

## Estimation of the Debris Flow Loss through the Development of a Debris Flow Impact Pressure Model

Dong Ho Nam<sup>#</sup>, Dong Ho Kang, Byung Sik Kim<sup>+</sup>

Department of Urban & Environmental Disaster Prevention School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Smacheok-si, Gangwon-do, Republic of Korea

### Abstract

Recently, human and property damages have been frequently reported by debris disaster such as debris flow and landslide, which were caused by a variety of factors such as intensive rain due to climate change and thoughtless development of mountainous areas. In order to reduce the damage by such debris flow, it is required to quantitatively estimate the impact pressure of the debris flow and to evaluate the structures in the hazardous areas and the surrounding facilities. In this paper, we developed an impact pressure model Type 1 reflecting the debris flow characteristics and an impact pressure model Type 2 reflecting the topographic characteristics of the mountain watershed. The reliability of the Type-1 and Type-2 impact pressure models was verified based on the impact pressure of the commercial model RAMMS.

**Key words:** debris flow, impact pressure model, RAMMS, debris flow loss

### 1. 서론

산사태란 강우나 지진으로 인해 흙이나 암석이 균형을 잃고 중력 작용에 의하여 무너져 내리는 현상을 의미하며, 토석류는 산사태 등과 같은 붕괴로 인하여 무너진 흙, 바위, 유목 등이 계곡을 따라 하류부로 흐르는 현상을 말하며, 주로 장마철과 태풍이 지나가는 여름철에 집중적으로 발생하고 있다(National Institute of Forest Science, 2009).

최근 전 세계적으로뿐 만아니라 우리나라에도 이상 기후로 인해 국지성 집중호우 및 태풍의 피해가 빈번해

지면서 토석류 피해도 잦게 발생하고 있으며, 이로 인해 인명 및 재산피해가 크게 발생하고 있는 추세이다. 토석류는 하류부로 유하하여 하부지역에 분포하는 시설물에 피해를 발생시키며, 피해범위는 주거지 및 공공시설, 농경지 등 다양한 형태로 발생되기 때문에 사회·경제적 피해는 광범위하게 나타난다. 이러한 토석류 피해를 감소시키기 위해서 산림청, 한국지질자원연구원, 국립재난안전연구원 등에서는 지형이나 지반특성 등이 고려된 GIS기반의 산사태 위험지도를 전국적으로 작성하고 있으며, 국립재난안전연구원에서는 급경사지 붕괴경보 및 대피기준 설정에 대한 연구가 활발

<sup>#</sup> The 1st author: Dong Ho Nam, Tel. +82-33-570-6838, Fax. +82-33-570-6469, e-mail. [skaehdghkk@kangwon.ac.kr](mailto:skaehdghkk@kangwon.ac.kr)

<sup>+</sup> Corresponding author: Byung Sik Kim, Tel. +82-33-570-6819, e-mail. [hydrokbs@kangwon.ac.kr](mailto:hydrokbs@kangwon.ac.kr)

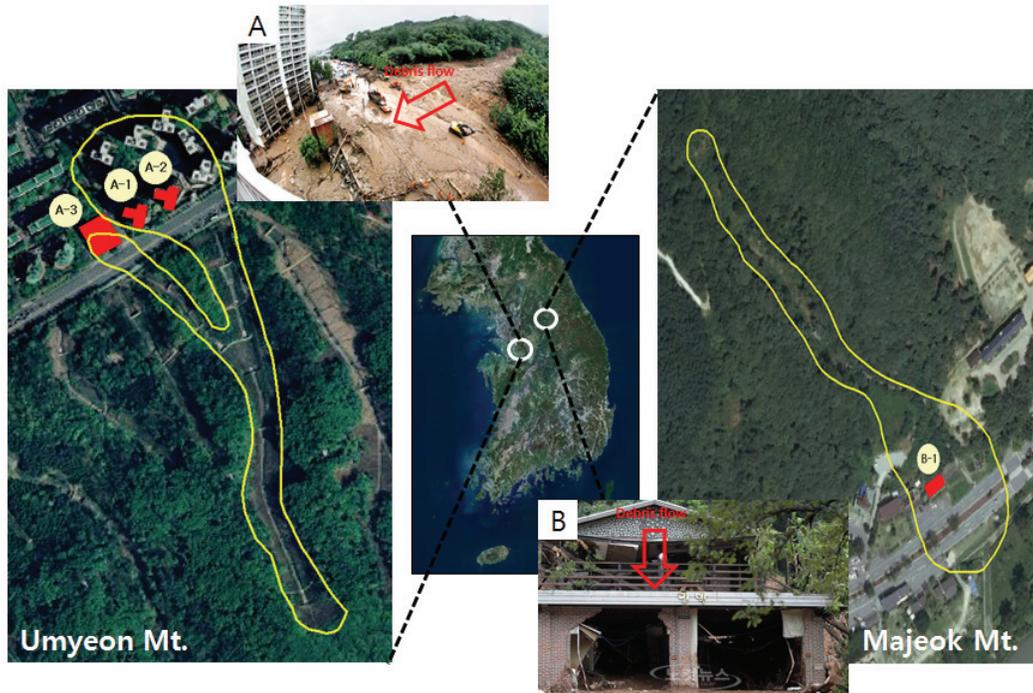
하게 진행 중이다(National Disaster Management Research Institute, 2004, 2011; Korea Forest Service, 2006; Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2009). 그 밖에도 많은 연구자들이 토사재해에 관련된 많은 연구를 진행하고 있으나, 주로 위험지역을 선정하여 산사태 위험지도를 작성하거나 계측을 통해 이상 징후가 발견되었을 때 작동되는 예·경보시스템 또는 대피 기준을 선정하는데 집중되어 왔다(Choi, *et. al.*, 2012). 그러나 2011년 7월 기록적인 강우로 인해 서울시 우면산에서 발생한 대규모 토석류 피해로 도심지의 피해가 크게 이슈가 되면서, 산지 하류부에 위치한 구조물에 대한 취약성 평가가 이루어졌다. Choi, *et. al.*(2012)은 취약성을 평가하는 방법으로 지진에 따른 구조물의 동적응답이론과 HAZUS-MH에서 제시한 손상함수를 서울시 우면산 및 춘천시 마적산에 적용하여 평가하였다. Kang, *et. al.*(2014)은 과거 토석류 피해사례를 이용하여 토석류의 물리적 특성과 구조물의 손상정도를 토석류의 높이, 속도 및 충격압력과 같은 세 가지 함수로 구분하여 취약함수로 표현하였으며, 보강 콘크리트 구조와 비 콘크리트 구조로 구성된 건물의 구조 형식에 따른 취약함수를 산출하였다. 반면 외국의 경우 2000년대 들어서 토석류의 사례를 바탕으로 건물의 취약성에 대한 연구가 시작되었다.

Haugen, *et. al.*(2008)은 토석류의 충격에 대한 구조의 취약성을 평가하기 위해 HAZUS-MH모형에서의 손상 상태 확률을 이용한 모형을 제안하였고, Quan Luna, *et. al.*(2011)은 이탈리아 북부에서 발생한 토석류 피해에 대한 물리적 손상 조사결과와 수치해석모형을 이용하여 토석류의 높이, 충격압력 및 점도와 같은 세 가지 함수로 구성된 경험적인 취약곡선을 산출하였다. Wen, *et. al.*(2012)은 토석류 위험도에 따른 건물의 손상정도를 예측하여 건물의 손상함수를 개발하였으며, Jakob, *et. al.*(2012)은 토석류의 충격력으로부터 얻어진 건물 강도 지수와 건물 손상정도를 침수에서 완전 파괴까지 총 4단계로 구분하여 상관관계를 분석하였다.

Maria(2016)는 이탈리아 South Tyrol의 과거 토석류 발생으로 개발된 취약곡선과 지표기반방법론(IBM)을 이용한 취약곡선을 작성하여 두 취약곡선을 비교하였으며, Kim, *et. al.*(2018)은 Flo-2D모형을 활용하여 유출구를 기준으로 시설물의 유무 및 거리에 따른 토석류 유동특성을 분석하고 시설물에 의해 변화하는 충격력을 고려할 수 있는 토석류 충격력 산정식을 제안하였다.

토석류의 충격력은 구조물에 직접적인 피해를 주는 주요한 원인으로 토석류의 충격력 보다 구조적으로 약한 강도를 갖는 구조물(저항력)의 경우 토석류에 의해 쉽게 손상될 수 있으며, 특히 우리나라의 경우 산지와 인접한 구조물들은 대부분 목조구조물이나 조적식구조물로 토석류에 더욱 취약할 수밖에 없다. 이러한 토석류에 의한 인명 및 재산피해를 저감시키기 위해서는 토석류의 충격력을 정량적으로 산정할 수 있는 방안이 요구되나, 토석류의 충격력 모형을 기반으로 구조물의 영향성까지 고려하는 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 토석류로 인해 발생하는 충격력을 정량적으로 산정하기 위해 토석류를 중심으로 해석하는 운동학적 모델인 동역학적 접근 방법에 근거하여 토석류 흐름특성을 반영한 토석류 유량과 토석류 유동심을 고려한 충격력 산정 모형 Type-1과 산지유역 특성을 반영한 유역의 경사와 길이를 고려한 충격력 산정 모형 Type-2를 개발하였다. 또한 충격력을 산정할 때 토석류가 구조물에 부딪히는 방향에 따라 힘이 상쇄될 수 있기 때문에 토석류의 유하방향과 구조물이 마주하는 방향각을 함께 적용하였다. 개발된 충격력 산정 모형을 정량적으로 비교분석하기 위하여 2011년 7월에 발생한 서울시 우면산 및 춘천시 마적산 토사피해지역을 대상으로 토석류 유출모형인 RAMMS 모형을 이용하여 충격력을 산정하였으며, 산정된 충격력을 이용하여 콘크리트 구조물 및 비 콘크리트 구조물로 분류하여 손상 지수를 산하고 구조물의 손상률과 자산 가치를 이용하여 피해액을 산정하였다.



※ Source: Nocutnews(2011).  
Figure 1. Research area

## II. 연구지역

우리나라의 토사재해는 6월부터 9월 여름철의 태풍 및 집중호우로 인해 발생한다. 2011년 역시 7월 여름철에 국지성 집중호우로 인해 서울시 서초구에 위치한 우면산과 강원도 춘천시의 마적산에서 토석류가 발생하여 많은 인명 및 재산 피해가 발생하였다.

본 논문의 연구지역은 서울시 서초구 우면산 일대에 가장 많은 피해가 발생했던 래미안 아파트 일대와 강원도 춘천시 마적산의 많은 피해가 발생했던 마적산 하류부의 펜션과 민박 일대를 선정하였다. 당시 서울시 서초구 우면산 일대의 누적강우량을 살펴보면 9시간 동안 서초구 281mm, 강남구 318mm, 관악구 348mm, 남현 358mm 이상의 강우가 발생하였으며, 강원도 춘천시의 경우 소양2교 261mm, 지촌초교 257mm, 천전리 306mm 이상의 강우로 인해 발생하였다.

본 논문에서는 서울시 서초구 우면산 일대와 강원도 춘천시 마적산 일대의 1:5000 수치지도를 이용하여 5m × 5m 격자의 DEM을 생성하고 토지이용도와 토양도 또한 동일한 크기로 생성하여 S-RAT 모형과 RAMMS

모형에 적용하였다. <Figure 1>은 연구지역 및 피해사진을 나타냈다.

## III. 연구방법

본 논문의 연구흐름도는 <Figure 2>와 같다. 2011년 실제 토석류를 유발시킨 강우자료를 S-RAT(Spatial runoff assessment tool)모형에 적용하였고 침투홍수량과 유출총량을 산정하여 RAMMS(Rapid mass move simulations)모형의 입력자료로 사용하였다. RAMMS 모형의 추가 입력자료인 토사량은 일본 국토교통성에서 제시한 토사량 산정식에 근거하여 토사량을 산정하였으며, 토사농도의 경우 실험 결과를 토대로 0.4의 결과값을 사용하였다. RAMMS모형에 적용하여 피해면적 및 토석류 유동심, 유속, 충격력을 산정하였다. 산정된 토사량과 토사농도, 유동심, 유속, 방향각을 이용하여 토석류 흐름특성을 반영한 Type-1 모형의 충격력을 산정하였으며, 토사농도, 경사, 윤변, 방향각을 이용하여 산지유역 특성을 반영한 Type-2 모형의 충격력을 산정하였다.

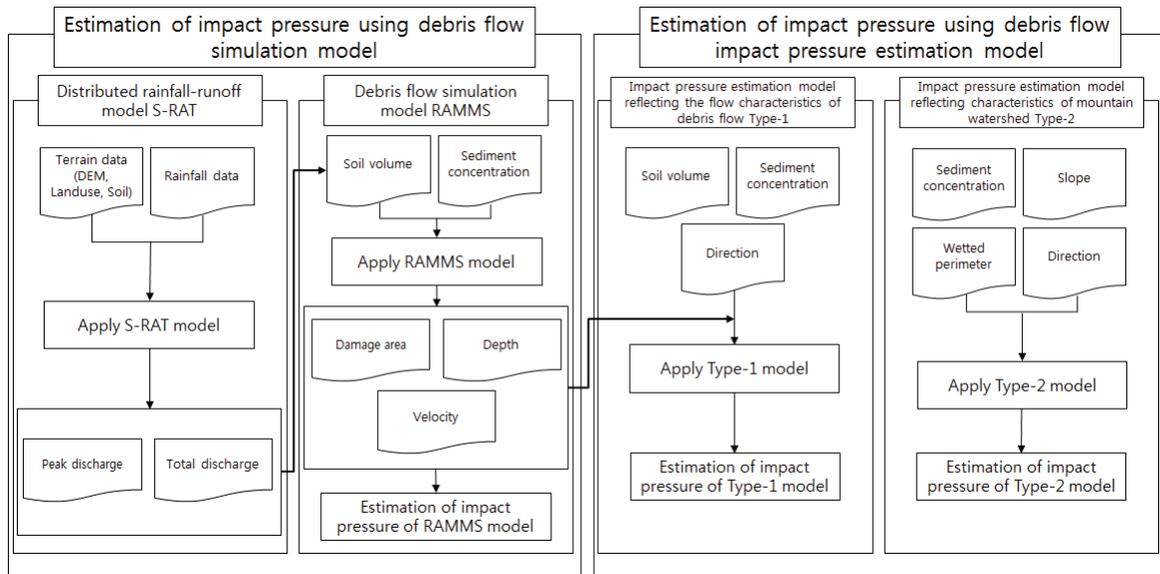


Figure 2. Flowchart of study

또한 산정된 RAMMS모형의 충격력과 Type-1,2모형의 충격력을 Kang & Kim(2014)이 제안한 콘크리트 구조물 및 비 콘크리트 구조물의 손상지수 및 손상함수 산정 방법을 이용하여 손상을 산정하였으며, 구조물의 자산가치를 이용하여 피해액을 산정하였다.

1. 분포형 강우-유출모형 S-RAT

(Spatial Runoff Assessment Tool)

S-RAT(Spatial Runoff Assessment Tool)모형은 Kim, et. al.(2010)이 개발한 분포형 강우-유출모형으로 GIS자료를 이용하여 대상유역을 일정한 크기의 격자로 구성하고 각각의 격자마다 시간간격별 개념적 물수지를 계산함으로써 유역의 시·공간적 유출량 변화를 모의하도록 설계되어 있다. 또한 대부분의 분포형 수문모형들은 모형에 입력될 지형학적 매개변수들을 추출하기 위해 Arc 관련 소프트웨어 또는 IDRISH 등과 같은 GIS 관련 상용패키지에 의존하나 S-RAT은 자체적으로 매개변수를 추출하여 입력자료가 간소화 되어 있다. 식 (1)은 격자별 물수지 추정 방정식을 나타냈다 (Nam et. al., 2016).

$$\frac{dF(t)}{dt} = -F(t)\left[\frac{1}{H_s} + \frac{P}{H \cdot S}\right] + P - E \quad (1)$$

여기서 F는 침투저류조의 침투능, t는 시간, P는 지표유출량, E는 증발산량 H는 매개변수로 상수이다.

2. 토석류 2차원 수치모형 RAMMS

(Rapid Mass Move Simulations)

RAMMS모형은 스위스 눈사태 기관인 SLF(Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research)인 WSL(Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee Und Landschaft)팀에서 개발되었고 Dynamic modeling으로 토석류(Debris flow), 낙석(Rockfall), 눈사태(Avalanches)의 세 가지 모듈을 수치표고모형(DEM)에서 분석이 가능하도록 구성되어 있다(RAMMS Manual, 2011). 모형의 기본방정식은 Vollemy-salm의 접근 방법에 기초하고 식 (2)와 같이 표현된다.

$$S = \mu N + (1 - \mu) C - (1 - \mu) C \exp\left(-\frac{N}{C}\right) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (2)$$

여기서 S는 마찰력(N), C는 유동물질에 대한 응집력,  $\mu$ 는 dry-coulomb type friction coefficient, g는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $\rho$ 는 밀도( $kg/m^3$ ), U는 유속( $m/s$ ), N은 활동면에 대한 수직응력(Mpa)을 의미한다. C는 응

집력을 가지고 있는 흐름 물질로,  $N=0$ ,  $U=0$ 의 조건일 때 마찰력  $S$ 는 0이 된다.  $C$ 의 값이 증가하면 마찰력은 증가하게 되고 이에 전단응력이 증가하게 되어 토석류나 눈사태의 흐름이 약해지는 현상이 발생한다. 식 (3)은 RAMMS 모형에서 사용되는 충격력 산정식이다 (Nam, *et. al.*, 2016).

$$P = 0.5 C_d \rho U^2 \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 충격력(Kpa)이며,  $C_d$ 는 항력계수,  $\rho$ 는 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $U$ 는 속도(m/s)이다.

3. 토석류 흐름방향을 고려한 구조물 방향각 산정  
본 논문에서는 충격력을 산정할 때, 토석류가 구조물에 부딪히는 방향에 따라 힘이 상쇄될 수 있기 때문에 토석류의 유하방향과 건축물이 마주하는 방향각( $\sin\beta$ )을 고려하였다. (Figure 3)은 토석류 흐름방향을 고려한 구조물 방향각 산정에 대한 개념도이며, 아래 그림과 같이 토석류 흐름방향과 건물 벽면이 직각( $\sin\beta = 90^\circ$ )이면 토석류 충격력을 모두 받는 것으로 볼 수 있다(Figure 4).

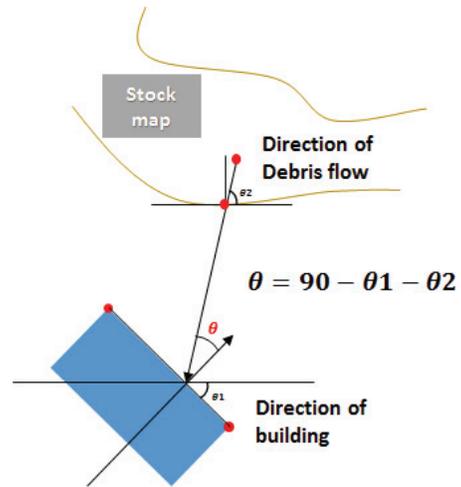


Figure 3. Concept of building direction estimation

4. 토석류 충격력 산정 모형 개발

1) 토석류 흐름특성을 반영한 충격력 산정 모형 (Type-1)

본 논문에서는 토석류 충격력을 산정하기 위하여 동역학적 모델을 기반으로 밀도, 유속을 재해석한 모형으로, 이를 본 논문에서는 Type-1이라 쓰도록 하겠다. 유량(Q)과 유동심(H)을 고려하여 유속을 산정하기 위하여 토석류의 이동 너비를 단위폭으로 가정하여 토석류의 유량(Q)을 식으로 표현하면 다음과 같다.

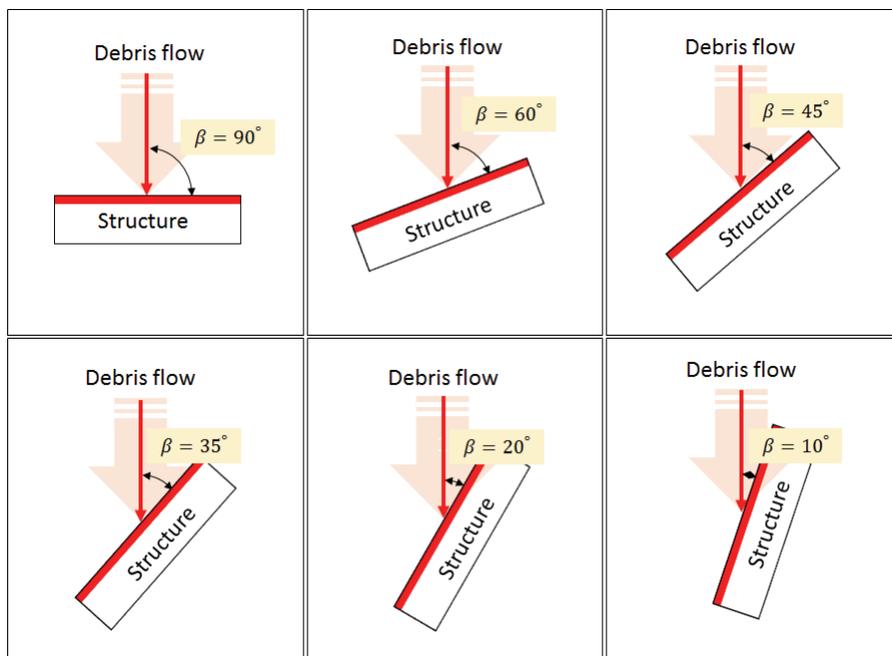


Figure 4. Direction angle with Wall of Building according to debris flow direction( $\beta$ )

$$Q = A \cdot V \tag{4}$$

여기서, Q는 유량(m<sup>3</sup>/s), A는 면적(m<sup>2</sup>), V는 속도(m/s)이며, 식 (3)을 이용하여 토석류의 유속을 산정하면 다음과 같다.

$$V = \frac{Q}{A} \tag{5}$$

여기서, 토석류의 단면적(A)을 피크유동심(Hmax)과 폭(W)으로 나타낼 수 있으며 다음식과 같이 표현이 가능하다.

$$V = \frac{Q_{\max}}{wh_{\max}} \tag{6}$$

여기서, W는 폭(m), Hmax는 피크유동심(m), Qmax는 피크유량(m<sup>3</sup>/s)이며, 식 (6)를 이용하여 유량과 유동심을 고려한 충격력 산정식은 다음과 같다.

$$P = \{ \alpha \delta C + (1 - C) \rho_w \} \left( \frac{Q_{\max}}{wh_{\max}} \right)^2 \sin \beta \tag{7}$$

여기서, C는 토사의 농도, ρ<sub>w</sub>는 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)를 의미하며, sinβ는 토석류의 유하방향과 구조물 벽면이 마주하는 방향각(sinβ), α는 보정계수로서 과도하게 산정되는 충격력을 조정하기 위해 적용한 것으로 H bl, *et. al.*(2009), Moriguchi, *et. al.*(2009) 등 기존연구에 의하면 토석류에 의한 충격력은 5~250kN/m<sup>2</sup>의 범위를 갖는 것으로 나타났으며, 토사 밀도 δ는 선행연구에 따라 2,000~2,200kg/m<sup>3</sup>의 범위로 분포한다고 나타냈다 (Okuda, *et. al.*, 1980, Li, *et. al.*, 1997).

2) 지형학적 특성을 반영한 충격력 산정 모형 (Type-2)

Type-1의 충격력 모형과 동일하게 동역학적 모델을

기반으로 산지구역의 지형학적 특성을 반영하기 위해 개발한 충격력 산정 모형이며, 본 논문에서는 Type-2라고 쓰겠다.

$$P_{\max} = k \rho V^2 \tag{8}$$

여기서, k는 경험적계수이며, V는 속도(m/s) ρ는 밀도(kg/m<sup>3</sup>)이며, 밀도는 물질의 질량을 부피로 나눈 고유한 값으로 토석류의 밀도를 산정하기 위해 공기의 질량은 제외하고 흙의 밀도와 물의 밀도를 이용하여 토석류의 농도 비율에 따라 다음과 같이 재해석하였다.

$$P_f = \delta C_v + (1 - C_v) \rho_w \tag{9}$$

여기서, δ는 토사의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)를 의미하며, C<sub>v</sub>는 토사의 농도, ρ<sub>w</sub>는 물의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)를 나타낸다. 밀도를 재해석하여 동역학적 모델에 적용하여 수정하면 다음과 같다.

$$P = k \{ \delta C_v + (1 - C_v) \rho_w \} V^2 \tag{10}$$

토석류의 유속(V)을 산정하기 위한 식은 다양하게 존재하지만 본 논문에서는 Manning 방정식을 활용하여 유속부분을 재해석하였다. Chézy 방정식과 유사한 Manning 방정식은 강 또는 수로에서의 평균유속을 산정하는데 유용하며 실용적이다(Holland, 2016).

$$P = \left[ k \{ \delta C_v + (1 - C_v) \rho_w \} \left( \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \right)^2 \right] \sin \beta \tag{11}$$

(0 ≤ α ≤ 0.4)

여기서, n은 조도계수, R은 윤편(m), I 동수경사, α는 보정계수이며 범위는 0~0.4이다.

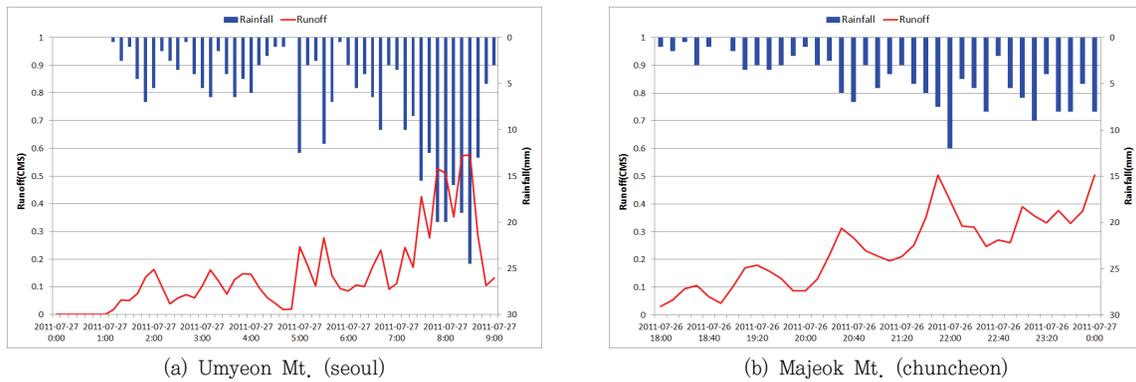


Figure 5. Hydrograph

#### IV. 연구결과

##### 1. 토석류 충격력 산정

###### 1) 홍수유출모의

토석류 유출모형의 입력자료인 토사량과 침투홍수량을 산정하기 위하여 실제 발생했던 2011년 7월 27일 강우자료를 이용하여 분포형 강우-유출모형 S-RAT에 적용하였다. 본 논문에서는 유역에서의 유출량이 아닌 토석류를 유발하는 유출량을 산정하기 위하여 토석류가 발생한 지점의 유출량과 침투홍수량을 산정하였다. 산정결과 서울시 우면산의 유출총량은 4,829m<sup>3</sup>/s이며, 침투홍수량은 0.58m<sup>3</sup>/s로 산정되었으며, 춘천시 마적산의 경우 유출총량은 4,914m<sup>3</sup>/s이며, 침투홍수량은 0.52m<sup>3</sup>/s로 산정되었다.

###### 2) RAMMS 모형의 입력변수 산정

토석류 모의 시 모형의 입력변수는 모형의 결과에 크게 영향을 미친다. 따라서 적정 입력변수의 설정은 토석류 거동 및 영향범위 분석에서 중요한 역할을 한다. 토석류 유출모형인 RAMMS 모형의 입력변수는 토사의 밀도, 토사량, 침투홍수량, 유속, 점성마찰계수, 난류마찰계수가 있다. 본 논문에서는 일본 국토교통성(2007)이 제시한 사방시설물 계획과 모델링에 적합한 토사의 밀도의 범위는 1,800~2,600kg/m<sup>3</sup> 라는 점에서 두 값의 평균인 2,200kg/m<sup>3</sup>을 이용하였으며, 토사량 산정 또한 일본 국토교통성에서 제시한 유출총량을 이용한 토사농도계수에 따른 토사량 산정식을 사용하

였다. 유출총량은 앞서 산정한 결과를 사용하였으며, 토사 농도의 경우 Jang, *et. al.*(2011)이 토석류의 유출토사 체적 농도는 0.38~0.42의 범위의 토석류 실험 결과를 제시하였으며, 토석류와 가장 유사한 이류(Mud flow)는 토사농도 0.4~0.45일 때 토석류와 가장 비슷한 유체의 특성을 지닌다는 점에서 0.4의 토사농도 값을 사용하였다. 유속과 점성마찰계수, 난류마찰계수는 Nam, *et. al.*(2016)에서 NSI(Net Success Index) 정량지수를 이용하여 최적의 매개변수를 산정하였으며, 유속은 8m/s, 점성마찰계수 0.1 $\mu$ , 난류마찰계수 950m/s<sup>2</sup>을 사용하였다.

Table 1. Input data of RAMMS model

Input data	Seoul	Chuncheon
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2,600	2,600
Soil volume (m <sup>3</sup> )	1,931	2,086
Velocity (m/s)	8	8
Viscous friction ( $\mu$ )	0.1	0.1
Urbulent fiction (m/s <sup>2</sup> )	950	950

###### 3) 충격력 모형의 입력변수 산정

앞서 산정한 입력자료를 토대로 RAMMS 모형에 적용하여 충격력 모형의 입력자료인 유동심을 산정하였다. 서울시 우면산의 구조물별 유동심은 A-1 1.67m, A-2 1.59m, A-3 1.99m로 산정되었으며 춘천시 마적산의 유동심은 B-1이 0.36m로 산정되었다. 또한 Type-1, Type-2의 추가적인 입력 자료는 앞서 산정했던 토사 밀도, 물의 밀도, 토사농도를 사용하였으며, 계

Table 2. Estimation of impact pressure by debris flow damage structure

Impact pressure model	Area	Structure	Impact pressure(kPa)	state of actual damage
Type-1	Seoul	A-1	313.86	complete
		A-2	582.36	complete
		A-3	297.98	complete
	Chuncheon	B-1	66.46	complete
Type-2	Seoul	A-1	210.86	complete
		A-2	278.23	complete
		A-3	282.37	complete
	Chuncheon	B-1	58.66	complete
RAMMS	Seoul	A-1	201.52	complete
		A-2	197.37	complete
		A-3	215.97	complete
	Chuncheon	B-1	43.16	complete

류 폭은 해당 구역의 평균 폭으로 산정하였고 방향각의 경우 토석류 유하방향과 구조물이 마주하는 방향각을 GIS를 이용하여 A-1은 31°, A-2 65.7°, A-3 5.3°, A-4 53°, B-1이 14.8°로 산정하였다. 또한 Type-2의 보정계수의 경우 Kim, *et. al.*(2018)에 의하면 0.4의 보정계수가 가장 적절한 충격력이 산정된다고 제시하여 0.4의 값을 사용하였다.

4) 충격력 산정

본 논문에서 제시한 토석류 흐름특성을 반영한 충격력 산정 모형 Type-1과 지형학적 특성을 반영한 충격력 산정 모형 Type-2, 그리고 RAMMS 모형의 충격력을 산정하였으며 이의 결과는 <Table 2>와 같다. 서울시 우면산의 Type-1을 이용한 충격력은 A-1 313.86Kpa, A-2 582.36Kpa, A-3 297.98Kpa로 산정되었으며, Type-2를 이용한 충격력은 A-1 210.86Kpa,

A-2 278.23Kpa, A-3 282.37Kpa이였으며, RAMMS 모형의 충격력은 A-1이 201.52Kpa, A-2 197.37Kpa, A-3 215.97Kpa로 산정되었다. 춘천시 마적산의 충격력 산정 결과는 Type-1의 경우 B-1이 66.46Kpa, Type-2 58.66Kpa, RAMMS 모형의 충격력이 43.16Kpa로 산정되었다. RAMMS 모형의 산정결과를 기준으로 비교하였을 때 Type-1 충격력 산정 모형은 과도하게 산정되는 것으로 나타났고, 이는 모형의 입력자료인 유량이 토석류 피해가 발생한 단면적보다 높은 값을 보이는 것이 주요 원인으로 판단된다. 또한 토석류 진행 방향 및 구조물의 방향각의 차이에 따라 충격력의 변화가 큰 것으로 판단된다. Type-2 모형은 RAMMS 모형의 결과와의 차이는 작은 것으로 산정되었다. Table 1은 충격력 및 피해 상태를 나타낸 표이며, <Figure 6>은 산정된 충격력을 그래프로 나타낸 것이다.

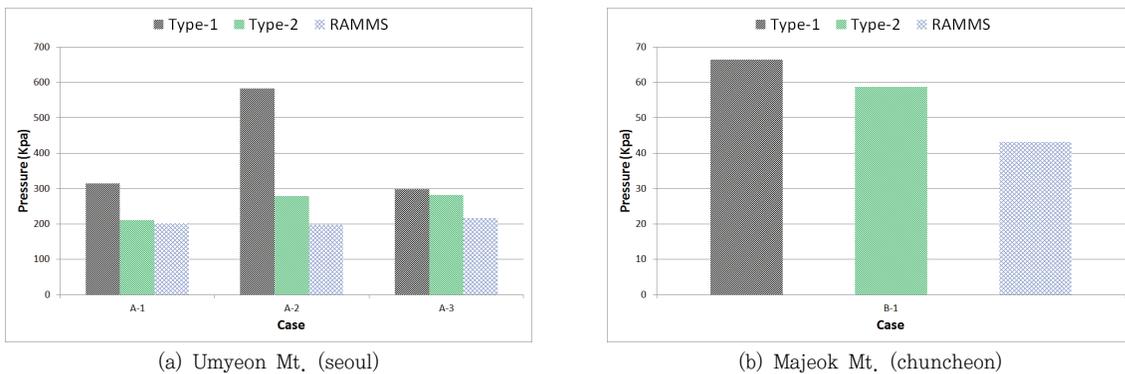


Figure 6. Estimation of impact pressure by structure

2. 토사피해 구조물의 피해액 산정

1) 구조물 손상 지수를 이용한 손상률 산정

토석류 충격력에 따른 구조물의 손상률을 산정하기 위하여 Kang, *et. al.*(2014)이 제안한 구조물 손상지수 산정식을 이용하였다. 연구지역의 구조물 재료는 서울시 우면산 래미안 아파트 일대 4개소가 콘크리트 구조물 이며 춘천시 마적산 1개소가 조적조로 비 콘크리트로 분류하여 총 5개 구조물의 손상률을 산정하였다. 구조물의 손상은 정도에 따라 0~1의 값을 갖고 있으며, 0.1~0.3은 경미(Slight), 0.3~0.6 보통(Moderate), 0.6~0.8 반파(Extensive), 0.8~1.0 완파(Complete) 4단계로 분류된다(Kang et al, 2014). 충격력 기반의 콘크리트 구조물과 비 콘크리트 구조물의 손상지수 산정식은 다음과 같다.

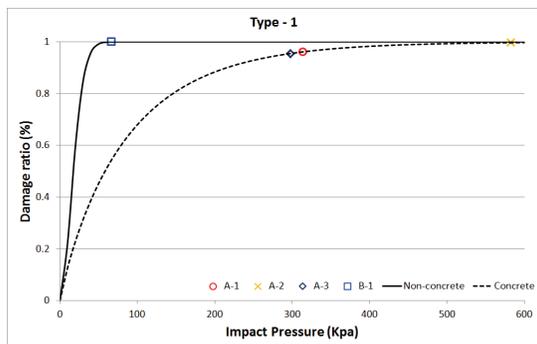
$$Concrete = 1 - e^{(-0.004 * p^{1.812})} \quad (12)$$

$$Non - concrete = 1 - e^{(-0.0167 * p^{0.917})} \quad (13)$$

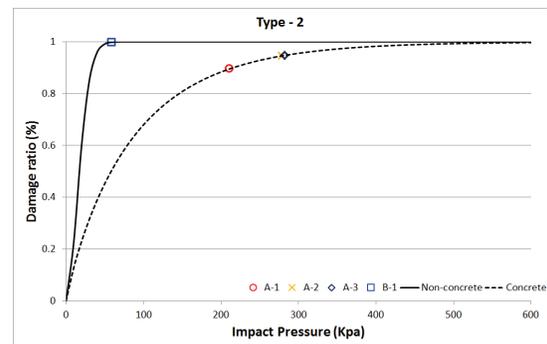
Type-1의 손상률 산정결과 A-1의 손상률은 96%로 완파, A-2 100% 완파, A-3 96% 완파, B-1이 100%로 완파로 산정되었으며, Type-2의 경우 A-1이 90% 완파, A-2 95% 완파, A-3 95% 완파, B-1 100% 완파로 산정되었고, RAMMS 모형의 충격력을 이용한 손상률 산정 결과 A-1이 89% 완파, A-2 88% 완파, A-3 90% 완파, B-1이 97% 완파로 산정되었다(Figure 8). 실제 서울시 우면산 및 춘천시 마적산의 현장조사 결과 A-1, A-2가 심각한 손상, A-3가 완파되었으며, B-1 또한 완파된 것으로 조사되었다. RAMMS의 손상률과 Type-1, Type-2의 손상률을 비교해보면 Type-1의 충격력이 RAMMS의 손상률에 비해 과도하게 산정되었으며, Type-2의 경우 RAMMS의 손상률과 유사한 결과를 나타내고 있으며, Type-1 충격력 모형보다 Type-2의 충격력 모형의 적용이 적합하다 판단된다.

2) 구조물 손상률을 이용한 토사피해액 산정

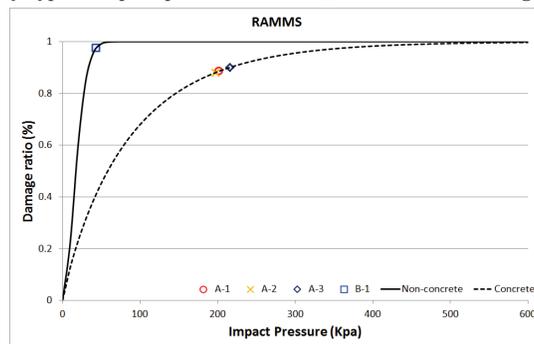
구조물의 직접 피해액을 산정하기 위해서는 먼저 피해 구조물에 대한 자산가치가 필요하다. 본 논문에서는



(a) Estimation of damage ratio by type-1 impact pressure



(b) Estimation of damage ratio by type-2 impact pressure



(c) Estimation of damage ratio by RAMMS model impact pressure

Figure 7. Estimation of damage ratio using damage curve

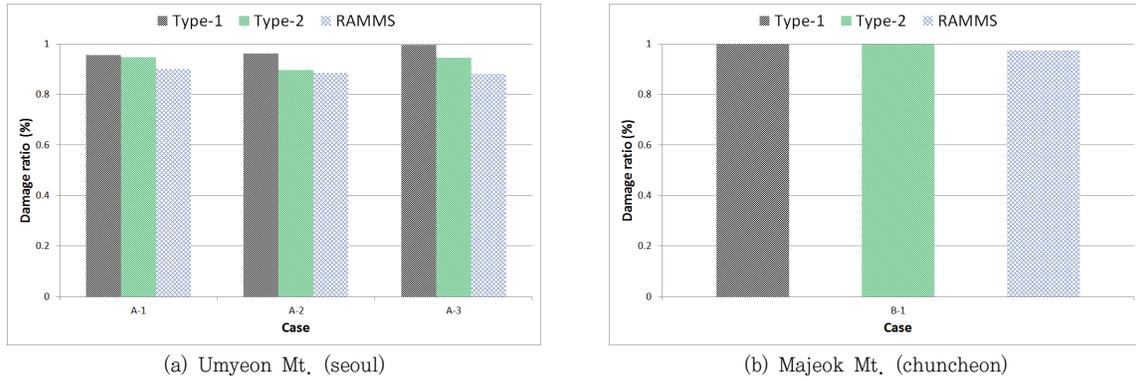


Figure 8. Estimation of damage ratio by structure

실제 설계도서 및 공사내역서를 기준으로 건축단가에 대한 세부적 산출이 가능한 한국감정원의 건축신축단가표(2016)를 사용하여 구조물의 자산가치를 평가하였다. 또한 산정된 손상률과 자산가치를 이용하여 토석류 피해로 인한 구조물의 피해액을 산정하였다. 구조물의 자산가치 평가 방법은 식 (13)과 같으며, 피해액을 산정하는 방법은 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{구조물 자산가치} &= \text{건축면적} \times (1+\text{지하층수}) \\ &\times \text{건물신축가격} \times (1-\text{감가상각률}) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, 지하층수가 있는 경우는 1, 지하층이 없는 경우는 0으로 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{구조물 피해액} &= \text{구조물의 자산가치} \\ &\times \text{구조물의 손상률} \end{aligned} \quad (14)$$

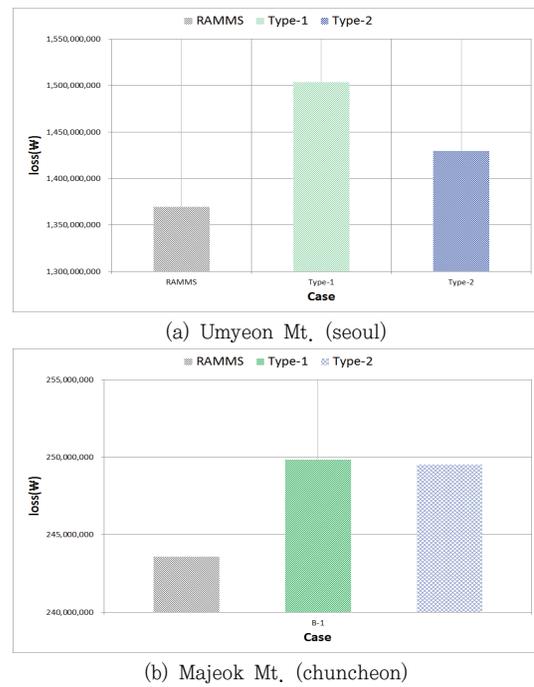


Figure 9. Estimation of debris flow loss by case

Table 4. Estimation of loss using structure damage ratio

Impact pressure model	Area	Structure	Impact pressure (kPa)	Damage ratio (%)	Asset value (Thousand)	Loss (Thousand)
RAMMS	Seoul	A-1	201,52	89	629,405	557,281
		A-2	197,37	88	593,605	522,754
		A-3	215,97	90	321,221	289,292
	Chuncheon	B-1	43,16	97	249,913	243,554
Type-1	Seoul	A-1	313,86	96	629,405	605,062
		A-2	582,36	100	593,605	593,605
		A-3	297,98	96	321,221	306,769
	Chuncheon	B-1	66,46	100	249,913	249,831
Type-2	Seoul	A-1	210,86	90	629,405	563,627
		A-2	278,23	95	593,605	561,341
		A-3	282,37	95	321,221	304,442
	Chuncheon	B-1	58,66	100	249,913	249,913

〈Figure 9〉는 토사피해액을 산정하여 지역별로 합한 결과이다. 여기서 볼 때 서울시 우면산의 토사피해액은 RAMMS 모형의 결과를 기준으로 Type-1이 10% 과도하게 산정되었으며, Type-2의 경우 4% 과도하게 산정되었다. 또한 춘천시 마적산의 경우 Type-1이 약 3%, Type-2는 2%로 과도하게 산정되었다. 또한 실제 발생했던 피해액과 비교하고자 하였으나, 실제 구조물별 피해액의 대한 자료는 없기 때문에 본 논문의 방법론을 토대로 피해액을 비교하였다.

## V. 결론

본 논문에서는 토석류 피해로 인해 구조물에 직접적인 영향을 미치는 토석류 충격력을 정량적으로 산정하기 위하여 토석류의 유하방향과 건축물이 마주하는 방향각을 고려한 토석류 흐름특성을 반영한 충격력 산정 모형 Type-1과 산지유역 특성을 반영한 충격력 산정 모형 Type-2를 개발하였다. 또한 신뢰성 평가를 위하여 2011년 토석류 피해지역인 서울시 우면산 래미안아파트 일대와 춘천시 마적산 펜션 및 민박 일대를 대상으로 충격력 모형 Type-1, Type-2를 이용하여 충격력을 산정하였으며, 상용모형인 토석류 유출모형 RAMMS에서 산정한 충격력과 비교하여 구조물 재료에 따른 손상률을 산정하여 최종적으로 토석류 피해에 따른 구조물 피해액을 산정하였다.

1) 토석류를 유발하는 강우분석을 위해 분포형 강우-유출모형 S-RAT을 이용하여 유출총량 및 첨두홍수량을 산정하였다. 서울시 우면산 래미안 아파트 일대의 유출총량은  $4,829\text{m}^3/\text{s}$ 이며, 첨두홍수량은  $0.58\text{m}^3/\text{s}$ 로 산정되었으며, 춘천시 마적산의 경우 유출총량은  $4,914\text{m}^3/\text{s}$ , 첨두홍수량은  $0.52\text{m}^3/\text{s}$ 로 산정되었다.

2) 충격력 모형의 입력변수는 지형자료 및 RAMMS 모형에서 산정된 유동심을 이용하여 산정하였으며, 토석류가 구조물에 부딪히는 방향에 따라 힘이 상쇄될 수 있기 때문에 토석류의 유하방향과 구조물이 마주하는 방향각을 GIS를 이용하여 산정하였다.

3) 토석류의 충격력 및 구조물의 손상률 산정 결과 RAMMS 모형을 기준으로 볼 때 Type-1 충격력 산정 모형은 RAMMS 모형의 충격력에 비해 과도하게 산정되는 것으로 나타났으며, 이는 모형의 입력자료인 유량이 토석류 피해가 발생한 단면적 보다 높은 값을 보이는 것이 주요 원인으로 보이며, 지형적인 변수가 큰 요인이 된다고 판단된다. Type-2의 충격력 산정 모형은 RAMMS 모형의 충격력과 미비한 차이를 보인다. 또한 손상률을 보면 Type-1의 경우 콘크리트 구조물(A-1 ~ A-3) 3개소, 비 콘크리트 구조물(B-1) 1개소 총 4개소 모두 완파로 산정되었으며, Type-2 또한 모두 완파되는 것으로 나타났으며 실제 피해현황을 보면 콘크리트 구조물, 비 콘크리트 구조물 모두 완파되었다.

4) 구조물의 피해액은 구조물의 건축신축단가표(2016)를 이용하여 구조물의 면적, 신축가격, 지하층수의 유무 등을 통해 자산가치를 산정하고, 이에 구조물 손상률을 합하여 토석류로 인한 구조물의 피해액을 산정하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원(과제번호 18AWMP-B083066-05)과 행정안전부장관의 재난관리분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

## References

- Choi, Woo Il, Su Gon Lee, Byok Kyu Lee, and Seung Jin Jang. 2012. A Study of Vulnerability of Structure by Debris Flow. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 12(3): 141-146.
- Forschungsanstalt WSL. 2011. RAMMS Manual.
- Haugen, E. D. and A. M. Kaynia. 2008. Vulnerability of Structures Impacted by Debris Flow. *Landslides and Engineered Slopes*. PP: 381-387.
- Holland, P. G. 2016. *Encyclopedia of Hydrology and Water Resources Part of the Series Encyclopedia of Earth Science*.

- Springer Netherlands. PP: 475.
- Hübl, J., J. Suda, D. Proske, R. Kaitna, and C. Scheidl. 2009. Debris Flow Impact Estimation In: Popovska C., Jovanovski M.(eds) *Eleventh International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*. 1: 137-148.
- Jakob, M., D. Stein, and M. Ulmi. 2012. Vulnerability of Buildings to Debris Flow Impact. *Natural Hazards*. 60(2): 241-261.
- Jang, Chang Deok, Yong Ho Yoon, and Kye Won Jun. 2011. Numerical Simulation on Debris Flow Disaster Area Using Kanako-1D. *Crisisonomy*. 7(6): 205-214.
- Kang, Hyo Sub and Yun Tae Kim. 2014. Physical Vulnerability Function of Buildings Impacted by Debris Flow. *Journal of Korea Society of Civil Engineers*. 14(5): 133-143.
- Kang, Hyo Sub and Yun Tae Kim. 2015. Study on Physical Vulnerability Curves of Buildings by Numerical Simulation of Debris Flow. *Journal of Korea Society of Civil Engineers*. 15(5): 155-167.
- Kim, Byung Sik, Seon Kyoo Yoon, Seong Jin Hong, and Hyun Han Kwon. 2010. Development of Grid-based Conceptual Hydrologic Model. *Journal of Korea Water Resources Association*. 43(7): 667-679.
- Kim, Man Il, Jae Hawn Kwak, and Byung Sik Kim. 2018. Assessment of Dynamic Impact Force of Debris Flow in Mountain Torrent based on Characteristics of Debris Flow. *Environmental Earth Sciences*. 77(14): 538.
- Korea Appraisal Board. 2016. Ticket Price New Building.
- Korea Forest Service. 2006. Criteria for Grading Hazardous Landslides and Basic Data for Grading. Research Report.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. 2009. Development of Forecasting Method of Debris flow Generation Characteristics and Damage Scale. Research Report.
- Li, J. and D. Luo. 1997. The Formation and Characteristics of Mudflow and Flood in the Mountain Area of the Dachao River and its Prevention. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 25: 470-484.
- Maria, Papatoma-Kohle. 2016. Vulnerability Curves vs. Vulnerability Indicator: Application of an Indicator-based Methodology for Debris-flow Hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 16: 1771-1790.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. 2007. Guidelines for Establishing a Basic Plan for Erosion Control. PP: 1-74.
- Moriguchi, S., R. I. Borja, A. Yashima, and K. Sawada. 2009. Estimating the Impact Force Generated by Granular Flow on a Rigid Obstruction. *Acta Geotech*. 4: 57-71.
- Nam, Dong Ho, Suk Ho Lee, Kye Won Jun, and Byung Sik Kim. 2016. A Study on the Debris Flow Movement and the Run-out Calculation Using the Coupling of Flood Runoff Model and Debris Flow Model. *Crisisonomy*. 12(8): 131-143.
- National Disaster Management Research Institute. 2004. Study on the Monitoring & Detection of Slope Failure(I): Field Investigation and Case Studies. Research Report.
- National Disaster Management Research Institute. 2011. Establishment of Failure Warning & Evacuation Criteria for Steep Slopes. GIS-Based Warning System for Steep Slope. Research Report.
- Okuda, S., K. Okunishi, and G. Suwa. 1980. Observation of Debris Flow at Kamikamihori Valley of Mt. Yakedake, Excursion Guide-Book for Sym. IGU Commission on Field Experiments in Geomorphology. PP: 116-139.
- Quan, Luna B., J. Blahut, C. J. van Westen, S. Sterlacchini, T. W. J. van Asch, and S. O. Akabas. 2011. The Application of Numerical Debris Flow Modeling for the Generation of Physical Vulnerability Curves. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 11(7): 2047-2060.
- The Seoul Institute. 2014. Additional Supplementary Investigation on the Cause of Umyeon Mountains Landslide. Research Report.
- Wen, C. L., C. T. Ting, and H. H. Chih. 2012. Building Vulnerability to Debris Flows in Taiwan: A Preliminary Study. *Natural Hazards*. 64(3): 2107-2128.
- Korean References Translated from the English*
- 강효섭, 김운태. 2014. 토석류에 의한 건물의 물리적 취약함수 특성. 한국방재학회논문집. 14(5): 133-143.
- 강효섭, 김운태. 2015. 토석류 수치해석을 통한 건물의 물리적 취약곡선 연구. 한국방재학회논문집. 15(5): 155-167.
- 국립산림과학원. 2009. 토석류 발생특성과 피해규모 예측기법

- 개발. 연구보고서.
- 국립재난안전연구원. 2004. 사면붕괴 감지 및 관측에 관한 연구(I): 현장조사 및 국내외 사례를 중심으로 연구보고서.
- 국립재난안전연구원. 2011. 급경사지 붕괴정보 및 대피기준설정, GIS기반 급경사지 붕괴위험도 판단시스템 개발.
- 김병식, 윤선규, 홍승진, 권현한. 2010. 격자기반의 개념적 수문 모형의 개발. 한국수자원학회논문집. 43(7): 667-679.
- 남동호, 이석호, 전계원, 김병식. 2016. 홍수유출모형과 토석류 모형의 Coupling을 이용한 토석류 이동과 확산범위 산정에 관한 연구. Crisisonomy. 12(8): 131-143.
- 산림청. 2006. 산사태 위험지 등급선정 기준 및 등급 판정을 위한 기초자료. 연구보고서.
- 서울연구원. 2014. 우면산 산사태 원인 추가·보완 조사. 최종 보고서.
- 일본국토교통성. 2007. 사방기본계획 수립지침(파면·유목 대책편). PP: 1-74.
- 장창덕, 윤영호, 전계원. 2011. Kanako-1D를 이용한 토석류재해지역의 수치모의. Crisisonomy. 7(6): 205-215.
- 최우일, 이수곤, 이벽규, 장승진. 2012. 토석류에 의한 구조물 취약성 평가에 관한 연구. 한국방재학회논문집. 12(3): 141-146.
- 한국감정원. 2016. 건축신축단가표.
- 한국지질자원연구원. 2009. 산사태재해 예측 및 저감기술 개발. 연구보고서.

Received: Oct. 22, 2018 / Revised: Nov. 19, 2018 / Accepted: Nov. 26, 2018

## 토석류 충격력 산정 모형 개발을 통한 토사피해액 산정

국문초록 최근 기후변화로 인한 국지성 집중호우 및 무분별한 산지 개발 등 다양한 원인으로 인해 산사태, 토석류와 같은 토사재해에 의한 인명·재산피해가 빈번하게 발생하고 있다. 산지에서 발생하는 산사태는 계류로 유입되면서 토석류로 발달하여 하부로 유하하게 되며, 토석류에 의해 발생하는 충격력은 구조물에 심각한 피해를 주는 주요한 원인이다. 이러한 토석류에 대한 피해를 저감하기 위해서는 토석류의 충격력을 정량적으로 산정하고 이를 기초로 하여 사방시설 및 위험지역의 구조물을 평가하는 기술이 요구된다. 본 논문에서는 토석류로 인해 발생하는 구조물 피해를 정량적으로 분석하기 위해 충격력 기반의 토석류 흐름특성을 반영한 충격력 산정 모형 Type-1과 산지구역의 지형특성을 반영한 충격력 산정 모형 Type-2를 개발하였으며, 상용모형인 토석류 유출모형 RAMMS 모형의 충격력을 기준으로 Type-1과 Type-2의 충격력을 비교하여 신뢰성을 검증하였다. 또한 산정된 충격력을 이용하여 구조물의 손상률을 산정하고, 최종적으로 토석류 피해로 인한 구조물의 토사피해액을 산정하였다. 토사피해액 산정 결과 RAMMS 모형을 기준으로 서울시 우면산의 Type-1은 10% 과대 산정되었으며, Type-2 4% 과대 산정되었다. 춘천시 마적산은 Type-1이 3%, Type-2는 2% 과대 산정되었다.

주제어 : 토석류, 충격력 모형, RAMMS, 토사피해액

Profiles **Dong Ho Nam** : He received his Master of engineering from Kangwon University, Korea in 2014. He is a Ph.D course of the Department of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering at Kangwon National University. His interesting subject of research is Landslide and Hydrological Analysis and Radar rainfall([skaehdghkk@kangwon.ac.kr](mailto:skaehdghkk@kangwon.ac.kr)).

**Dong Ho Kang** : He received his Master of engineering from Kangwon University, Korea in 2018. He is a Ph.D course of the Department of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering at Kangwon National University. His interesting subject of research is Landslide and Hydrological Analysis ([kdh@kangwon.ac.kr](mailto:kdh@kangwon.ac.kr)).

**Byung Sik Kim** : He received his B.A., M.A., Ph.D. from Inha University Korea in 2005. He is a Professor of the Department of Urban & Environmental Disaster Prevention Engineering at Kangwon National University, in which he has taught since 2011. His interesting subject and area of stochastic hydrology and climate change. He has published about 150 articles in journals and written 3 books ([hydrokbs@kangwon.ac.kr](mailto:hydrokbs@kangwon.ac.kr)).