 제시한 뒤, 현장 조사자료 혹은 실험을 통해 얻은 자료를 이용하여 추정식의 각 변수들의 거듭제곱 값 및 유동저항계수를 제안하였다. 일반적인 토석류 유동속도 추정식은 식 1과 같다.

$$v = C H^\alpha S^\beta \tag{1}$$

여기에서, v 는 유동속도, C 는 유동저항계수, H 는 유동깊이, S 는 수로 혹은 사면의 경사이다. α, β 는 추정 매개변수로서 토석류 유동해석방법에 따라 Table 1과 같이 나타난다.

유동저항계수 C 는 Table 1에서와 같이 유동해석방법에 따라 다양한 범위의 값을 가진다. Newtonian laminar flow에서는 $C = \rho g / k\mu$ 로 표시되며, μ (Pa s)는 76 (Takahashi 1981) - 3000 (Hungr et al., 1984)의 범위를 가진다. Table

Table 1. Debris flow velocity estimating equations.

Flow model	Velocity estimation equation	Reference
Newtonian laminar flow	$v = \frac{\rho g}{k\mu} H^2 S$	Hungr et al.(1984)
Dilatant flow	$v = \frac{2}{3} \xi H^{3/2} S^{1/2}$	Takahashi(1981); Hungr et al. (1984)
Newtonian turbulent flow	$v = \frac{1}{n} H^{2/3} S^{1/2}$	Hungr et al. (1984)
Voellmy flow	$v = C_1 H^{1/2} S^{1/2}$	Koch (1998); Scheidl et al. (2013a)

1에서 ξ ($m^{-1/2} s^{-1}$)는 3.25 (Hungr et al., 1984) - 31 (Koch, 1998), n ($m^{-1/3} s$)은 0.09 (Koch, 1998) - 0.15 (Takahashi, 1981), C_1 ($m^{-1/2} s^{-1}$)은 약 10-20 (Scheidl et al., 2013a)의 범위를 보인다. 이와 같이 유동저항계수는 유동해석방법에 따라 다르게 나타나기 때문에 일률적으로 결정하여 적용하기 어렵다.

2. 수로실험의 상사성

수로실험 조건에서는 토석류 현상과 규모의 차이가 발생하기 때문에 차원 해석을 통해 다양한 변수를 축소하는 상사성(similarity)이 고려되어야 한다(Iverson, 2015). 이를 위해서는 수로의 길이, 입자의 직경 등의 기하학적 상사와 유동 현상에 대한 동역학적 상사가 고려되어야 한다(Scheidl et al., 2013b). 특히, 작용하는 힘에 대해 적용하는 동역학적 상사는 단순한 규모의 비로 표현하는 기하학적 상사와는 달리, 무차원 변수인 Froude 수를 이용하여 상사를 적용한다(Scheidl et al., 2013b). Froude 수는 중력에 의해 지배되는 유체에 적용하는 무차원 변수로 다음과 같이 나타난다.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{2}$$

Fr 은 Froude 수, v 는 토석류의 속도, h 는 흐름의 깊이, g 는 중력가속도이다. 따라서 수로실험과 토석류 사례의 Froude 수를 비교하여 동역학적 유사성을 평가할 수 있다(Scheidl et al., 2013b). 이 연구에서는 유동속도와 유동깊이를 통해 추정된 Froude 수를 이용하여 동역학적 상사를 수행하였다.

3. 토석류 실험수로

토석류 유동을 모의하기 위하여 소형수로를 제작하였

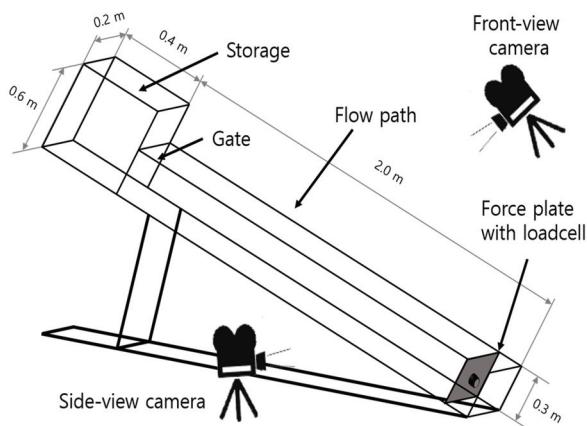


Figure 1. Small-scale debris flow flume. Length and height of the flow part are 2.0 m and 0.3 m, and those of soil storage part are 0.4 m and 0.6 m. The width of both parts are 0.2 m.

다(Figure 1). 소형수로는 시료 투입부와 유하부로 구성되며, 시료 투입부는 길이 0.4 m, 폭 0.2 m, 높이 0.6 m이며, 유하부는 길이 2.0 m, 폭 0.2 m, 높이 0.3 m의 규모로 제작하였다. 수로 재질은 시료 이동을 쉽게 관찰하기 위해 투명한 폴리카보네이트로 제작하였다. 수로 경사는 25°부터 40°까지 5° 단위로 경사를 조절할 수 있다.

4. 토석류 시료

다양한 입자가 섞여 이동하는 실제 토석류의 흐름을 재현하기 위해 자갈, 모래, 점토를 일정한 비율로 혼합하여 토석류 시료를 구성하였다. 시료의 비율은 유사한 규모의 수로실험에 이용된 시료 비율을 바탕으로 하여 토석류의 주된 정성적 특성이 재현되도록 비율을 조정하였다. 따라서, Parsons et al.(2001)와 Fairfield(2011)에서 지적한 바와 같이, 석력으로 구성된 전단부가 뚜렷이 형성되고 물과 시료가 혼합된 하나의 흐름상(phase)을 이루어 이동하며, 교란되지 않은 구간(plug)이 발생하는 유동특성을 보인 시료의 구성비율을 선정하였다.

토석류는 시료의 점성에 따라 유동특성이 달라진다(Parsons et al., 2001; Takahashi, 2014). 이 실험에서는 시료의 점성조건에 따른 유동특성을 비교하여 살펴보기 위하여 점성이 서로 다른 두 가지 시료를 이용하였다. 단일

물질로 구성된 일반적인 유체와는 달리 자갈, 모래, 점토 등이 혼합된 토석류 시료는 점도계(viscometer)를 이용하여 점성을 직접 측정하기 어렵다. Takahashi(2014)는 토사 부피농도, 즉 혼합시료의 총 부피 중에서 물을 제외한 고체물질이 차지하는 부피를 통해 물-토사 혼합물의 점성을 간접적으로 추정할 수 있음을 제안하였다. Takahashi(2014)와 Parsons et al.(2001)에 의하면, 토사 부피농도가 높을수록 높은 점성을 가진다. 이 연구에서는 토석류 시료의 점성을 결정하기 위하여 시료의 수분함량을 조절하였으며, 점성의 차이를 이용하여 각각 고점성 시료와 저점성 시료로 구분하였다.

토석류 수로실험에 이용된 시료의 정성적인 특징은 Table 2와 같다. 각 시료들은 10 L 용기에 담아 완전히 혼합하였고, 혼합부피를 측정하여 토사 부피농도와 밀도를 각각 측정하였다. 실험에 사용된 시료의 토사 부피농도는 고점성, 저점성 시료조건에 대해 각각 평균 56.56%, 41.00%로 나타났으며, 밀도는 $1930.79 \text{ kg m}^{-3}$, $1748.23 \text{ kg m}^{-3}$ 로 측정되었다(Table 2).

5. 토석류 유동실험

토석류 수로실험은 수로 경사 25°부터 40°까지 5° 간격의 총 4개 경사조건과 두 가지의 시료 점성조건을 가지고 각 실험조건별 5회씩 반복하여 수행되었다. 정해진 비율에 따라 혼합된 시료를 실험수로의 시료 투입부에 넣은 뒤 유하부 상부의 수문을 순간적으로 개방하여 시료를 흘려 보냈다. 토석류 유동속도 및 유동깊이는 수로의 전면과 측면에서 촬영된 영상을 분석하여 산정하였다. 영상을 이용하여 유동속도와 유동깊이를 측정하는 방법은 Eu et al.(2017)의 방법을 이용하였다.

실험 결과에 대한 통계분석은 R package 3.2.4를 이용하여, 토석류의 유동특성인 유동속도 및 유동깊이와 수로경사, 시료조건에 대한 상관분석 및 분산분석을 수행하였다. 또한, Table 1에 언급한 유동속도 추정식을 적용하여, 각각의 유동저항계수를 추정하고, 평균제곱오차(mean square error, MSE)를 계산하여 각각의 추정식의 재현성을 비교하였다.

Table 2. Composition, volumetric sediment concentration, and density of each mixture.

Mixture type	Water (g)	Clay (g)	Sand (g)	Gravel (g)			No. of sample	Volumetric sediment concentration (%)	Density (kg m^{-3})
				5 mm	8 mm	15 mm			
High viscous	1,800	200	2,000	1,800	2,000	200	20	56.56 ± 1.41	$1,931 \pm 63$
Low viscous	2,700	300	1,000	1,800	2,000	200	20	41.00 ± 1.30	$1,748 \pm 38$

결 과

1. 유동속도 및 유동깊이 추정

수로경사 및 시료조건에 따른 토석류 유동속도와 유동깊이는 Figure 2, Table 3과 같다. 토석류의 유동속도는 수로경사가 증가할수록 빨라지는 경향을 보였으며 ($p\text{-value} < 0.01$), 유동깊이는 반대로 감소하는 경향을 나타내었다($p\text{-value} < 0.01$). 실험에 사용된 시료조건에 따라서는 고점도 시료의 유동속도가 상대적으로 낮게 나타났다($p\text{-value} < 0.01$). 그러나 시료의 점성에 따른 유동깊이의 영향은 통계적으로 명확하게 나타나지 않았다 ($p\text{-value}=0.48$).

2. Froude 수를 통한 상사성 평가

수로실험 결과의 Froude 수는 5.022 ± 1.482 로 나타났다. 일반적으로 토석류의 Froude 수는 매우 넓은 범위를 보이고, 대체로 0~3의 범위를 가지나(Scheidl et al., 2013b), 토석류 사례에 따라서는 Froude 수가 5를 넘는 경우도 있다(Hungr et al., 1984; Pierson, 1985). 한편, 모형실험의 경우 1.2~12의 범위를 주로 보이며(Proske et al., 2011), 자연 사면에서의 대규모 실험을 수행한 Bugnion et al.(2012)은 약 2~6의 범위를 나타내어 이 연구에서 수행한 결과와 유사하였다. 따라서 수로실험을 수행한 선행연구를 고려할 때, 이 연구에서 수행한 수로실험은 토석류 현상에 대한 동역학적 상사를 만족한다고 할 수 있다.

3. 유동저항계수 추정

소형 수로실험 결과를 이용하여 각각의 토석류 유동속

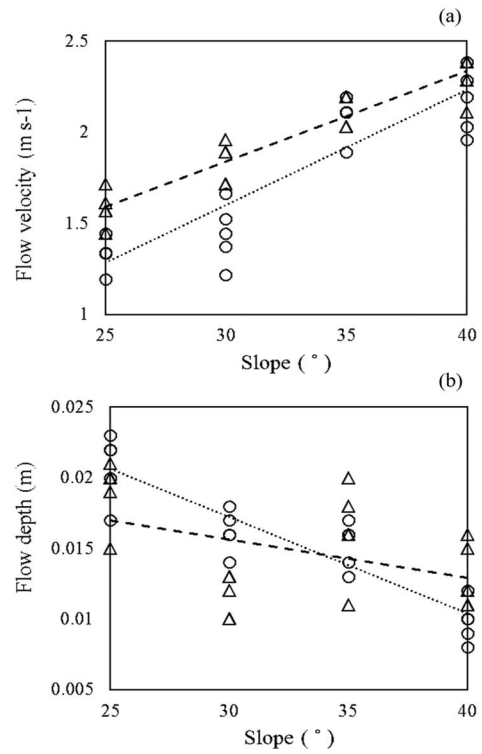


Figure 2. Flow velocity (a) and depth (b) with flume inclination. Circles with dashed trend line indicate results of high viscosity mixture; triangles with dotted trend line represent results of low viscosity mixture.

도 추정식에 대한 유동저항계수와 MSE를 추정한 결과는 Table 4와 같다. 이 연구에서 구한 μ 는 평균 0.5159 Pa s , n 은 평균 $0.0270 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ 로 나타났으며, 이는 선행연구와 비교하여 상대적으로 작게 산정되었으며(Takahashi, 1981;

Table 3. Summary of flow velocity and depth of small-scale flume experiment.

Slope (°)	Flow velocity		Flow depth	
	High viscous	Low viscous	High viscous	Low viscous
25	1.3298 ± 0.0894	1.5808 ± 0.0977	0.0208 ± 0.0024	0.0190 ± 0.0023
30	1.4436 ± 0.1656	1.8338 ± 0.1128	0.0162 ± 0.0015	0.0116 ± 0.0015
35	2.0824 ± 0.1131	2.1288 ± 0.0893	0.0152 ± 0.0016	0.0162 ± 0.0033
45	2.1706 ± 0.1757	2.3092 ± 0.1198	0.0098 ± 0.0015	0.0130 ± 0.0023

Table 4. Summary of flow resistance coefficients

Flow model	Estimated flow resistance coefficient	Mean square error
Newtonian laminar flow (μ , Pa s)	0.5159 ± 0.2699	0.7664
Dilatant flow (ζ , $\text{m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$)	2158.5646 ± 1051.2707	0.8673
Newtonian turbulent flow (n , $\text{m}^{-1/3} \text{ s}$)	0.0270 ± 0.0073	0.1900
Voellmy flow (C_1 , $\text{m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$)	19.3772 ± 4.1349	0.1318

Hungr et al., 1984; Koch, 1998), ζ 는 평균 $2159 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 로 선행연구보다 크게 나타났다(Hungr et al., 1984; Koch, 1998). C_1 는 평균 $19.3772 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 로 선행연구에서 제시된 값과 유사하지만, 그 범위는 더 넓게 나타났다(Scheidl et al., 2013a). 유동저항계수를 적용하여 산정한 유동속도의 MSE는 상대적으로 C_1 이 가장 낮은 값을 보여, 다른 유동저항계수에 비해 관측 결과의 재현에 유리한 것으로 나타났다.

고찰

1. 토석류의 유동특성

토석류의 유동속도는 수로의 수로경사가 급해질수록 빨라지고, 시료의 점성이 높아질수록 느려지는 것으로 나타났다. 수로경사 증가에 따른 유동속도의 증가는 선행연구에서도 공통적으로 나타나는 현상으로(Koch, 1998; Iverson et al., 2010), 경사가 급해질수록 중력에 의한 토석류의 관성력이 증가하기 때문이다(Iverson et al., 2010). 또한, 토석류 시료의 점성이 높을수록 토석류 시료의 전단저항이 강하게 나타나기 때문에(Iverson et al., 2010), 고점성 조건의 시료가 저점성 조건의 시료보다 느린 속도로 이동하였다.

수로의 경사가 증가함에 따라서 유동깊이가 감소하는 것은 Fairfield(2011)의 연구결과와 잘 일치하였으며, 이는 낮은 경사에서는 유동속도가 감소하고, 수로 바닥면

의 마찰이 상대적으로 증가하여 토석류 시료가 흐름 방향으로 길게 퍼지지 못하기 때문이다(Hungr, 2000; Iverson et al., 2010). 한편, 시료의 점성에 따른 유동깊이의 변화는 높은 점성에서 더 큰 유동깊이를 보인 선행 연구와 다른 결과를 보였다(Fairfield, 2011). 이는 8 m에 달하는 Fairfield(2011)의 실험수로의 길이에 비해 2 m 정도의 수로깊이를 가지는 소형 수로실험에서는 흐름이 충분히 발달하지 못하여 시료의 특성 차이로 인한 유동깊이 변화가 잘 나타나지 않기 때문이다. 대부분의 연구에서 유동깊이는 경험적으로 추정하며, 유동깊이에 대한 이론적 해석을 수행한 Rickenmann(1999)은 최대 유출량이 유동깊이를 결정하는 중요한 요인이라고 하였다. 따라서 유동깊이의 변화를 파악하기 위해서는 보다 큰 규모의 수로에서 다양한 조건의 실험이 수행되어야 할 것이다.

2. 유동저항계수의 적용

수로실험에서 얻은 유동저항계수는 선행연구(Takahashi, 1981; Hungr et al., 1984; Koch, 1998)의 연구 결과와는 차이를 보이기 때문에, 이를 다양한 조건의 토석류 현상에 직접 적용하기 어렵다. Rickenmann(1999)은 수로실험 결과와 실제 토석류 사례를 분석하여 토석류의 규모에 따라 유동저항계수가 다르게 나타날 수 있음을 지적하였다. 따라서, 토석류의 흐름 규모를 고려하여, 선행연구 결과(Pierson, 1985; García Aragón, 1996; Bugnion et al., 2012)와 이 연구결과를 함께 비교하여 분석하였다(Figure 3).

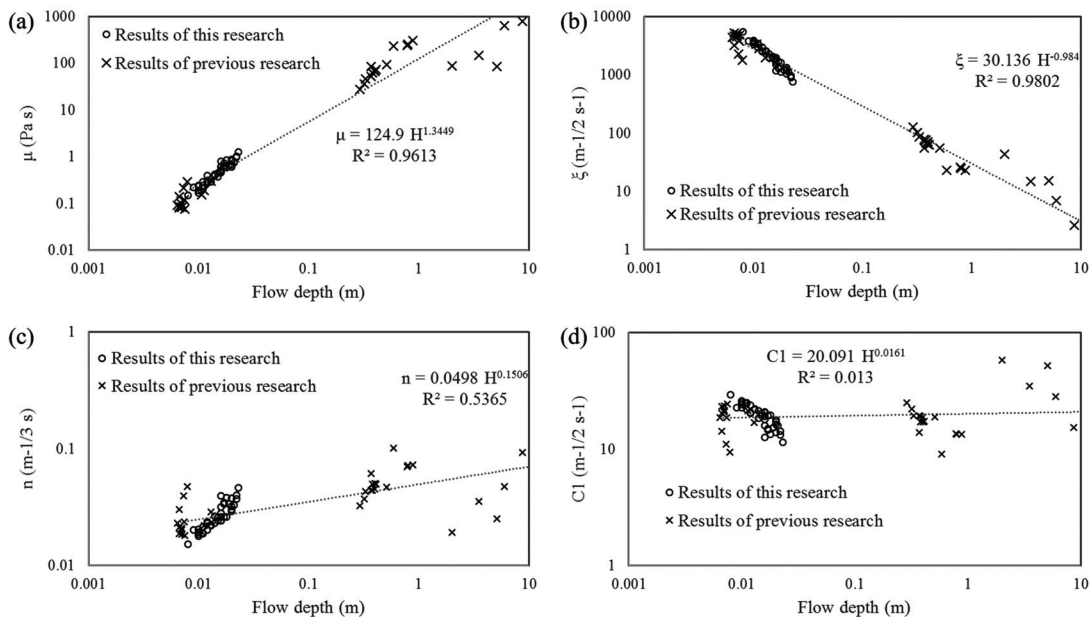


Figure 3. Comparison of back calculated flow resistance coefficients on flow depth of debris flow developments and experiments: (a) Newtonian laminar flow model, (b) Dilatant flow model, (c) Newtonian turbulent flow model, and (d) Voellmy flow model.

유동저항계수 중에서 μ , ζ , n 은 토석류 현상의 유동깊이 규모에 유의하게 반응하는 것으로 나타났고(p -value < 0.01), C_1 은 유동깊이에 유의한 차이를 보이지 않았다(p -value = 0.32). Rickenmann(1999)은 충분한 유변학적 정보가 제공되지 않는 조건에서 평균적인 토석류 흐름특성을 파악하기 위하여 토석류 유동속도 추정식을 사용한다고 하였다. 따라서, 토석류의 규모에 따라 유동저항계수가 다르게 나타나는 것은 토석류 유동속도 추정식에 이용되는 변수들이 흐름 내부에서 상호 작용하여 도출된 평균적인 값이기 때문이다.

소형 수로실험을 통해 추정된 유동저항계수 중에서 C_1 은 토석류 규모에 따른 민감도가 가장 낮게 나타났다. 실제 토석류 발생사례 및 수로실험 결과를 종합하여 계산된 C_1 은 $20.19 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 로 나타났다. 이는 Rickenmann(1999)이 이론적인 차원 분석을 실시하여 토석류의 유출량 규모에 관계없이 $C_1=20 \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 로 추정된 것과 유사하였다.

유동저항계수와 유동깊이의 상관관계를 고려할 때, 토석류 유동속도는 C_1 과 같이 유동깊이에 따른 민감도가 가장 낮은 유동저항계수를 활용하는 것이 좋다. 이는 실제 토석류 사례에서는 계류하상의 침식과 퇴적이 반복하여 발생하므로 유동깊이를 정확히 조사하기 어렵기 때문에(Iverson, 2015), 민감한 유동저항계수를 활용하여 유동속도를 추정할 경우, 유동깊이의 측정 지점과 오차에 따라서 유동속도를 과대 혹은 과소하게 추정할 수 있다. 따라서, 토석류의 유동속도 추정에는 다른 유동저항계수에 비해 유동깊이 추정에 따른 오차의 영향이 상대적으로 적게 나타나는 C_1 을 이용하는 것이 적절하며, 이를 바탕으로 토석류 피해 규모를 사전에 예측하여 사방구조물을 설계하는 데 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다.

결론

이 연구에서는 소형 수로실험을 통해 토석류 유동 현상을 모의하고, 유동특성에 대한 분석을 통해 유동속도 추정식의 유동저항계수를 산정하였다. 유동속도는 수로경사가 급해질수록, 시료의 점성이 감소할수록 증가하였다. 유동깊이는 수로경사가 급해짐에 따라 감소하는 경향을 보였지만, 시료의 점성조건에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

유동저항계수는 서로 다른 토석류 유동모형을 바탕으로 μ , ζ , n , C_1 을 선정하였다. 유동저항계수 중에서 C_1 이 비교적 실험 결과를 잘 재현하였다. 또한, 실제 토석류 사례와의 비교를 통해 유동깊이에 따른 유동저항계수의 변화를 분석한 결과, C_1 은 유동깊이에 상대적으로 영향

을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 다양한 발생규모의 토석류에 대한 유동속도 추정에 C_1 을 보편적으로 적용할 수 있을 것이다.

이 연구에서 도출한 유동저항계수는 토석류 발생시 예상되는 유동속도를 사전에 파악하고 토석류 충격력을 계산하여 사방구조물을 설계하는 기초자료로 활용할 수 있을 것이다. 그러나 실제 토석류는 유체물성, 지형조건에 따라 유동특성이 다양하게 나타날 수 있다. 특히 산지 계류의 계상의 마찰과 유출토사량을 고려한 유동특성이 고려되어야 한다. 산지 계류의 하상은 다양한 크기의 하상재료로 인한 마찰이 작용하기 때문에, 소형수로 바닥면에 인위적인 마찰을 주기 위한 처리를 하기도 한다. 그러나 이 연구에서 사용한 실험 장치의 한계로 인해 폴리카보네이트 표면을 그대로 활용하여 실제 현장에서 발생하는 하상의 마찰을 반영하지 못하였다. 또한, 실험에 사용된 시료의 총량은 모의하고자 하는 토석류 현상의 유출토사량을 산정하여 선정되어야 하나, 수로에 적재 가능한 시료량의 한계로 인해 실제 토석류의 유출량을 현실적으로 반영하지 못하였다. 따라서 이 연구에서 얻은 결과를 실제 현장설계에 활용하기 위해서는 보다 많은 토석류 사례에 대한 조사와 비교 평가를 통한 보완 작업이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 ‘토석류 충격력의 해석적 분석(II)’와 산림청(한국임업진흥원) ‘산림과학기술 연구개발사업(2017061B10-1719-AB01)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- Bugnon, L., McArdell, B., Bartelt, P. and Wendeler, C. 2012. Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. *Landslides* 9(2): 179-187.
- Eu, S., Im, S., 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.
- Fairfield, G. 2011. Assessing the dynamic influences of slope angle and sediment composition on debris flow behaviour: An experimental approach. (Dissertation). Durham. Durham University.
- García Aragón, J.A. 1996. A hydraulic shear stress model for rapid, highly concentrated flow. *Journal of Hydraulic Research* 34(5): 589-596.

- Hungr, O. 2000. Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow. *Earth Surface Processes and Landforms* 25(5): 483-495.
- Hungr, O., Evans, S., Bovis, M. and Hutchinson, J. 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience* 7(3): 221-238.
- Hungr, O., Morgan, G. and Kellerhals, R. 1984. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures. *Canadian Geotechnical Journal* 21(4): 663-677.
- Iverson, R.M. 2015. Scaling and design of landslide and debris-flow experiments. *Geomorphology* 244: 9-20.
- Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G. and Berti, M. 2010. The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 115: F03005.
- Jakob, M. and Hungr, O. 2005. Debris-flow hazards and related phenomena. Springer. Berlin. pp. 736.
- Koch, T. 1998. Testing various constitutive equations for debris flow modelling. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences* 248: 249-258.
- Koo, R.C.H., Kwan, J.S.H., Ng, C.W.W., Lam, C., Choi, C.E., Song, D. and Pun, W.K. 2016. Velocity attenuation of debris flows and a new momentum-based load model for rigid barriers. *Landslides* 14(2): 617-629.
- Parsons, J.D., Whipple, K.X. and Simoni, A. 2001. Experimental study of the grain-flow, fluid-mud transition in debris flows. *The Journal of Geology* 109(4): 427-447.
- Pierson, T.C. 1985. Initiation and flow behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy river lahars, Mount St. Helens, Washington. *Geological Society of America Bulletin*. 96(8): 1056-1069.
- Prochaska, A.B., Santi, P.M., Higgins, J.D. and Cannon, S.H. 2008. A study of methods to estimate debris flow velocity. *Landslides* 5(4): 431-444.
- Proske, D., Suda, J. and Hübl, J. 2011. Debris flow impact estimation for breakers, *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 5(2): 143-155.
- Rickenmann, D. 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural hazards* 19(1): 47-77.
- Scheidl, C., Rickenmann, D. and McArdeell, B.W. 2013a. Runout prediction of debris flows and similar mass movements. pp. 221-229. In: *Landslide Science and Practice*. Springer. Berlin.
- Scheidl, C., Chiari, M., Kaitna, R., Mullegger, M., Krawtschuk, A., Zimmermann, T. and Proske, D. 2013b. Analysing debris-flow impact models, based on a small scale modelling approach. *Surveys in Geophysics* 34(1): 121-140.
- Takahashi, T. 1981. Debris flow. *Annual review of fluid mechanics* 13(1): 57-77.
- Takahashi, T. 2014. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. CRC Press/ Balkema. Leiden. pp. 551.

(Received: October 18, 2017; Accepted: November 20, 2017)