



# 토석류 전파에 미치는 연행의 영향

## Entrainment Effect on Debris Flow Propagation

정석일\* · 김홍택\*\* · 송창근\*\*\* · 이승오\*\*\*\*

Jeong, Seokil\* , Kim, HongTaek\*\* , Song, Chang Geun\*\*\* , and Lee, SeungOh\*\*\*\*

### Abstract

Owing to recent increases in damage from debris flows, many studies have been conducted to analyze the propagation of these flows. Of the many factors that affect the behavior of debris flows, entrainment is one of the most influential factors on their propagation. Therefore, in this study, entrainment analysis has been conducted to more accurately identify the characteristics of a debris flow. Following the results of McDougall and Hungr (2005), the entrainment relationship was embedded in a shallow water equation, and the Urban Debris Simulator (UDS) was extended. Verification and calibration were next performed through comparison with the experimental results of the United States Geological Survey (USGS). The results of the propagation distance according to the entrainment showed that a larger entrainment rate is related to a longer propagation distance. However, when entrainment was considered for the same volume, it was confirmed that the propagation length was shorter than that when entrainment was not considered.

**Key words** : Debris Flow, Propagation, Entrainment, UDS

### 요 지

최근 토석류에 대한 피해 증가로 정확한 토석류 예측에 대한 연구들이 많이 진행되고 있다. 토석류의 거동에 영향을 주는 많은 요소들이 있지만, 연행(Entrainment)은 토석류 거동에 직접적인 영향을 주는 인자이다. 이에 본 연구에서는 정확한 토석류 전파 특성 분석을 위해 연행에 대한 연구를 수행하였다. McDougall and Hungr (2005)의 연구 결과를 이용하여 토석류 연행을 재현하였으며, USGS 실험 결과와의 비교분석을 통해 검증 및 보정을 수행하였다. 연행 변화에 따른 전파거리 분석결과 연행이 클수록 전파거리가 길어짐을 보였다. 그러나 동일한 부피에 대하여 연행이 고려되었을 경우, 그렇지 않았을 경우에 비하여 전파거리가 짧아지는 것으로 확인되었다. 추후 관성력 변화에 대한 전파거리 변화 양상을 검토하여, 순수 연행과 토석류 전파 특성과의 관계를 도출할 것이다.

**핵심용어** : 토석류, 전파, 연행, UDS

## 1. 서 론

토석류의 거동은 복잡하며, 정확한 예측을 위해서는 다양한 인자들을 고려해야 한다. 토석류의 고유 물성치인 점성, 와점성, 밀도 및 구성비(자갈과 유사 비율) 등과 토석류의

양, 바닥과의 마찰 및 나무, 바위 등의 저항, 그리고 침식 등이 이에 해당된다. 이러한 요소들은 토석류의 초기발생량에 영향을 줄 수도 있으며, 유하하는 속도에 영향을 주기도 한다. 침식의 경우 침식된 토사가 토석류에 포함되어 운동량의 변화를 가져오기도 한다. 이러한 요소들은 토석류의 전파

\*정회원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: suhibb@gmail.com)  
Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Hongik University

\*\*정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수(E-mail: htaek@hongik.ac.kr)  
Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

\*\*\*정회원, 인천대학교 안전공학과 교수(E-mail: baybreeze119@inu.ac.kr)  
Member, Professor, Department of Safety Engineering, Incheon National University

\*\*\*\*교신저자, 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-2-325-2332, Fax: +82-2-325-2332, E-mail: seungoh.lee@hongik.ac.kr)  
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

거리에 영향을 주게 되는데, 전파거리는 토석류의 피해정도를 결정짓는 중요한 요소이다. Rickenmann (2005)은 Swiss Alps 지역으로부터 취득한 자료를 이용하여 전파거리 대한 분석을 수행하였으며, 토석류의 양과 토심을 주요 변수로 사용하였다. 분석결과 장애물이 없고 V모양의 협곡을 통해 흘러온 토석류의 전파거리가 더 길어지는 것으로 확인되었으며, Eq. (1)과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$L = 1.9 V^{0.16} H^{0.83} \quad (1)$$

여기서, L은 전파길이(m), H는 토석류 토심(m), V는 토석류의 양( $m^3$ )이다. Turnbull et al. (2005)은 토석류 전파거리 분석에 있어서 낙차높이(drop height)를 주요 인자로 파악한 연구를 수행하였다(Fig. 1 참고).

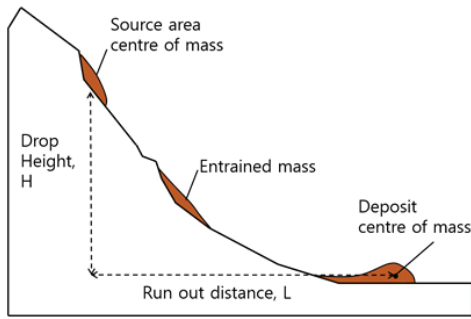


Fig. 1. Schematic Diagram of a Debris Flow Path (Turnbull, B et al., 2015)

Lee et al. (2015)은 흐름 경사면의 경사도에 따른 전파거리 길이를 분석하였으며, Kim et al. (2013)은 FLO-2D를 이용하여 우면산의 토석류에 대한 전파거리를 분석하였다. 이러한 전파거리는 토석류의 운동량 크기에 따라 다르게 나타나며, 결국 전파거리 분석을 위해서는 토석류의 운동량 변화를 먼저 파악할 필요가 있다. 운동량은 질량과 유속의 곱으로 표현되기 때문에, 토석류의 질량 즉 부피의 변화는 전파거리에 직접적인 영향을 주게 된다. 토석류의 부피는 초기 발생량에 영향을 받으며, 또한 연행(Entrainment)으로 인해 증가할 수도 있다. 연행은 토석류가 경사면을 흐를 때, 바닥과의 밀도차이, 복잡한 흐름 형태 등으로 바닥이 침식되고, 그 침식된 토사가 토석류에 함유되는 현상을 말한다. 이러한 현상에 의해 운동량과 같은 토석류의 물리적인 특성은 변화하게 되며, 토석류의 피해범위와 직접적인 연관이 있는 전파 거리에 영향을 줄 가능성이 크다. Takahashi and Nakagawa (1991)는 연행에 대해 평형상태(equalilibrium) 경사면 실험을 통한 식을 제시하였고, Schurch et al. (2011)은 토석류로 인한 침식과 퇴적에 대한 연구를 수행하였으며, PARAMount (2012)는 토석류 예측에 대한 가이드라인 및 연행현상에 대한 명확한 정의를 결정하였다. Papa et al. (2004)은 일련의

실험을 통해 토석류의 메커니즘과 연행에 대한 식을 제시하였고, Pirulli and Pastor (2012)은 모형 시험과 수치해석을 병행하여 토석류 연행에 대한 연구를 수행하였다. McCoy et al. (2012)는 다양한 관측자료와 실제 토석류를 분석하였으며, 이러한 연구를 토대로 수치해석을 보정하고 수행하여, 토석류 입자에 대한 분석을 수행하였다. McDougall and Hungr (2005)는 Takahashi and Nakagawa (1991)의 연구를 바탕으로 토석류의 총량을 이용하여, 침식량을 결정하였고, 토석류에 함유되는 평균증가(average growth rate)를 제시하였다. 본 연구에서는 UDS (Urban Debris flow Simulator; Song et al., 2017)에 기존의 토석류 연행 관련 중에서 정확성이 입증되었으며, 비교적 적용성이 용이한 McDougall and Hungr (2005)의 연구결과를 접목하여 토석류의 연행을 재현하였으며, 기존 연구에서 수행하지 않았던 연행으로 인한 토석류의 운동량 변화가 토석류의 전파에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 수치해석 모델

### 2.1 UDS (Urban Debris flow Simulator)

UDS는 2차원 유동모델로 기존의 토석류해석 프로그램의 한계점을 보완하였다. 다양한 형태의 격자사용이 가능하며 복잡한 구조물 및 지형 재현이 가능하며, 토석류 방향성에 대한 자유도가 크게 증가하였다. 또한 여러 형태의 전단응력 모델 및 경계조건 사용이 가능하여 현장 적용성 및 사용성을 증대시켰다(Lee et al., 2017). 지배 방정식은 Eqs. 2 및 3과 같이 연행 기작을 고려한 항이 추가된 확장형 천수방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + u_j \frac{\partial h}{\partial x_j} = - \frac{\partial b}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g \frac{\partial H}{\partial x_i} - g \frac{\partial h}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\tau_b}{\rho h} \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 토심,  $u_i$ 는  $i$ 방향 유속,  $\partial b/\partial t$ 는 연행률,  $H$ 는 바닥 높이,  $\rho$ 는 토석류 밀도,  $\nu$ 는 동점성계수,  $\tau_b$  바닥전단응력이다.  $\tau_b$ 는 물과 토석류 흐름 특성을 구분하는 가장 큰 특성 중의 하나로 이에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 적용성이 비교적 뛰어난 Coulomb shear stress를 이용하였다(Eq. 4 참조).

$$\tau_b = \rho g h \cos \theta \tan \theta_b \quad (4)$$

여기서,  $\theta$ 는 바닥면경사이고,  $\theta_b$ 은 내부 마찰각도이다. 내부 마찰각도는 점토에서는  $0^\circ$ 이며, 모래에서는  $30\sim 40^\circ$ 이다. 수

치해석의 안정성 확보를 위해 Petrov-Galerkin 방법을 적용한 SU/PG 기법이 사용되었다.

## 2.2 연행

McDougall and Hungr (2005)는 Takahashi and Nakagawa (1991)가 제시한 연행 방정식을 기본으로하여, 연행으로 인한 토석류의 증가율을 제시하였다. Takahashi and Nakagawa (1991)의 연행방정식은 다음 Eqs. (5-1) 및 (5-2)와 같다.

$$\begin{aligned} \rho h \frac{\partial v_x}{\partial t} &= \rho h g_x + k_x \sigma_z \left( -\frac{\partial h}{\partial x} \right) \\ &+ k_{xy} \sigma_z \left( -\frac{\partial h}{\partial y} \right) + \tau_{zx} - \rho v_x \frac{\partial b}{\partial t} \end{aligned} \quad (5-1)$$

$$\begin{aligned} \rho h \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \rho h g_y + k_y \sigma_z \left( -\frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ &+ k_{xy} \sigma_z \left( -\frac{\partial h}{\partial x} \right) + \tau_{zy} - \rho v_y \frac{\partial b}{\partial t} \end{aligned} \quad (5-2)$$

여기서,  $x$ 는 길이방향(흐름방향) 좌표,  $\rho$ 는 토석류의 bulk density,  $h$ 는 토석류의 토심,  $v$ 는 토석류 유속,  $g$ 는 중력가속도,  $\tau$ 는 전단응력,  $b$ 는 수직 침식 깊이,  $k_x$ ,  $k_{yx}$ ,  $k_y$  및  $k_{xy}$ 는 응력 계수들이고,  $\sigma_z$ 는 바닥 수직 응력의 합인  $\sigma_z = \rho h (g \cos \theta + a_z)$ 이다. 시간에 따른 바닥의 침식은 연행률( $\partial b / \partial t$ )로 정의되어, 토석류에 흡수되는 바닥 물질의 양을 결정하게 된다. 침식률을 결정하는 인자는 경사, 밀도, 유속이 있으며, Takahashi (2014)는 다음과 같이 침식률을 정리하였다.

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \alpha v \frac{C_e - C}{C_* - C_e} \frac{h}{d} \left( \text{for } \frac{\partial b}{\partial t} \geq 0 \right) \quad (6-1)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \beta u \frac{C_e - C}{C_* - C_e} \frac{h}{d} \left( \text{for } \frac{\partial b}{\partial t} < 0 \right) \quad (6-2)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 실험 계수이며,  $C_e$ 는 바닥경사와 관계있는 유사의 평형상태 농도이다.  $C_*$ 는 바닥의 유사 농도이며,  $C$ 는 토석류의 유사농도이고,  $d$ 는 토석류 유사 입경이다. McDougall and Hungr (2005)는 Takahashi 연구를 토대로 연행으로 인한 토석류 양의 증가율(연행률)에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같이 제시하였다.

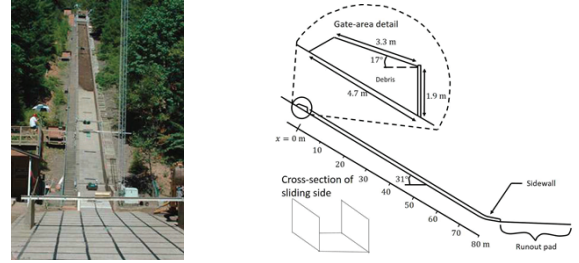
$$\partial b / \partial t = \bar{E} h v \quad (7)$$

$$\bar{E} = \ln(V_f / V_0) / \bar{S} \quad (8)$$

여기서,  $\bar{E}$ 는 토석류의 연행률,  $V_0$ 는 토석류의 초기량,  $V_f$ 는 토석류의 총량이며,  $\bar{S}$ 는 수로의 길이이다. 만약  $\bar{E} = 0.01 m^{-1}$  경우, 토석류 증가량이 m당 1%가 된다.

## 3. UDS 검증

전파거리에 대한 UDS의 정확도 검증을 위해 USGS 실험을 재현(Iverson et al. 2011)하고, 그 결과를 비교분석하였다. Fig. 2는 USGS 실험 수로의 모습이다. 수로의 길이는 80 m이며, Fig. 2(b)의 개념도에서 보듯이 초기 토석류의 형상을 사다리꼴 형태로 만든 후 수로를 통해 자연유하시켰다.



(a) USGS experimental flume (b) Conceptual diagram of USGS experimental channel

Fig. 2. USGS Experimental Channel (Iverson et al., 2011)

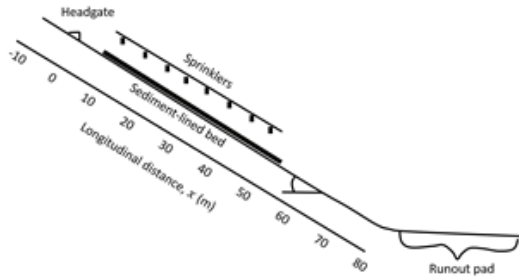
USGS 실험을 분석하여, UDS 수치해석의 범위를 결정하였으며, 전단응력의 주요인자인 Coulomb의 내부마찰각에 대해서는 Mangeney et al. (2000)에 의하면 Coulomb의 내부마찰각이 바닥경사각보다 큰 경우 Coulomb의 마찰곡선식에 불연속 점이 생기고, 해석적인 어려움이 있다는 연구를 참고하여, 본 연구에서는 USGS 실험 수로 바닥경사인  $31^\circ$  보다 작인 내부 마찰각을 고려하였고, 실험결과와 비교하여 오차가 최소가 되는 값인  $3^\circ$ 로 결정하였다. Table 1은 Coulomb angle 값을 결정하는 과정을 정리한 것이다.

Table 1. Error According to Coulomb Angle

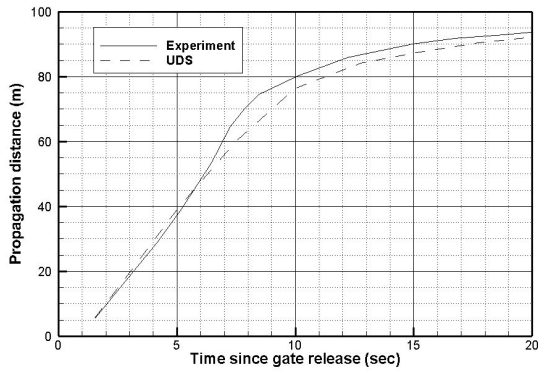
Coulomb angle ( $\theta$ )	Length (m)	Velocity (m/s)	Average error (%)
1.0	31.97	9.06	22.88
2.0	28.95	8.73	7.94
3.0	25.93	8.42	6.70
4.0	24.922	7.84	15.92
5.0	23.91	7.60	23.61

Reid et al. (2011)과 Iverson (2011, 2012)의 연구에서는 USGS 실험 수로의 6~53 m 구간에서 0.1 cm의 바닥침식을 보여주고 있으며, 이 양을 McDougall and Hungr (2005)의 연행률로 환산하면,  $0.02 m^{-1}$ 로 결정된다. 이 값을 사용하여 USGS의 다른 실험을 재현한 결과 토석류의 유속이 8 m/s로 나타났으며, 이는 실험 결과와 동일한 값이었다. 또한 시간변화에 따른 전파거리 양상이 실험결과와 평균적인 오차가 약 3%로 계산되어(Fig. 3 참고), 연행이 포함된 토석류의 흐름이 UDS를 통해 정확하게 재현된다고 판단된다. 본 논문에서는

연행이 고려된 토석류의 전파거리에 대한 검증은 수행하였으며, 기타 처오름 높이 등 UDS의 토석류의 거동 특성에 대한 검증은 Lee and Song (2017)에 자세히 기술되어 있다.



(a) The concept of Reid (2011) and Iverson (2011, 2012); 6~53m section is the movable phase



(b) Comparison with experimental results (Reid et al., 2010) and UDS numerical analysis

Fig. 3. Entrainment Experimental Channel

## 4. 수치해석

### 4.1 수치해석 조건

토석류의 재료적 특성은 USGS 실험에서 제시하였거나, 검증과정에서 보정을 수행한 값을 사용하였다. Table 2는 수치해석에 사용된 토석류의 물리적 특성값들을 정리한 것이다.

Table 2. UDS Simulation Input Data

Input	Value
Density	1,835 kg/m <sup>3</sup>
Kinematic eddy viscosity	8.0 m <sup>2</sup> /s
Coulomb angle	3.0 °

수치해석 지형은 실제 국내의 일반적인 산지 지형 및 USGS 실험 수로를 바탕으로 Fig. 4와 같이 설계하였으며, 계곡의 형상을 가정하여 경사부의 횡단모양은 V자 형태로 결정하였다. 초기 토석류의 양은 4,000 m<sup>3</sup>이었으며, 연행률은 0.01 ~ 0.05 m<sup>-1</sup> 범위에서 변화를 주었다. Kinematic eddy

viscosity는 Eq. (3)의  $\nu$ 에 해당하며, 3차원 Navier-Stokes 방정식을 수심평균과 시간평균하는 과정에서 Reynolds 응력 개념 도입에 따라 점성계수는 유체의 특성이 아닌, 흐름 특성으로 그 성질이 바뀌게 되고, 수치모의 시 유속, 경사, 수심, 계산시간간격에 따라 결정되는 매개변수이다. 특히 토석류 모의시에는 Pseudo-equivalent eddy viscosity의 속성을 가지게 된다.

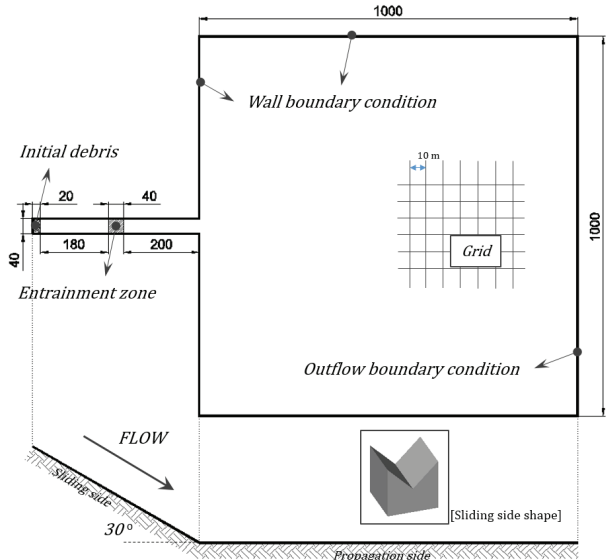


Fig. 4. UDS Simulation Channel (unit: m)

### 4.2 연행 변화에 따른 토석류의 전파거리 변화

토석류의 전파거리는 토석류로부터 받는 피해의 규모와 직접적으로 연관되는 중요한 요소이다. 일반적으로 토석류의 양이 많아질수록 토석류의 전파거리는 길어지는데, 토석류의 양 증가는 운동량 증가로 연결되기 때문이다. 본 연구에서는 연행률을 변화시키면서 전파거리 변화를 살펴보았으며, 연행이 없는 경우도 같이 모의하여, 비교하였다. Fig. 5는 수치해석 결과를 도시한 것이다.

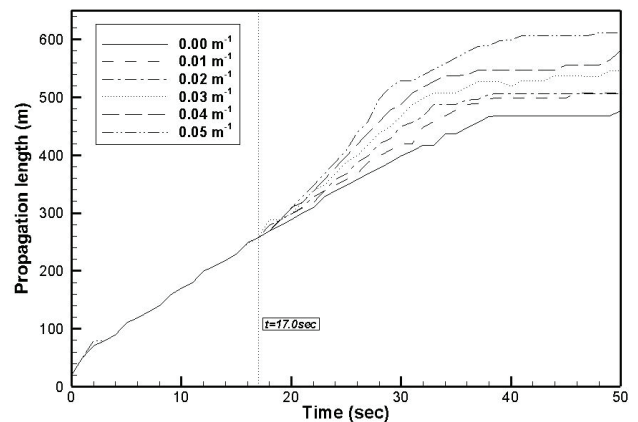


Fig. 5. Changes in the Propagation Distance of Debris with Entrainment Rate



Fig. 5는 일정시간이 경과하면, 연행률이 전파거리에 영향을 준다는 것을 명확하게 보여준다. 연행구간이 초기 토석류 발생지점으로부터 일정거리가 떨어져 있었기 때문에, 그림에서 보는 바와 같이 17 ~ 18초 구간에서는 모든 곡선들이 일치하였고 이후 증가하였는데, 연행률이 증가하면서 토석류의 부피가 증가하였고, 이에 따라 운동량도 커졌기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 분석으로는 토석류의 흐름에 대해 연행이 미치는 영향을 정확하게 분석하기가 쉽지 않다. 그 이유는, 연행률의 증가가 토석류의 체적 증가로 연결되기 때문에, 연행만의 영향으로 인한 토석류 전파거리 변화가 아니라, 토석류의 부피변화에 따른 전파거리 변화 가능성도 있기 때문이다. 이에 본 연구에서는 다양한 초기 토석류량(4,000 ~ 8,000 m<sup>3</sup>)과 연행률에 대한 수치해석을 추가로 수행하였다.

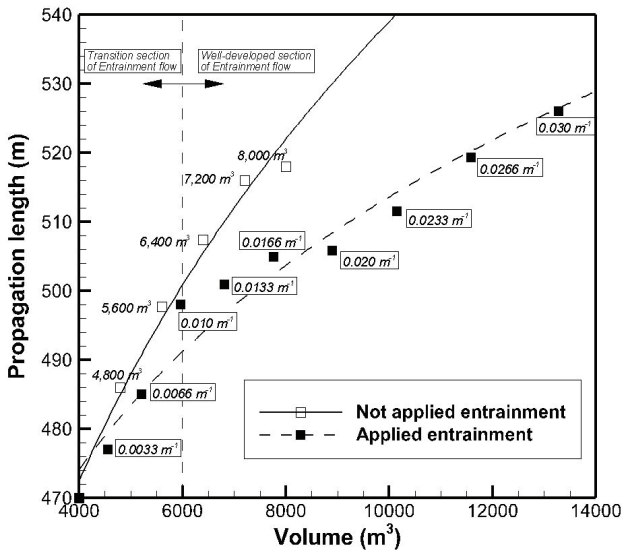


Fig. 6. Comparison of Propagation Distance with Debris Volume and Entrainment Rate

Fig. 6은 연행이 고려가 되지 않은 경우와, 고려된 경우에 대한 수치해석 결과를 보여준다. 토석류의 부피 증가에 따른 전파거리 양상은 지수 형태로 나타나며, 이는 Lee et al. (2015)의 결과와 동일하다. 그림에서 보듯이 동일한 토석류 부피에서 연행이 고려되었을 경우 연행이 고려되지 않은 경우보다 전파거리가 약 2~3 % 가량 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 토석류가 사면을 따라 유하하면서 연행이 발생하는데, 이 때 연행으로 인하여 토석류에 흡수되는 토사들이 저항력으로 작용하기 때문에, 토석류의 부피증가와와는 반대로 유속감소로 인한 운동량의 감소가 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7은 이러한 현상에 대한 개념도로서, 연행으로 인한 저항력이 토석류의 마찰방향과 동일함을 보여주고 있다.

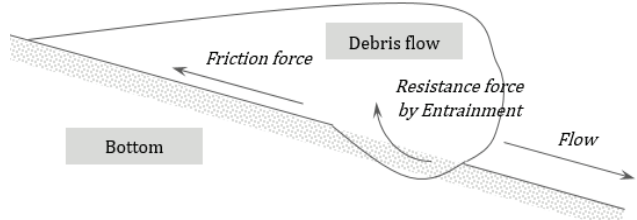


Fig. 7. Concept of Resistance Generated by Entrainment

현재까지 동일한 토석류 발생량에 대해 연행의 유무에 따른 전파거리를 분석한 연구는 없으나, Figs. 2(연행 미고려)와 3(연행 고려)으로 대표되는 USGS의 실험결과를 확인하였을 때, 동일한 토석류량에서 연행이 고려되지 않았을 경우가 고려되었을 경우보다 전파거리가 약 3~5 m 정도 증가되는 것으로 파악되었다. 따라서 연행으로 인한 토석류의 운동량 감소가 전파거리를 감소시킨다는 본 연구의 전체적인 가정이 확인되었다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 연행이 토석류의 흐름(전파거리)에 미치는 영향에 대해 분석하였다. McDougall and Hungr (2005)의 연구결과를 UDS에 접목시켜 연행을 재현하였으며, USGS 실험을 고려하여 수치 모델링을 수행하였다. 수치해석 결과는 연행이 증가할수록 전파거리가 증가하였는데, 이는 토석류의 부피 증가로 인한 운동량 증가에 기인한다고 판단하였다. 연행을 유일한 변수로 하여 토석류의 전파거리를 분석하기 위해 추가적인 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 동일한 부피의 토석류일 경우 연행이 고려되었을 때가 고려되지 않았을 경우와 비교하여 전파거리가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 바닥의 토사가 연행되면서 추가로 저항력이 발생하였기 때문이며, 이로 인하여 토석류의 운동량이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 연행이 고려되었을 경우와 그렇지 않은 경우 동일한 부피 재현을 위해 초기조건에서는 그 양의 차이가 발생하게 되며, 이러한 차이는 관성의 차이로 나타날 가능성이 있다. 또한 본 연구에서 보정계수로 선택된 Colomb의 내부마찰각도는 일반적인 토석류가 갖는 값에 비하여 작게 결정되었는데, 이는 수치해석의 원활한 수행을 위해 선택될 수 밖에 없었다. 향후에는 이러한 문제점을 개선하고, 관성력과 전파거리에 대한 분석을 수행할 예정이며, 본 연구에서 제시한 결과를 보정하고 순수한 연행이 전파거리에 미치는 영향을 도출할 것이다. 본 연구결과는 연행이 고려되었을 때, UDS가 토석류의 전파거리를 합리적으로 재현한다는 것을 보여주었다고 판단된다. 향후 토석류 전파 및 피해에 대한 정확한 예측이 필요한 경우, 또는 구조적인 대책 수립 시 UDS가 일조할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 성과는 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A2B2011990).

## References

- Iverson, R.M. (2012). Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 117, Issue F3, Article No. F03006.
- Iverson, R.M., Reid, M.E., Logan, M., LaHusen, R.G., Godt, J.W., and Griswold, J.P. (2011). Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment. *Nature Geoscience*, Vol. 4, pp. 116-121.
- Kim, S.E., Paik, J.C, and Kim, K.S. (2013). Run-out modeling of debris flows in Mt. Umyeon using FLO-2D. *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 965-974.
- Lee, J.S., Song, C.G., Kim, H.T., and Lee, S.O. (2015). Risk analysis considering the topography characteristics of debris flow occurrence area. *J. Korean Soc. Harzard Mitig.*, Vol. 15, No. 3, pp. 75-82.
- Lee, S.O., and Song, C.G. (2018). Influence of flow resistance stresses on debris flow runout. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 77, Article No. 426.
- Mangeny, A., Heinrich, P., and Roche, R. (2000). Analysis solution for testing debris avalanche numerical models. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 157, Issue 6-8, pp. 1081-1096.
- McCoy, S.W., Kean, J.W., Coe, J.A., Tucker, G.E., Staley, D.M., and Wasklewicz, T.A. (2012). Sediment entrainment by debris flows: In situ measurements from the headwaters of a steep catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 117, Issue F3, Article No. F03016.
- McDougall, S., and Hungr, O. (2005). Dynamic modelling of entrainment in rapid landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 5, pp. 1437-1448.
- Papa, M., Egashira, S., and Itoh, T. (2004). Critical conditions of bed sediment entrainment due to debris flow. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 4, No. 3, pp. 469-474.
- PARAMount Project Team. (2012). *Decision support guidelines: Methods, procedures and tools developed in PARAMount*. Alpine Space Project PARAMount, WP7.
- Pirulli, M., and Pastor, M. (2012). Numerical study on the entrainment of bed material into rapid landslides. *Géotechnique*, Vol. 62, No. 11, pp. 959-972.
- Reid, M.E., Iverson, R.M., Logan, M., LaHusen, R.G., Godt, J.W., and Griswold, J.P. (2011). Entrainment of bed sediment by debris flows: Results from large-scale experiments. In R. Genevois, D.L. Hamilton, and A. Prestinzi (Eds.), *Fifth International Conference on Debris-flow Hazards: Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment* (pp. 367-374), Italian Journal of Engineering Geology and Environment Book Series, Casa Editrice Universit? La Sapienza.
- Rickenmann, D. (2005). Runout prediction methods. In M. Jakob and O. Hungr (Eds.), *Debris-flow hazards and related phenomena* (pp. 305-324). Springer Berlin Heidelberg.
- Schürch, P., Densmore, A.L., Rosser, N.J., Lim, M., and McArdeell, B.W. (2011). Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: Application to the Illgraben debris-flow channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 36, No. 14, pp. 1847-1859.
- Takahashi, T., and Nakagawa, H. (1991). Prediction of stony debris flow induced by severe rainfall. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 44, No. 3, pp. 12-19.
- Takahashi, T. (2014). *Debris flow: Mechanics, prediction and countermeasures* (2nd ed.). CRC press.
- Turnbull, B., Bowman, E.T., and McElwaine, J.N. (2015). Debris flow: Experiments and modelling. *Comptes Rendus Physique*, Vol. 16, No. 1, pp. 86-96.

---

Received	April 23, 2018
Revised	April 25, 2018
Accepted	July 19, 2018