

An Analysis of Debris-Flow Propagation Characteristics and Assessment of Building Hazard Mapping Using FLO-2D

- The Case of Chuncheon Landslide Area -

Jung Ryel Choi⁺

Development Department, SDM ENC Co., Ltd., Gasan Digital 1-ro, Geumcheon-gu, Seoul, Korea

Abstract

Urbanization of mountain areas is upscaling debris-flow damage including a lot of human casualties, such as the 2011 landslide in Chuncheon City in Korea. The purpose of this study is to understand the propagation characteristics of debris-flow using a numerical model and to quantitatively determine the hazard of urban buildings. For this purpose, we simulated debris-flow velocity and depth using the FLO-2D numerical analysis model and analyzed the potential effect in each damaged building by time of day. The correlation between the model results and the satellite images after the landslide was analyzed, and then the risk map was created by using the derived velocity and depth. Through this study, it was possible to quantitatively analyze the maximum flow velocity and depth of debris-flow in the form of raster and vector in the GIS lattice and to produce the risk map effectively by using the tools provided in FLO-2D.

Key words: debris-flow analysis, landslide, propagation characteristics, hazard, Flo-2D

1. 서론

우리나라는 매년 집중호우로 인해 급경사지 재난이 빈번하게 발생하고 있으며(NDMI, 2011), 도시화에 따른 산지 점용의 증가로 산사태나 토석류로 인한 피해가 대형화되고 있는 추세이다(Oh, *et. al.*, 2013; Choi, *et. al.*, 2012). 특히 2011년 7월 집중호우로 서울시 우면산 및 춘천시 마적산 산사태로 발생된 토석류로 총 43명의 인명피해가 발생함에 따라 피해에 직접적으로 연관이 있는 산지 하부 도심지에서의 토석류 저감 대책

에 관한 관심이 증대되었다. 이에 따라 많은 토석류 관련 연구가 진행되었으며, 주로 토석류 거동 및 취약성 관련 연구들이 이루어졌다. 토석류 거동과 관련된 주요 연구로 상용화된 수치해석 프로그램인 FLO-2D, Debris-2D, KANAKO-2D 등을 이용하여 유사체적 농도 및 항복응력에 따른 토석류 거동 분석 연구가 이루어진 바 있다(Choi, 2017; Kim, 2012; Jinfeng, 2013; Lee & Kim, 2013; NDMI, 2012). 토석류 취약성 관련 주요 연구로는 확산에 따른 인적 취약성 평가와 건물 및 구조물 등의 물리적 취약성 평가가 이루어졌다

⁺ Corresponding author: Jung Ryel Choi, Tel. +82-2-6959-9588, Fax. +82-2-6959-9589, e-mail. lovekurt82@gmail.com

(Woo, *et. al.*, 2014; Choi, *et. al.*, 2013; Choi, 2013; Choi, *et. al.*, 2012). 본 연구에서는 현장 자료를 바탕으로 토석류의 유동학적 인자를 도출하였으며, 이를 수치해석 프로그램인 FLO-2D 모형에 적용하여 토석류 거동을 모의하였다. 수치 해석 결과로 토석류 최대 속도 및 깊이를 산출하였으며, 이를 GIS Raster 및 Vector 형태로 변환하여 각 피해 건물에서 받을 수 있는 영향을 시간대별로 살펴보았다. 그리고 도출된 Raster 형태의 토석류 속도 및 높이를 활용하여 격자별 토석류 위험도 맵을 산출하였다.

II. 대상지역

2011년 7월 26일~29일 기간 중 강원도 춘천시 신북읍 천전리에 누적 강우량 555.5mm(최대시우량 7월 26일 24시, 65mm)의 집중호우가 내습하여 산사태가 발생하였다. 산사태 발생으로 생성된 토석류 및 유송 잡목으로 인하여 근처 3개 유역에 37명(사망 13명, 부상 24명)의 인명 피해와 19동(건물전파 7동, 반파 1동, 침수 11동)의 건물 피해가 발생하였으며, 본 연구에서는

사망자 13명 및 건물 4개동이 피해를 받은 마적산 유역을 대상지역으로 선정하였다(Figure 1).

III. 수치해석 모델

토석류 수치해석 모델 중 FLO-2D는 세계적으로 다양한 검증과 연구에 범용적으로 쓰이고 있으며(Kim, *et. al.*, 2013), 격자와 시간에 관계없이 토석류 이동 깊이, 속도 및 위험도 등의 분석이 가능하고 GIS 응용 프로그램과 연동이 쉬운 장점이 있다(Kim, 2012).

FLO-2D는 2차원 홍수 라우팅 모델로 개발되었으며, 다음과 같은 연속방정식(식(1))과 운동방정식(식(2))을 포함한다(FLO-2D Software Inc., 2009).

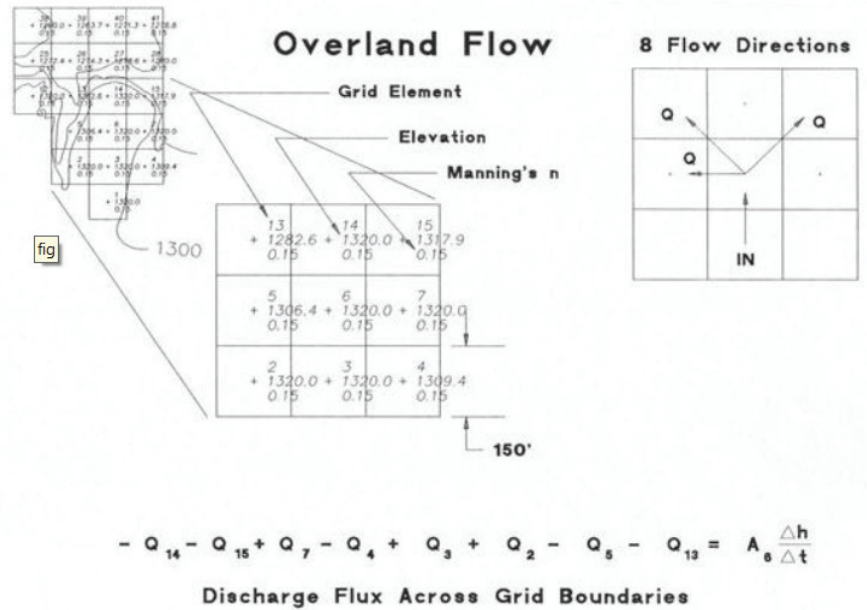
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i \tag{1}$$

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \tag{2}$$

연속방정식(식(1))에서 h 는 유체의 깊이, i 는 초과 강우강도이며, v 는 8개의 흐름 방향(동, 서, 남, 북, 북동,



Figure 1. Site description of landslide area in Chun-cheon



※ Source: FLO-2D Software Inc.(2009).

Figure 2. Unconfined discharge computations

남동, 북서, 남서) x 에서 하나의 깊이에 따른 평균속도로 격자망 하나의 표면적과 일정 시간 동안 격자 하나에서 유체의 깊이 변화량의 곱으로 유량이 계산된다 (〈Figure 2〉).

운동방정식(식(2))에서 마찰경사 S_f 는 식(3)과 같이 나타낸다.

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\rho gh} + \frac{K\eta u}{8\rho gh^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}} \quad (3)$$

여기서, S_y 는 항복경사, S_v 는 점성경사, S_{td} 는 난류-분산경사를 의미하며, τ_y 는 항복응력, ρ 은 토석류의 밀도, K 는 층류저항변수, η 는 점성, n 은 매닝 계수이다.

항복응력과 점성은 유사 농도에 따라 다양한 값을 가지며, 식(4)와 같은 경험식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \eta &= \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \\ \tau_y &= \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, α_1 과 β_1 는 실험실 실험에 의해 정의된 경험적 계수로서 선행 연구(Kang & Kim, 2015)에서 O'brien

& Julien(1988)의 실험 결과를 활용하여 대상지역의 회귀분석을 통해 도출된 값인 $\alpha_1 : 0.0046$, $\alpha_2 : 0.0043$, $\beta_1 : 20.044$, $\beta_2 : 23.775$ 를 사용하였다.

또한 FLO-2D 모형의 구동을 위해 국토지리정보원의 1:5,000 수치지형도를 이용하여 5m x 5m의 수치표고자료(DEM)를 구축하였으며, 문헌조사 및 시행착오법 해석을 통해 층류저항변수(K)는 24, Manning 계수(n)는 계곡부(0.02), 퇴적부(0.15)로 설정하였다. 또한 토석류 발생 전후의 위성사진(Daum 및 Naver)을 ArcGis의 ArcBruTile Tool을 이용하여 중첩하였으며, 발생부 및 퇴적부 범위를 도시하여 토석류 규모를 16,600m²로 추정하였다. 도출된 토석류 규모를 Rickenmann(1999)에 의해 제안된 경험식(〈Figure 5〉)에 대입하여 침투유량을 328m³로 산정하였으며, 문헌조사를 통해 도출된 0.2h(720s) 시간 동안의 토석류 수치 모의를 진행하였다(〈Table 1〉).

$$Q_p = 0.1 M^{0.833} \quad (5)$$

여기서, M (m³)은 토석류 규모를 나타낸다.

Table 1. FLO-2D input parameter value

Parameter	Input Value
Modeling Cell Size(m)	5 x 5
Viscosity vs Sediment Concentration	Coefficient : 0.0046 Exponent : 20.044 (O'Brien & Julien, 1988)
Yield Stress vs Sediment Concentration	Coefficient : 0.0043 Exponent : 23.775 (O'Brien & Julien, 1988)
Resistance Parameter(K)	24 (Kang & Kim, 2015)
Manning's n Value(n)	Forest : 0.02 Road, Urban Area : 0.15 (Kang & Kim, 2015)
Simulation Time(h)	0.2h(720s)
Total Discharge(m ³)	16,600 (Kang & Kim, 2015)
Peak Discharge(m ³)	328 (Rickenmann, 1999)

IV. 수치해석 결과

선행 연구에서 제시된 토석류의 유동학적 인자를 바탕으로 수치해석 모델을 구동한 결과 토석류 최고 흐름 속도는 9.1m/s, 최고 흐름높이는 2.3m 범위로 도출되었다. 사고 당시 언론보도 자료에 따르면 산사태 현장의 토사는 4차선 도로를 건너 10여 m 더 밀고 들어갔으며,

무너진 펜션 내부에서 토사가 성인 허리까지 올라온 것을 확인한 바 있다(Figure 3)).

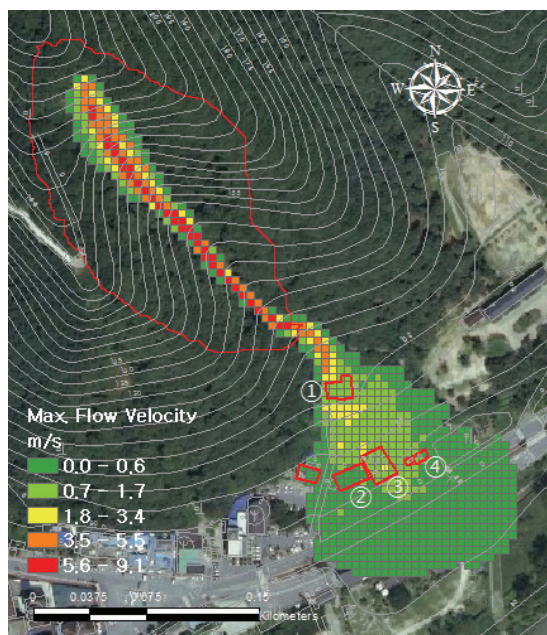


※ Source: Kwnews.co.kr(2011.07.28: 5).

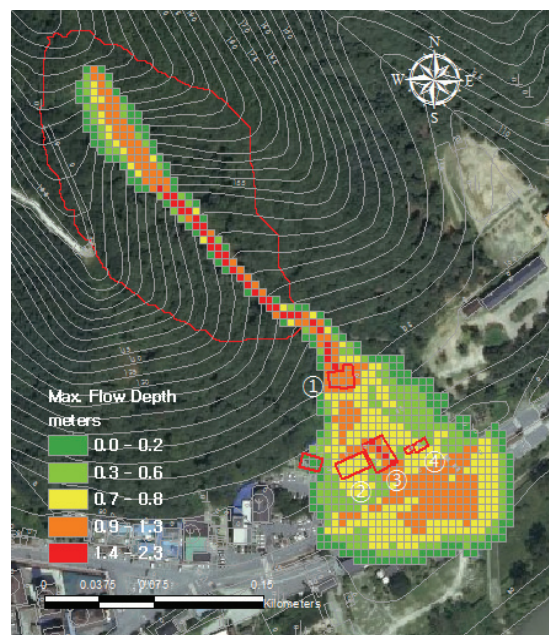
Figure 3. Actual place of debris-flow damage reported in the media

언론보도 자료를 참고하여 위성영상 자료와 수치해석 결과를 중첩 분석하였으며, 이를 통해 도출된 토석류 유동 범위, 이동 속도 및 퇴적 높이가 신뢰할 수 있는 수준으로 일치되는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 수치해석 모델의 결과를 바탕으로 사고 당시 피해를 입은 건물 4개동에 대하여 정밀 분석을 진행하였다. 이를 위해 FLO-2D에서 제공되는 토석류 최고 속도 및 높이를 GIS의 RASTER 형태로 변환하여



(a)



(b)

Figure 4. Results of maximum debris-flow velocity(a) and depth(b) calculated by FLO-2D

GIS상의 수치지형도 및 위성영상에 중첩하였으며, 토석류 거동을 정밀 분석하기 위하여 VECTOR 형태로 토석류 최고 속도를 RASTER 결과 파일과 중첩하여 토석류의 흐름방향 및 거동을 파악하였다(〈Figure 4 (a), (b)〉).

VECTOR 형태의 분석 결과 토석류는 1번 건물을 통과하여 3번 건물 방향으로 수렴되고 있는 것으로 나타났다. 실제 피해 당시 건물 1번 및 3번은 완파되었으며, VECTOR 형태의 결과 분석을 통해 직관적으로 토석류 거동을 파악할 수 있었다(〈Figure 5 (a), (b)〉). RASTER 결과를 바탕으로 건물 4개동에서의 시간대별 토석류 속도 및 높이 분석 결과 시간의 흐름에 따른 각 건물별 영향을 파악할 수 있었다. 이 중 특이한 점은 일반적인 건물 3개동의 경우 일정 피크 점에서부터 시간이 지남에 따라 토석류 속도 및 높이가 낮아지고 있으나 4번 건물의 경우 시간 흐름에 따라 토석류 높이가 계속적으로 증가하는 패턴이 나타났다. 실제 사고 당시 4번 건물에서는 가장 많은 인명 피해(13명)가 발생하였으며, 수

Table 2. Hazard map calculation method and legend

Hazard Level	Map Color	Method of Calculation	Legend
High	Red	$h > 1.0m$ OR $vh > 1.0m^2/s$	People are in danger both inside and outside of structures.
Medium	Orange	$0.2m < h < 1.0m$ AND $0.2 < vh < 1.0m^2/s$	People are in danger outside or structures.
Low	Yellow	$0.2 < h < 1.0m$ AND $vh < 0.2m^2/s$	Danger to people is low.

* Source: FLO-2D Software Inc.(2009).

치 모델 결과를 보면 지형상 토석류가 누적되는 곳에 위치하고 있어 피해가 커졌던 것으로 판단된다(〈Figure 5 (c), (d)〉).

FLO-2D 모형에서는 스위스와 오스트리아 기준(Fiebigler, 1997; OFAT, *et. al.*, 1997)을 바탕으로 토석류로 인한 위험도 레벨 및 기준을 제시하고 있으며(〈Table 2〉), 본 연구에서는 이를 이용하여 대상지역의 위험도 맵을 산출하였다(〈Figure 6〉). 위험도 맵 산출 결과 1번 및 3번 건물에서 토석류로 인한 위험도가 높게

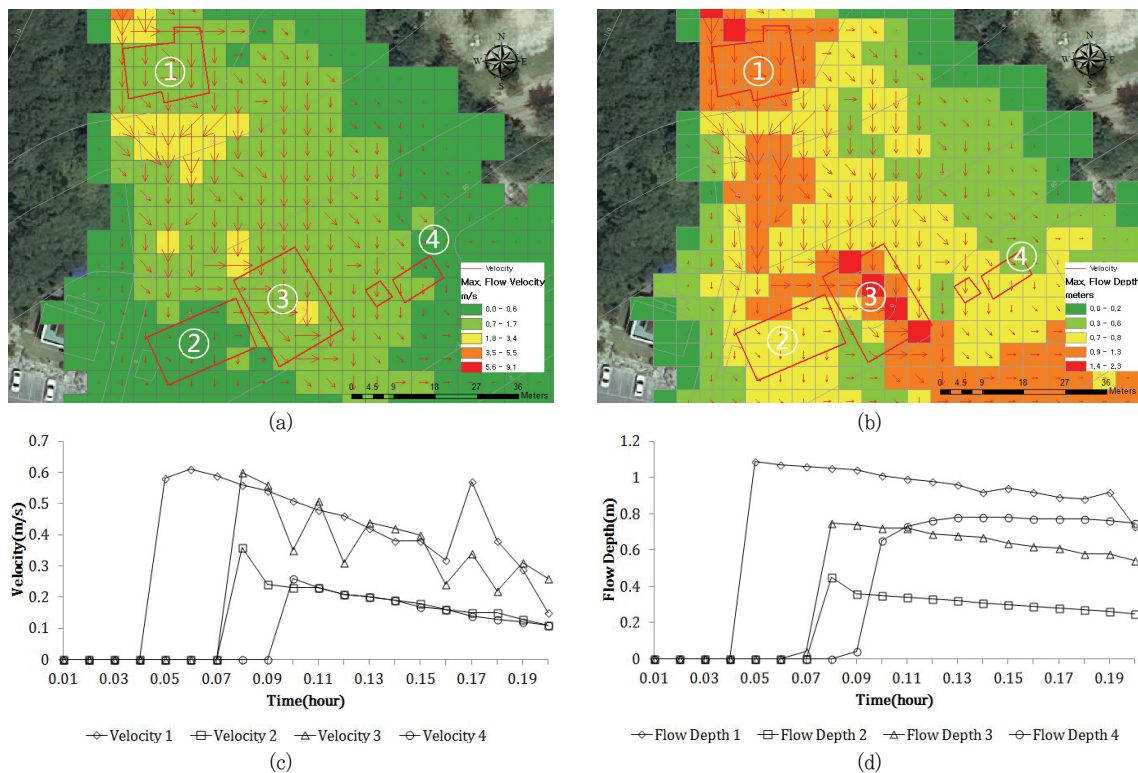


Figure 5. Results of debris-flow velocity raster and vector data in GIS (a) & time series plot(c) and results of debris-flow depth raster data and velocity vector data in GIS(b) & time series plot(d) on each building over time calculated by FLO-2D

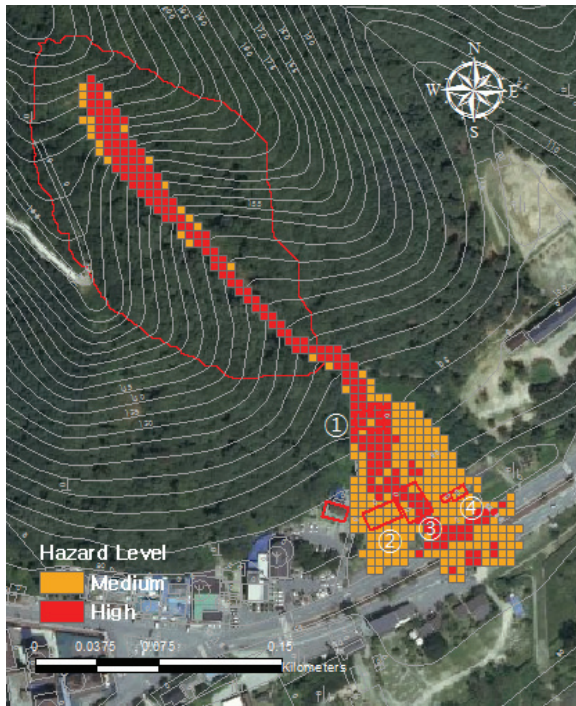


Figure 6. Result of debris-flow hazard calculated by FLO-2D

나타났으며, 2번 및 4번 건물에서 중간으로 나타났다. 4번 건물은 실제 인명피해가 발생하였던 곳이나 위험도가 중간으로 계산되었으며, 이는 모델에서 토석류 누적으로 인한 영향이 고려되지 못한 것으로 추후 이에 대한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

V. 결론 및 토의

본 연구에서는 실제 토석류가 발생했던 춘천 마적산 유역을 대상으로 수치해석 프로그램을 이용하여 토석류 발생 및 거동을 재현하였으며, 이를 통해 건물에서의 위험도를 평가하였다. 이에 따른 시사점은 다음과 같다.

(1) 선행 연구에서 제시된 토석류의 유동학적 인자를 바탕으로 수치해석 모델을 구동한 결과와 실제 피해범위 위성영상과 중첩 분석한 결과 토석류의 유동 범위, 이동 속도 및 퇴적 높이가 신뢰할 수 있는 수준으로 일치되는 것을 확인하였다.

(2) VECTOR 형태의 수치해석 분석 결과를 통해 토석류의 흐름 방향 및 수렴부를 직관적으로 확인 할 수

있었으며, 토석류가 건물과 충돌하는 방향 및 크기 등을 확인 가능하였다.

(3) RASTER 형태의 수치해석 분석 결과 각 건물의 시간대별 토석류 속도 및 높이를 도출할 수 있었으며, 시간 흐름에 따른 건물별 영향을 간접적으로 파악할 수 있었다. 또한 RASTER 형태의 토석류 높이와 VECTOR 형태의 토석류 속도를 중첩 분석하여 토석류가 수렴하면서 누적되는 것을 정량적으로 파악할 수 있었다.

(4) 각 건물 위치에서 시간대별 토석류 최대속도 및 최대높이의 시계열 분석 결과 4번 건물 위치에서만 시간 흐름에 따라 토석류 높이가 지속적으로 증가하는 패턴이 나타났다. 4번 건물은 토석류로 인한 인명 피해가 가장 많이 일어난 건물로 지형적으로 토석류가 누적되는 곳에 위치하고 있어 피해가 컸던 것으로 판단된다.

(5) 스위스와 오스트리아에서 사용되는 토석류 위험도 레벨 및 기준과 수치모형에서 제공되는 툴을 이용하여 위험도 맵을 제작할 수 있었으나, 토석류 거동으로 인한 연행 작용을 고려하지 못하는 FLO-2D 모델의 한계로 인해 토석류 누적 지역의 위험도를 과소평가하였다.

FLO-2D 수치해석 결과는 발생지역의 위성영상과 비교해본 결과 매우 유사한 영향 범위를 모사하였으며, 토석류의 최대 흐름 속도 및 높이를 격자상 RASTER 및 VECTOR 형태로 정량적으로 표현이 가능하였다. 이를 통해 토석류의 흐름 방향 및 시간에 따른 속도와 높이 변화를 분석할 수 있었으며, 인명 피해 발생 건물의 피해 원인을 간접적으로 유추할 수 있었다. 그러나 수치모델의 한계로 인하여 토석류 흐름상 건물의 영향 및 토석류 누적으로 인한 위험도 평가에는 한계가 있었으며, 추후 이에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구S04 (13SCIPS04))에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, Jung Hae. 2017. Analysis of Debris Flow of Chun-cheon Landslide Area Using Numerical Methods. *The Journal of Engineering Geology*. 27(1): 59-66.
- Choi, Hyoung Sun, Chang Woo Lee, Kyong Ha Kim, Ho Jung Youn, and Geun Young Kim. 2013. Developing the Humanity and Social Risk Index for Landslide Disasters in City. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 13(5): 203-210.
- Choi, Woo Il. 2013. A Study on Development of Vulnerability Functions Based on Characteristics of Debris Flow and Structure in Korea. Ph.D. Dissertation. University of Seoul.
- 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.
- FLO-2D Software Inc. 2009. *FLO-2D Reference Manual*, Nutrioso. Arizona. USA.
- Fiebigler, G. 1997. Hazard Mapping in Austria. *Journal of Torrent, Avalanche, Landslides and Rockfall Engineering*. 61(134): 153-164.
- Jinfeng, Liu, Kana Nakatani, and Takahisa Mizuyama. 2013. Effect Assessment of Debris Flow Mitigation Works Based on Numerical Simulation by Using Kanako 2D. *Landslides*. 2(10): 161-173.
- Kang, Hyo Sub and Yun Tae Kim. 2015. Study on Physical Vulnerability Curves of Buildings by Numerical Simulation of Debris Flow. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 15(5): 155-167.
- Kim, Seung Eun, Joong Cheol Paik, and Kyung Suk Kim. 2013. Run-out Modeling of Debris Flows in Mt. Umyeon Using FLO-2D. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*. 33(3): 965-974.
- Kim, Pan Ku. 2012. Numerical Modeling for the Detection and Movement of Debris Flow Using Detailed Soil Maps and GIS. Ph.D. Dissertation. Kungpook National University.
- Kwnews.co.kr. 2017.07.28. Landslide Occurred in Chun-cheon and Destroyed the Village.
- Lee, Mi Ji and Yun Tae Kim. 2013. Movement and Deposition Characteristics of Debris Flow According to Rheological Factors. *Journal of Korean Geotechnical Society*. 29(5): 19-27.
- National Disaster Management Institute(NDMI). 2012. *Re-establishment of Rainfall Criteria for Steep Slope Failures*.
- National Disaster Management Institute(NDMI). 2011. *Establishment of Collapse Warning & Evacuation Criteria for Steep Slopes*.
- Oh, Kyoung Doo, Chang Hee Lee, Byung Hwa Kang, Jae Young Heo, and Shin Bum Hwang. 2013. A Methodology to Analyse Landslide and Debris-Flow Hazards Due to Heavy Rainstorms: Application on the Damage Areas around Woomyon Mountain. *Korean Review of Crisis and Emergency Management*. 9(9): 45-66.
- O'Brien, J. S. and P. Y. Julien. 1998 Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*. 114(8): 877-887.
- OFAT, OFEE, OFEFP. 1997. Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activits de l'aménagement du territoire. Recommandations 1997. *Dangers Naturels, Berne*, 32.
- Rickenmann, D. 1999. Empirical Relationships for Debris Flow. *Nat. Hazards*. 19(1): 47-77.
- Woo, Choong Shik, Chang Woo Lee, Kyong Ha Kim, and Hyun Jung Kwon. 2014. Development of Risk Prediction Model for Debris Flow Combining Physical Impact and Social Vulnerability. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*. 14(4): 205-212.

Korean References Translated from the English

- 강원일보. 2011년 7월 28일자. 춘천 산사태..마을 삼켰다. www.kwnews.co.kr.
- 강효섭, 김윤택. 2015. 토석류 수치해석을 통한 건물의 물리적 취약곡선 연구. 한국방재학회 논문집. 15(5): 155-167.
- 김승은, 백중철, 김경석. 2013. FLO-2D 모형을 이용한 우면산 토석류 유동 수치모의. 대한토목학회 논문집. 33(3): 965-974.
- 김판구. 2012. 정밀토양도와 GIS를 이용한 토석류 발생지역 예측 및 거동 분석. 경북대학교 박사학위논문.

- 오경두, 이창희, 강병화, 허재영, 황신범. 2013. 집중호우로 인한 산사태 및 토석류 위험도 분석. 한국위기관리논집. 9(9): 45-66.
- 우충식, 이창우, 김경하, 권현정. 2014. 물리적 강도와 사회적 취약성을 통합한 토석류 위험도 예측모형 개발. 한국방재학회 논문집. 14(4): 205-212.
- 이미지, 김윤태. 2013. 유동학적 인자에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성. 한국지반공학학회 논문집. 29(5): 19-28.
- 최우일, 이수곤, 이벽규, 장승진. 2012. 토석류에 의한 구조물 취약성평가에 관한 연구. 한국방재학회 논문집. 12(3): 141-146.
- 최우일. 2013. 국내 토석류 및 구조물 특성에 따른 취약성합수 개발 연구. 서울시립대학교 박사학위논문.
- 최정혜. 2017. 수치해석을 통한 춘천 산사태지역 토석류 거동 분석. 대한지질공학회. 27(1): 59-66.
- 최형선, 이창우, 김경하, 윤호중, 김근영. 2013. 도시지역 토사 재해의 인문사회적 위험 등급 도출: 예상 인명피해를 중심으로. 한국방재학회 논문집. 13(5): 203-210.

Received: Nov. 28, 2017 / Revised: Jan. 19, 2018 / Accepted: Jan. 22, 2018

FLO-2D 수치해석 모델을 이용한 토석류 거동 분석 및 건물 위험도 평가

– 춘천 산사태 지역을 중심으로 –

국문초록 본 연구는 수치 모델을 이용하여 토석류 거동 특성을 이해하고 도심지 건물에 대한 정량적 위험도를 도출하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 춘천시 피해 지역을 대상으로 수치해석 모형인 FLO-2D를 이용하여 토석류 거동을 모의하였으며, 토석류 속도 및 깊이를 도출하여 각 피해 건물에서 받을 수 있는 영향을 시간대별로 분석하였다. 피해 건물 4개소에 대한 VECTOR 분석 결과 토석류 흐름은 1번 건물을 통과하여 3번 건물 방향으로 수렴되는 것으로 나타났으며, 이를 통해 토석류 흐름을 직관적으로 확인할 수 있었다. RASTER 결과를 이용하여 시간대별 토석류 높이를 분석한 결과 1, 2, 3번 건물에서는 피크 점에서부터 시간이 지남에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였으나 4번 건물의 경우 피크점 이후로도 토석류 높이가 계속 증가하는 경향을 보였다. 그리고 분석된 결과를 바탕으로 격자별 토석류 위험도 맵을 산출하였다. 본 연구를 통해 토석류의 최대 흐름 속도 및 높이를 GIS 격자상 RASTER 및 VECTOR 형태로 중첩하여 정량적 분석이 가능하였으며, 토석류로 인한 피해 건물의 원인을 간접적으로 추론할 수 있었다.

주제어 : 토석류 분석, 산사태, 전파 특성, 위험도, FLO-2D

Profiles **Jung Ryel Choi** : He received his M.S.(c) from Kangwon National University(Assessment of Potential Landslides in Naerin Watershed: Linking Eco-hydrology Model and Stability Model). Currently, He is working at SDM ENC. His interesting subject and area of research is safety & disaster management. His recent papers are “A Study on Assessment of Debris-flow Hazard Considering Human Vulnerability Index of the Urban Road(Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2016)” and “Development and Application of Precise Debris-flow Risk Assessment Index in Urban Area(Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, 2015)”(lovekurt82@gmail.com).