

# 토석류 재해발생 시 레질리언스 강화를 위한 연구

## The Study for Enhancing Resilience to Debris Flow at the Vulnerable Areas

김성덕<sup>1)</sup> · 이호진<sup>†</sup> · 장형준<sup>2)</sup> · 도현승<sup>3)</sup>

Sungduk Kim · Hojin Lee · Hyungjoon Chang · Hyonseung Dho

Received: May 21<sup>st</sup>, 2021; Revised: May 31<sup>st</sup>, 2021; Accepted: July 1<sup>st</sup>, 2021

**ABSTRACT** : Climate change caused by global warming increases the frequency of occurrence of super typhoons and causes various types of sediment disasters such as debris flows in the mountainous area. This study is to evaluate the behavior of debris flow according to the multiplier value of the precipitation characteristics and the quantity of debris flow according to the typhoon category. For the analysis of the debris flow, the finite difference method for time elapse was applied. The larger the typhoon category, the higher the peak value of the flow discharge of debris flow and the faster the arrival time. When the precipitation characteristic multiplier is large, the fluctuation amplitude is high and the bandwidth is wide. When the slope angle was steeper, water discharge increased by 2~2.5 times or more, and the fluctuation of the flow discharge of debris flow increased. All of the velocities of debris flow were included to the class of "Very rapid", and the distribution of the erosion or sedimentation velocity of debris flows showed that the magnitude of erosion increased from the beginning, large-scale erosion occurred, and flowed downstream. The results of this study will provide information for predicting debris flow disasters, structural countermeasures and establishing countermeasures for reinforcing resilience in vulnerable areas.

**Keywords** : Typhoon, Finite difference method, Value of multiplier of precipitation, Erosion or sedimentation velocity, Debris flow, Resilience

**요 지** : 지구 온난화로 인한 기후변화는 슈퍼 태풍의 발생빈도를 높이고 산지에서 토석류와 같은 다양한 형태의 토사재해를 야기한다. 본 연구는 태풍 등급에 따른 토석류 발생량 및 강우특성의 가중치에 따른 토석류 거동을 평가한 것이다. 토석류 해석은 시간 변화에 대한 유한차분법을 적용하였다. 태풍의 범주가 클수록 토석류 유량의 peak 값이 크고 도달시간도 빠르게 나타났다. 강우특성 가중치가 큰 경우 fluctuation 진폭이 크고 밴드폭이 넓게 나타났다. 경사면의 각도가 큰 경우 2~2.5배 이상 상승하였고, 토석류 유량의 fluctuation의 변동성이 확대되었다. 토석류의 유속은 모두가 급속도(Very rapid)에 해당하는 클래스에 속하였고, 토석류의 침식 또는 퇴적 속도의 분포는 초기부터 침식의 크기가 커졌으며 대규모의 침식이 발생하고 하류로 유하하는 것을 나타냈다. 이상에서 본 연구의 결과는 토석류 재해의 예측 및 구조물적 대책, 재해 취약지역에서 레질리언스 강화를 위한 대책을 세우는 데 중요한 정보를 제공할 것이다.

**주요어** : 태풍, 유한차분법, 강우특성의 가중치, 침식 또는 퇴적 속도, 토석류, 레질리언스

## 1. 서 론

전 세계적으로 다양한 형태의 재해에 직면하고 있으며, 우리나라 또한 재해의 발생 정도 및 강도가 계속 증대되고 있다. 특히, 지구 온난화로 인한 기후변화는 슈퍼 태풍의 발생빈도를 높이며, 집중 호우의 발생빈도 및 강우강도의 탁월한 상승을 야기함으로써 강수량의 급격한 증가를 유발하고 하류에서의 피해를 양산하고 있다(Kim & Lee, 2019). 이러한 슈퍼태풍과 집중호우는 산지에서 토석류와 같은 다양한 형태의 토사재해를 야기하며 토사와 물이 혼합된 토석

류는 강력한 운동성과 유동성을 산지에서 발휘하게 된다. 이러한 에너지를 가지는 토석류는 중력작용에 의하여 하류로 빠르게 흘러가게 된다(DeGraff, 1994; Gori & Burton, 1996).

이와 같이 운동성과 유동성의 강력한 에너지를 갖는 토석류를 차단하기 위해서는 구조물적 대책(사방댐 등)과 비구조물적 대책(토사재해 위험지도와 Hazard Map 등)을 잘 설계해야 한다. 구조물적 대책과 비구조물적 대책을 설계하기 위해서는 토석류에 관한 다양한 정보와 수학적 모델이 필요하다. 수학적 모델의 이산화를 통한 수치 해석의 적용

1) Instructor, Dept of Civil & Environment Engineering, Cheongju University

† Associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : hojinlee@chungbuk.ac.kr)

2) Post Doctor & Instructor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

3) Professor, Dept of Civil & Environment Engineering, Cheongju University

은 토석류 제어 설계 시스템을 분석하는 데 좋은 정보를 제공한다.

토석류가 물과 토사의 혼합물질로서 유동 개념 모델이라는 것이 Wang et al.(2008)에 의해 제안되었으며, Takahashi & Tsujimoto(1984)는 2차원 차분모형을 유체팽창 모델을 기반으로 해서 제시하였다. 토사 유동체 혼합물질의 운동 특성은 Egashira et al.(1997)가 Newtonian 모형을 적용하여 제안하였다.

토석류 흐름을 침식과 퇴적의 모형으로 설정한 수치모형은 O'Brien et al.(1993), Takahashi et al.(1992) 및 Ghilardi et al.(2001)가 제시하였으며, 침식과 퇴적을 분리하거나 침식과 퇴적을 결합하는 형태를 유지함으로써 토석류 유하 시의 침식 및 퇴적 속도식을 제시하였다. 사면에서의 소단 설치 및 깎인 형태의 사면 및 계단형태의 사면에서 적용된 침식 및 퇴적의 수정모형은 Lee et al.(2015)과 Kim et al.(2013)에 의해 제시되었으며, 다양한 조건 하에서 토석류 수치모의를 수행하였다. 수치적분 모델인 DAM(Depth Average Model)은 Savage & Hutter(1991), Denlinger & Iverson(2001)이 토석류 현상을 분석하기 위하여 수로채널 등을 이용하여 연구를 수행하였고, Luzi et al.(2000)은 지진과 산사태를 연관성을 분석하기 위하여 GIS를 이용한 수치모형을 제안하였다.

본 연구는 USACE가 제시한 허리케인 등급에 따른 토석류 발생량 및 강우특성에 따른 가중치(DEP(NJ), 2015)를 수정된 침식-퇴적 모델에 적용(Lee et al., 2015)함으로써 얻어진 토석류의 거동을 평가한 것이다. 토석류 해석을 평가하기 위한 수치 시뮬레이션은 시간변화에 대한 토석류 거동을 잘 나타낼 수 있는 유한차분법을 적용하였다. 또한 토석류 거동은 토석류량, 유동심 등을 포함하였으며, 침식 또는 퇴적 속도식은 Egashira et al.(1997)이 제안한 수정식을 적용하여 사면에서의 유동을 그래프로 나타냈다. 사면에서의 토석류 유속은 WP/WLI(1995)에서 제시한 토석류의 운동성 범위에 적용하여 분석하였다. 사면의 경사각도는 산사태 위험 등급표에서 분류한 경사에 따른 위험도를 기준으로 설정하여 수치모의를 진행하였다.

본 연구의 결과는 산지 또는 지방도로에서 사방댐과 같은 구조물적 대책을 설정하거나, 재해 취약지역에서 레질리언스 강화를 위한 정보를 제공할 것이다.

## 2. 기본이론

슈퍼태풍과 집중호우에 발생은 산지에서 토석류 재해를 야기하며, 토석류에 의한 재해는 산지의 유역으로부터 하류

지역의 지방도 및 지방도 배후지역 등으로 빠르게 전파하는 전형적인 토석류 재해의 전파특성을 갖는다. 산악지역에서 토석류에 의한 재해는 주로 흙과 유체의 혼합물이 슬러리처럼 중력 작용을 받아서 하류로 빠르게 유동하며, 이러한 슬러리는 연속체처럼 움직인다. 또한 흙과 유체 혼합물 외에도 흙-암석-물-나무의 혼합물(Woody debris flow)도 자주 발생한다. 토사와 유체입자의 혼합물 사이의 간극은 유체 또는 슬러리로 포화되어 있기 때문에 강한 유동성이 있고, 운동력을 발휘하여 하류부로 침식 또는 퇴적을 반복하면서 빠르게 유하하고, 강력한 에너지를 내포한 토석류는 지방도로 및 그 배후로 방사형태로 빠르게 확산 전파하여 피해를 가중한다. 검사체적의 접근 방식은 이러한 토석류 재해에 관련된 이론적 토대를 나타내며, 토석류 지배방정식의 설정은 유체 질량보존의 연속방정식, 유체의 운동량 방정식, 토사체의 운동량 보존식을 나타낸다.

토사-유체 혼합물의 유동층은 질량, 체적, 밀도 등이 시간의 변화에 따라서 각각 빠르게 변화하고, 이 토석류 변화에 따른 토사-유체 혼합물의 지배방정식은 연속방정식 형태의 질량보존법칙을 만족하게 된다. 토사 입자에 대한 연속방정식을 Eq. (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\vec{u}h)}{\partial x} = S/c_* \quad (1)$$

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(c\vec{u}h)}{\partial x} = S \quad (2)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $\vec{u}$ 는 유속,  $S$ 는 침식 또는 퇴적속도,  $c_*$ 는 퇴적층의 농도,  $c$ 는 유동층의 평균농도이다.

토석류 토사체적농도에 관한 침식 또는 퇴적에 의한 속도식은 Egashira et al.(1997)이 제안한 식을 사용하였으며 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = -u \cdot \tan(\theta_b - \tan\theta) \quad (3)$$

여기서,  $\theta_b$ 는 각 지점에 있는 토석류에서의 토사농도  $c$ 에 관한 평형구배이며, 다음식으로 주어진다.

$$\theta_b = \tan^{-1} \left( \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1) + 1} \right) \tan\phi \quad (4)$$

여기서,  $\phi$ 는 토사의 내부마찰각,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\sigma$ 는 퇴적물 입자의 밀도이다.

전단응력에 대한 운동량 보존식과 퇴적토층의 변화식은

각각 Eq. (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\left\{ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \right\} = g - \frac{1}{\rho_m h} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{S}{c_s h} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{S}{c_s \cos \theta} = 0 \quad (6)$$

여기서,  $P$ 는 압력이고,  $\rho_m$ 은 토석류 유동층의 평균밀도,  $\tau_b$ 는 저면전단력,  $z$ 는 기준수평면으로부터의 퇴적토층 두께,  $\theta$ 는 하상경사와 수평면이 이루는 각도이다. 토사와 유체의 혼합물의 유동 특성은 3가지 이동 특성을 갖고 있으며, 사면에서의 수면경사의 값에 따라 분류될 수 있다(Nakagawa et al., 2003). 토석류 유동의 경우 토석류의 평형농도식은 Eq. (7)로 나타낼 수 있고, Eq. (5)의 미분방정식을 풀면 Eq. (8)의 토석류 유동에서의 저면전단력을 구할 수 있다. 토석류 유동에서의 저면전단력은 토립자의 체적농도가  $0.4c_s$ 보다 커야만 한다.

$$c_\infty = \frac{\rho_s \tan \theta_h}{(\sigma - \rho_s)(\tan \phi - \tan \theta_h)} \quad (7)$$

$$\tau_b = p_w \tan \phi + \frac{1}{8} \rho \frac{(\sigma/\rho)u|u|}{\{(c_s/c)^{1/3} - 1\}^2} \left( \frac{d_m}{h} \right)^2 \quad (8)$$

여기서,  $\theta_h$ 는 수면 경사,  $p_w$ 는 정수압,  $c_\infty$ 는 토석류의 평형농도,  $d_m$ 은 토사체의 대표입경이다.

### 3. 수치결과 및 분석

#### 3.1 수치모의

토사-유체 혼합물은 산지에서 강력한 유동성과 운동성을 가지고 침식과 퇴적을 반복하면서 하류로 유하하기 때문에 시간변화에 대한 토석류의 변동성(fluctuation)이 크게 나타난다. 유한차분법(Finite Differential element Method)을 이용하여 지배방정식을 적용하면, 시간변화에 대한 토사-유체 혼합물의 흐름특성 등을 효율적으로 분석할 수가 있다.

Fig. 1은 300cm의 길이로 토사가 10cm 두께로 포설된 경우(수로 상류부)의 수치모식도를 나타낸다. 전체 수로 길이는 6m이고, 기준면으로부터 상류부 끝단까지의 높이는 4m로 한다. 하상의 경사각도는 산사태위험등급표에서 분류한 경사에 따른 위험도(Park et al., 2019)를 기준으로 해서 4등

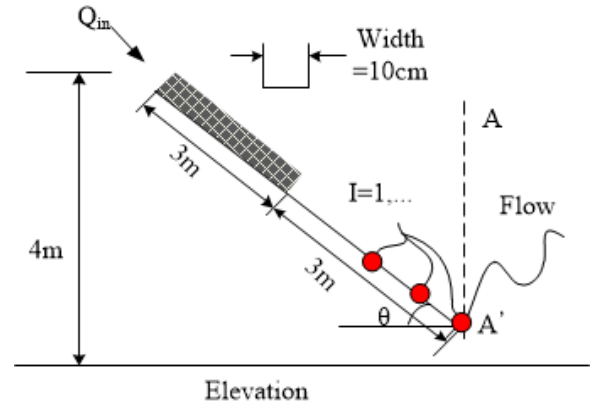


Fig. 1. The schematic design for numerical experiment

급과 5등급의 경사도에 해당하는 각도  $\theta=15^\circ$  및  $\theta=20^\circ$ 로 설정하였다. 토사의 평균입경은 각각 3.08mm이고, 모래입자 밀도는  $2.65g/cm^3$ 이다. 하상에서의 최대토사농도는 65%이고 내부마찰각  $\tan \phi$ 는 0.7이다. 수로의 끝단에서 A-A'라인은 토석류가 상류부를 거쳐 하류부에 도달한 후의 조사지점을 나타낸다.

수학적 모델에 대한 이산화를 수행하기 위해서는 각 변수들의 격자배치가 필요하며, 유량과 유속은 수면에 배치하는 것이 유리하고, 토사체적 농도와 수심은 격자의 중심에 배치하는 것이 유리하다. 수치계산을 수행하는 데 있어서 격자 상에서 시간 레벨을 설정해야 한다. 시간 변화( $\Delta t$ ), 유량의 공급시간( $t_1$ ), 연속방정식 및 운동량 방정식의 수치모델의 계산수행 시간( $t_2$ ), 토사-유체 혼합물의 유동체가 하류단 또는 특정위치에 도달한 이후의 계산 시간( $t_3$ ), 수치모델이 계산을 수행하는 시간 간격( $t_4$ )으로 나뉘서 시간에 관계된 수치모의를 수행할 수 있다. 수치계산을 위해서 지배방정식 (1)과 (2)에 대한 이산화가 필요하며, 지배방정식에 대한 이산화식은 Eq. (9)와 Eq. (10)으로 나타낼 수 있고, Eq. (10)을 세립사로 확대한 경우 Eq. (11)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{h_{I+1/2}^{J+3} - h_{I+1/2}^{J+1}}{2\Delta t} + \frac{q_{I+1}^{J+2} - q_I^{J+2}}{\Delta x} = i_{I+1/2}^{J+1} \quad (9)$$

$$\frac{(ch)_{I+1/2}^{J+3} - h_{I+1/2}^{J+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} [QC]_{I-}^J = i_{I+1/2}^{J+1} c_s \quad (10)$$

$$\frac{\{(1-c)c_f h\}_{I+1/2}^{J+3} - \{(1-c)c_f h\}_{I+1/2}^{J+1}}{2\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} [QF]_{I-}^J = i_{I+1/2}^{J+1} (1-c_s) c_{sf} \quad (11)$$

### 3.2 결과분석

본 연구는 태풍 등급에 따른 토석류 발생량 및 강우특성에 따른 가중치를 적용했을 때 토석류의 유량, 유동심, 침식 및 퇴적의 속도벡터 등과 같은 토석류의 거동을 분석한 것이다. 태풍 등급은 USACE가 제시한 허리케인 등급값을 Table 1과 같이 적용하였으며, 허리케인 등급(DEP(NJ), 2015))은 허리케인 Frederic(1979), Hugo(1989), Andrew(1992)로부터 얻어진 데이터에 기초한다. 폭풍 사상에 따라 특정된 강수 특성의 가중치는 Table 2에 나타났다.

Fig. 2와 3은 경사면의 각도가 15°인 경우 태풍 범주에 따라서 강우특성에 따른 가중치가 부여됐을 때 토석류의 유량을 나타낸다. 이 때 조사지점은 Fig. 1에 나타난 것처럼 직선수로의 끝단(A-A'라인)이고, 토석류의 유량변화는 토

Table 1. Debris quantity by hurricane category

Hurricane category	Debris quantity
1	1.53 m <sup>3</sup>
2	6.12 m <sup>3</sup>
3	19.88 m <sup>3</sup>
4	38.23 m <sup>3</sup>
5	61.16 m <sup>3</sup>

Table 2. Precipitation characteristic by storm for category 3

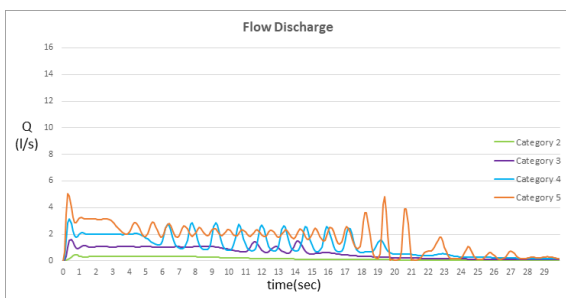
Precipitation characteristic	Value of multiplier
NONE TO LIGHT	1.0
MEDIUM TO HEAVY	1.3

석류가 수로 끝단에 도달한 이후의 30초간을 나타낸다. Fig. 2와 3에서 (b)는 토석류가 도달한 후 Peak가 발생되는 시점(0sec~2sec)에서의 토석류 특성을 확대한 것이다.

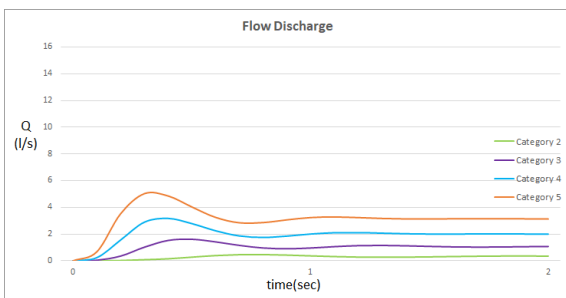
Fig. 2(a)에서 보면 태풍의 범주가 클수록 토석류가 하류 끝단에 처음 도달한 시점에서 peak 값이 크게 나타났으며, Fig. 2(b)에서 2초간의 확대한 모습을 보면, 태풍 범주가 클수록 Peak 값의 도달이 빠르게 나타났다.

범주 4와 5의 경우 peak 값 이후 fluctuation이 나타났으며, 범주 4는 6sec~17sec까지이고, 범주 5는 4sec~21sec까지 더 길게 나타났으며, 18sec~21sec의 구간에서는 Peak 값에 도달하는 fluctuation 구간이 나타났다. 이는 범주 4와 5인 태풍의 경우 하류에서 토석류에 의한 fluctuation 발생을 일으킴으로써 그 피해를 가중할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 3은 경사각도 15°인 경우 강수특성의 가중치가 1.3에서의 토석류 유량을 나타내며, 태풍의 범주가 클수록 토석류의 유량이 크게 나타났고, 범주 3에서도 9sec~15sec 구간에서 fluctuation이 나타났다. 범주 4의 경우는 강수특성의 가중치가 1인 경우보다 시간 구간이 길게 나타났다. 범주 5도 역시 시간구간이 길게 나타났으며, 15sec~20sec 구간에서 fluctuation의 진폭이 크게 나타났고, 토석류가 도달하기 시작한 초기의 Peak 값에 도달할 정도로 고유량을 나타내고 있다. 이는 태풍의 범주가 작을지라도 강수특성이 강한 경우에는 하류에서 토석류에 의한 큰 피해가 발생할 수 있음을 나타낸다. Fig. 3(b)를 보면 Fig. 2(b)에 비해 각

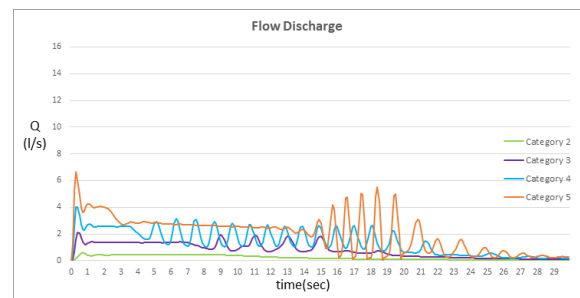


(a) Data for 30 seconds

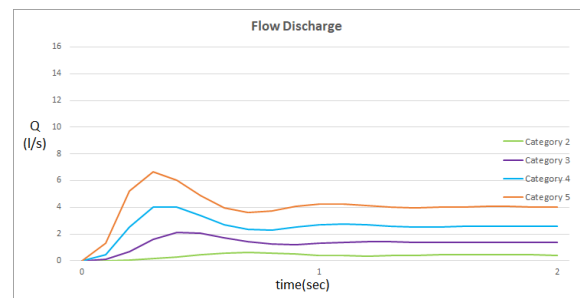


(b) Extended data for 2 seconds

Fig. 2. The water discharge at the downstream channel varying Typhon categories (Value of multiplier = 1.0, channel slope = 15°)



(a) Data for 30 seconds



(b) Extended data for 2 seconds

Fig. 3. The water discharge at the downstream channel varying Typhon categories (Value of multiplier = 1.3, channel slope = 15°)

범주 간의 진폭의 차(범주와 범주 사이의 간격)가 조금 더 확대되고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4는 경사면의 각도가 15°인 경우 태풍 범주에 따라서 강우특성에 따른 가중치가 부여됐을 때 토석류 유동층에서의 유동심을 나타낸다. 태풍 범주가 클수록 토석류가 고 유동심의 fluctuation이 나타났고, 고유동심의 밴드폭이 넓어졌다. 또한, fluctuation의 진폭 크기가 크게 나타났다.

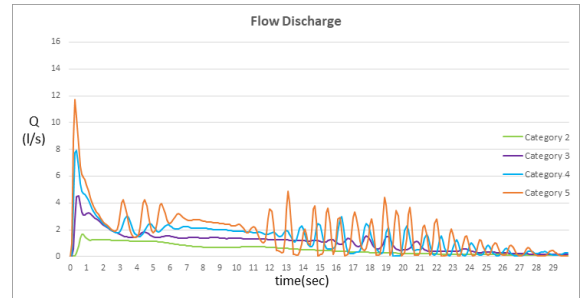
Fig. 5와 Fig. 6은 경사면의 각도가 20°인 경우 태풍 범주에 따라서 강우특성에 따른 가중치가 부여됐을 때 토석류의 유량을 나타낸다. 경사각도가 15°인 경우보다 토석류 유량의 Peak 값이 2~2.5배 이상 상승한 것으로 나타났고, 이는 산사태 위험등급표에서 5등급에 해당하는 경사각도 20°에서의 결과이므로, 이 각도보다 더 큰 급경사지에서의 토석류에 의한 피해는 더 가중될 것으로 판단되므로 이에 대한 대책이 필요하다.

Fig. 5(a)의 토석류 유량의 fluctuation이 발생하는 구간이 3구간(0sec~1sec, 3~6sec, 12sec~25sec)으로 나타남으로써 토석류에 의한 변동성이 확대되고 있음을 나타낸다.

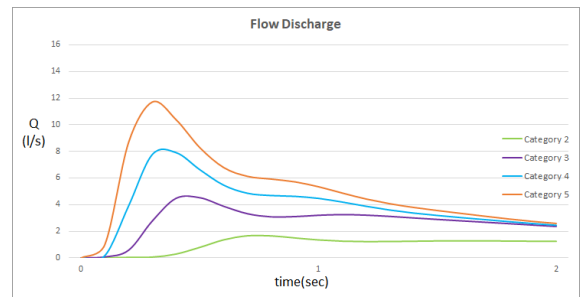
Fig. 6은 경사각도 20°인 경우 강우특성 가중치가 1.3에서의 토석류의 유량을 나타낸다. 범주 3 이상에서 토석류가 하류 끝단에 도달하는 초기(0~1sec)에 토석류 유량의 Peak 값이 크게 상승했으며, 이후에도 고유량과 높은 진폭의 fluctuation이 나타났다. 특별히, 태풍 범주가 클수록 초기에 도달된 토석류의 유량은 가중치가 1.0인 경우보다 2.5배~3배 이상 상

승한 것으로 나타났고, 이는 초기에 도달한 토석류 유량의 에너지 상승이 강한 것으로 판단된다. 이는 토석류의 입자가 상류로부터 하류로 유하할 때 입자간의 충돌 현상을 발생시켜 전단응력의 에너지를 상승시킨 것으로 판단된다.

초기 구간인 0sec~1sec을 지난 후 3sec~6sec 사이와 10sec~25sec 구간에서도 고유량의 Peak 값이 발견됐다. 이는 강한

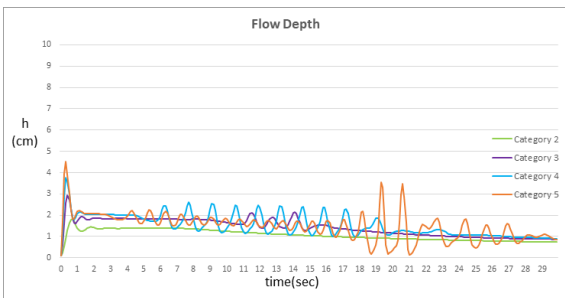


(a) Data for 30 seconds

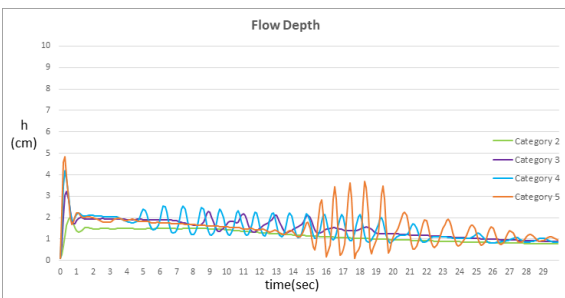


(b) Extended data for 2 seconds

Fig. 5. The water discharge at the downstream channel varying Typhon categories (Value of multiplier = 1.0, channel slope = 20°)

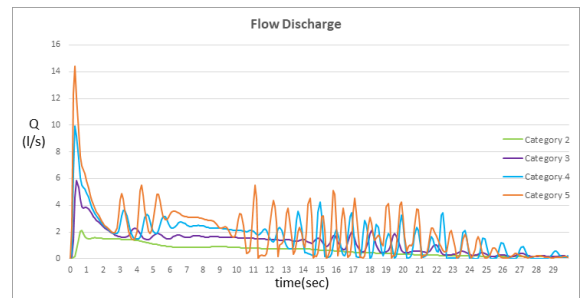


(a) Value of multiplier = 1.0

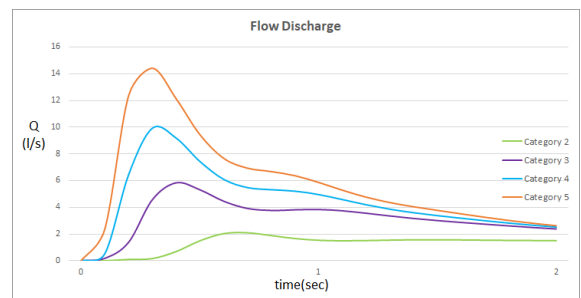


(b) Value of multiplier = 1.3

Fig. 4. The water depth at the downstream channel varying Typhon categories for channel slope = 15°



(a) Data for 30 seconds



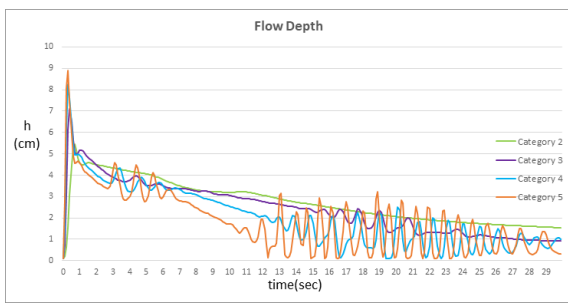
(b) Extended data for 2 seconds

Fig. 6. The water discharge at the downstream channel varying Typhon categories (Value of multiplier = 1.3, channel slope = 20°)

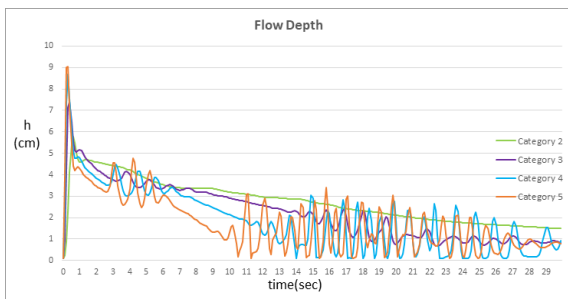
토석류의 에너지가 상류로부터 하류로 유하할 때 에너지 소멸이 아닌 토사-물 혼합물의 입자간 충돌이 지속적으로 발생되고 있음을 나타낸다.

Fig. 7은 경사면의 각도가 20°인 경우 태풍 범주에 따라서 강우특성에 따른 가중치가 부여됐을 때 토석류 유동층에서의 유동심을 나타낸다. 태풍 범주가 클수록 고유동심의 밴드폭 및 진폭 크기가 높은 fluctuation이 다수 발견됐으며, 강수특성의 가중치에 상관없이 높게 나타났다. 이는 산사태 위험물 등급표 5등급 및 급경사지에서의 토석류 유동심은 강수가 적더라도 고유동심 분포를 보이며, 하류에서의 상당한 피해를 발생시킬 것으로 판단된다.

Table 3은 경사면에서 태풍 범주 및 강우특성에 따른 가중치가 부여됐을 때 토석류의 유속을 나타낸다. 이 때 유속은 토석류가 초기 하류단에 도달한 시점에서의 값을 나타낸다. 태풍의 범주가 크고, 강수특성의 가중치가 클수록 유속이 빨라짐을 알 수 있고, 경사각도가 20°인 경우에는 태풍 범주 3에서부터 유속이 급격히 상승함을 알 수 있다. WP/WLI (1995)에서 토석류 유속에 대한 등급을 7가지 클래스로 나



(a) Value of multiplier = 1.0



(b) Value of multiplier = 1.3

Fig. 7. The water depth at the downstream channel varying Typhon categories for channel slope = 20°

Table 3. The velocity of debris flow at the downstream channel varying Typhon categories, channel slopes, and value of multiplier

Value of multiplier	1.0				1.3			
	2	3	4	5	2	3	4	5
Typhoon categories	Velocity of debris flow (cm/sec)				Velocity of debris flow (cm/sec)			
Channel slope=15°	42.32	74.79	98.02	117.12	48.45	83.00	109.03	133.53
Channel slope=20°	54.72	111.82	130.47	144.92	67.02	125.22	136.72	158.57

누었으며, 토석류의 범위도 구분하였다(Table 4). WP/WLI (1995)에서 제시한 클래스를 비교해 보면, 본 연구에서 계산된 결과값 모두가 “Very rapid”에 해당하는 클래스에 속하였고, 태풍이 동반됐을 경우 산사태 위험등급(4~5등급) 및 급경사지에서의 토석류의 유속은 상당히 빠르다는 것을 알 수 있다. 또한, 강수특성의 가중치 값이 큰 경우에는 일부 구간에서 클래스 7(extremely rapid)에 해당하는 결과도 나타났고, 이는 태풍 시에 산지 하류부에서의 토사재해에 대한 대책을 주의 깊게 설정해야 함을 나타낸다.

Fig. 8은 경사면의 각도가 20°, 태풍 범주 5, 강우특성의 가중치가 1.3인 경우 경사면 위에서 시간경과가 5sec, 10sec, 15sec, 20sec로 흘렀을 때 토석류의 침식 또는 퇴적 속도의 분포 및 벡터도를 나타낸다. 초기 5sec에서 침식의 크기가 커졌고, 10sec 상황에서는 가장 큰 Peak 값에 해당하는 분포를 나타냈으며, 이후 크기가 작아지면서 소멸하는 것을 알 수 있다. 이는 토석류 발생 초기에 대규모의 침식이 발생하고 하류로 유하하는 것을 의미하며, 대규모의 침식량을 포함한 토사-물 혼합물은 입자충돌의 에너지가 커지면서 하류로 유하하기 때문에 하류에서의 큰 피해를 야기할 수 있다고 판단된다.

## 4. 결 론

최근 재해의 발생 정도 및 강도가 계속 증대되고 있으며, 지구 온난화로 인한 기후변화는 슈퍼 태풍의 발생빈도를 높이고, 집중 호우의 발생빈도를 상승시킴으로써 산지에서 토석류와 같은 다양한 형태의 토사재해를 야기한다. 본 연구

Table 4. Landslide rates of movement (WP/WLI, 1995)

Movement Rate	Velocity Class	Velocity Limits	Rate (mm/sec)	Debris Flow Range
Extremely rapid	7	5m/sec	$5 \times 10^3$	↑ ↓
Very rapid	6	3m/min	50	
Rapid	5	1.8m/hour	0.5	
Moderate	4	13m/month	$5 \times 10^{-3}$	
Slow	3	1.6m/year	$50 \times 10^{-6}$	
Very slow	2	16mm/year	$0.5 \times 10^{-6}$	
Extremely slow	1			

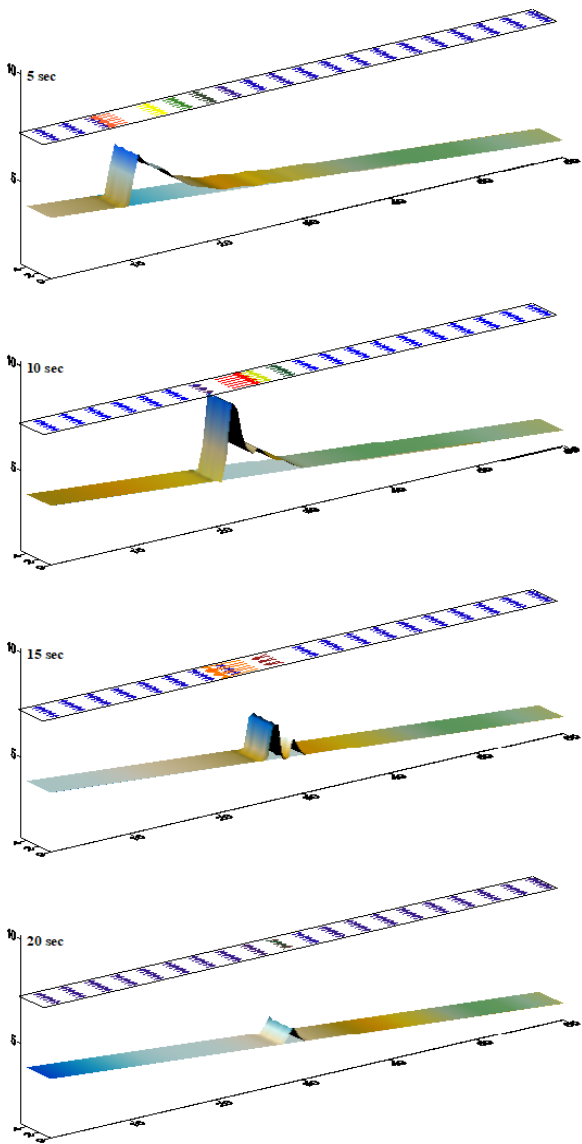


Fig. 8. The erosion or sedimentation velocity and it's vector on the channel with slope angle = 20°, value of multiplier = 1.3, and typhoon category = 5

는 태풍 등급에 따른 토석류 발생량 및 강우특성에 따른 가중치를 수정된 침식-퇴적 모델에 적용함으로써 얻어진 토석류의 거동을 평가한 것이다. 토석류 해석을 평가하기 위한 수치 모의는 시간변화에 대한 토석류 현상을 잘 나타낼 수 있는 유한차분법을 적용하였고, 지배방정식은 검사체적의 접근방식을 기본으로 하여, 유체의 연속방정식, 유체의 운동량 방정식, 토사체의 운동량 보존식을 적용하였다. 기본이론을 바탕으로 태풍 등급에 따른 토석류 발생량 및 강우특성에 따른 가중치를 적용했을 때 토석류 유량, 유동심, 침식 및 퇴적의 속도벡터 등과 같은 토석류의 거동을 분석하였다.

- (1) 경사면의 각도가 15°인 경우 보면 태풍의 범주가 클수록 토석류가 하류 끝단에 처음 도달한 시점에서 침투깊이 크게 나타났으며, 태풍 범주가 클수록 침투깊이의 도달이 빠르게 나타났다. 범주 4와 5인 태풍의 경우 하류에서의 토석류에 의한 변동성 발생을 야기함으로써 그 피해를 하류에 가중시킬 수 있다는 것을 의미한다.
- (2) 강수특성 가중치가 1.3인 경우 강수특성의 가중치가 1인 경우보다 시간 구간이 길게 나타났고, 변동성의 진폭이 크게 나타났고, 토석류가 도달하기 시작한 초기의 침투깊이에 도달할 정도로 고유량을 나타냈다. 유동심의 경우 태풍 범주가 클수록 토석류가 고유동심의 변동성을 나타냈고, 고유동심의 밴드폭이 넓어졌으며 진폭 크기가 크게 나타났다.
- (3) 경사 각도가 20°인 경우 경사각도가 15°인 경우보다 토석류 유량의 침투 깊이가 2~2.5배 이상 상승하였고, 토석류 유량의 변동성이 발생하는 구간이 3구간으로 나타남으로써 토석류에 의한 변동성이 확대되고 있음을 나타냈다. 강수특성 가중치가 1.3에서 범주 3 이상에서 토석류가 하류 끝단에 도달하는 초기(0~1초)에 토석류 유량의 침투깊이 크게 상승했고, 이후 고유량과 높은 진폭의 변동성이 나타났다.
- (4) 경사면의 각도가 20°인 경우 유동심은 태풍 범주가 클수록 고유동심의 밴드폭 및 진폭의 크기 또한 높은 변동성이 다수 발견됐고, 강수특성의 가중치에 상관없이 높게 나타났다. 이는 산사태 위험물 등급표 5등급 및 급경사지에서의 토석류 유동심은 강수가 적더라도 고유동심 분포를 보이며, 하류에서의 상당한 피해를 야기할 것으로 판단된다.
- (5) 토석류의 유속은 태풍의 범주가 크고, 강수특성의 가중치가 클수록 유속이 빨라짐을 알 수 있고, 경사각도가 20°인 경우에는 태풍 범주 3에서부터 유속이 급격히 상승함을 알 수 있다. 본 연구에서 계산된 유속은 모두가 Very rapid에 해당하는 클래스에 속하였다.
- (6) 토석류의 침식 또는 퇴적 속도의 분포 및 벡터도를 보면, 초기 5sec에서 침식의 크기가 커졌고, 10sec 상황에서는 가장 큰 침투깊이에 해당하는 분포를 나타냈다. 이는 토석류 발생 초기에 대규모의 침식이 발생하고 하류로 유하하는 것을 의미한다.

이상에서 본 연구의 결과는 태풍 범주 및 강우특성의 가중치에 따른 산지 또는 지방도로에서 토석류에 의한 재해를 예측하는 데 좋은 정보를 제공할 것이다. 또한, 사망법과 같은 구조물적 대책을 설정하거나, 재해 취약지역에서 레질리언스 강화를 위한 대책을 세우는 데 중요한 정보를 제공할 것이다.

## References

1. DeGraff, J. (1994), The Geomorphology of Some Debris Flows in the Southern Sierra Nevada, California: *Geomorphology*, No. 10, pp. 231~252.
2. Denlinger, R. P. and Iverson, R. M. (2001), Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain, numerical predictions and experimental tests, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B1, pp. 553~566.
3. Department of Environmental Protection (2015) in New Jersey, Disaster Debris Management Planning Tool Kit For New Jersey Municipalities.
4. Egashira, S. Miyamoto, K. and Itoh, T. (1997), Constitutive equation of debris flow and their applicability, 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, pp. 340~349.
5. Ghilardi, P., Natale, L. and Savi, F. (2001), Modeling debris flow propagation and deposition, *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 26, No. 9, pp. 651~656.
6. Gori, P. L. and Burton, W. C. (1996), Debris Flow Hazards in the Blue Ridge of Virginia: U.S. Geological Survey Fact Sheet, pp. 159~96.
7. Kim, S. D. and Lee, H. J. (2019), Numerical simulation of the impact force of debris flow according to the characteristics of the liquefied layer of sediment, *Journal of Disaster Management*, Vol. 19, No. 2, pp. 113~119 (In Korean).
8. Kim, S. D., Oh, S. W. and Lee, H. J. (2013), The study of relationship between berm width and debris flow at the slope, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 5~12 (In Korean).
9. Lee, H. J., Kim, S. D., Lee, M. S. and Jun, K. W. (2015), The modeling of debris flow disaster according to the location of berm, *Crisisonomy*, No. 11, Vol. 9, pp. 105~118 (In Korean).
10. Luzi, L., Pergalani, F. and Terlien, M. T. J. (2000), Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems, *Engineering Geology*, Vol. 58, Issues 3~4, pp. 313~336.
11. Nakagawa, H., Takahashi, T., Satofuka, Y. and Kawaike, K. (2003), Numerical simulation of sediment disasters caused by heavy rainfall in Camuri Grande basin, *Proceedings of the Third Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Switzerland, Rotterdam, Venezuela 1999, pp. 671~682.
12. O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Fullerton, W. T. (1993), Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 244~266.
13. Park, J. H., Seo, J. I. and Lee, C. W. (2019), Analysis of GIS for characteristics on the slow-moving landslide: with a special reference on slope and grade of landslide, *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 108, No. 3, pp. 311~321 (In Korean).
14. Savage, S. B. and Hutter, K. (1991), The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis, *Acta Mechanica*, Vol. 86, pp. 201~223.
15. Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T. and Yamashiki, Y. (1992), Routing debris flows with particle segregation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 11, pp. 1490~1507.
16. Takahashi, T. and Tsujimoto, H. (1984), Mechanics of granular flow in inclined chute, *Journal of Hydraul Coast. Environment Engineering*, JSCE, Vol. 565, No. 2-39, pp. 57~71 (In Japanese).
17. Wang, N. S., Yi, R. H. and Liu, D. (2008), A solution method to the problem proposed by wang in voting systems, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 221, pp. 106~113.
18. WP/WLI. (1995), A suggested method for describing the rate of movement of a landslide, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, No. 52, pp. 75~78.