2차원 토석류 예측모형과 시설물 중요도를 이용한 토석류 위험영향지도 개발

Development of a Debris Flow Risk Impact Map Using a 2-D Model of Debris Flow and a Facilities Impact Map

남동호* · 김병식**

Nam, Dong Ho*, and Kim, Byung Sik**

Abstract

Globally, damage caused by localized heavy rains and typhoons due to climate change has been occurring, and secondary damage from landslides and debris flow has also been increasing. Landslides that occur in mountainous areas are introduced into the mooring and develop into debris flows that damage the facilities located below. Recently, there has been a constant supply of studies of landslides and debris flow in Korea, but these studies have been focused on determining the mechanisms that cause landslides and high risk of debris flow. Few of these studies are of any importance. Therefore, this study establishes a rainfall-runoff model, S-RAT, and a numerical analysis program for debris flow, RAMMS. The S-RAT and RAMMS are applied to past debris-damaged areas of Seoul-City Umyun Mountain and Chuncheon-City Majeok Mountain to estimated depth (H), debris flow velocity (V), and the hazard map of the occurrence of debris flow. In addition, a risk impact map was created based on a debris flow hazard map and a risk matrix derived from a facilities impact level map.

Key words : Debris flow, S-RAT, RAMMS, Hazard Map, Impact Level Map, Risk Impact Map

요 지

전 세계적으로 기후변화로 인한 국지성 집중호우 및 태풍으로 인한 피해가 지속적으로 발생하고 있으며, 그에 따른 2차 피해인 산사태 및 토석류 피해 또한 증가하고 있는 추세이다. 산지에서 발생하는 산사태는 계류로 유입되면서 토석류로 발달하여 하부로 유하하게 되며, 하부에 위치한 시설물에 대해 직접적인 피해를 주게 된다. 최근 국내에서 산사태 및 토석류에 대한 선행연구는 지속적으로 수행되고 있으나, 산사태 및 토석류 위험성이 높은 구간, 즉 발생기작을 판단할 수 있도록 지표화 해놓은 것이며, 현재 강우를 이용한 위험성지도 및 피해 하류부의 시설물을 고려한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 과거 토석류 피해지역인 서울시 우면산, 춘천시 마적산을 대상으로 빈도별 확률강우량을 이용하여 강우-유출모형인 S-RAT과 토석류 수치해석 프로그램 RAMMS에 적용하였으며 토석류 피해를 극대화 시키는 인자인 토석류유동심(H), 토석류속(V)을 산정하여 토석류 위험성지도를 작성하였으며, 토석류 피해 범위내 시설물의 중요도에 따라 분류하여 영향중요도지도를 작성하였다. 또한 작성한 위험성지도와 영향중요도지도를 위험도 매트릭스를 적용하여 토석류 위험영향지도를 작성하였다.

핵심용어 : 토석류, S-RAT, RAMMS, 위험성지도, 영향중요도지도, 토석류 위험영향지도

1. 서 론

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 일시에 흐르는 현상으로, 주로 장마철과

*정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경&재난관리전공 박사과정(E-mail: skaehdghkk@kangwon.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

**교신저자, 정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경&재난관리전공 부교수(Tel: +82-33-570-6819, Fax: +82-33-570-6458, E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Urban environment & Disaster management, Kangwon National University

태풍이 지나가는 여름철에 집중적으로 발생하고 있다.

최근 전 세계적으로뿐만 아니라 우리나라에도 이상기후로 인해 국지성 집중호우 및 태풍의 피해가 빈번해지면서 토석류 피해가 잦게 발생하고 있으며, 이로 인해 인명 및 재산피해도 크게 발생하고 있는 추세이다. 토석류는 계곡을 따라 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 저감하기 위해서 산림청, 한국지질자원연구원, 국립재난안전연구원 등에서 지형 및 지반특성 등이 고려된 GIS기반 산사태 위험지도를 작성하여 서비스 중에 있으며, 국립재난안전연구원에서는 급경사지 붕괴정보 및 대피기준 설정에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다(National Institute of Disaster and Safety, 2004; Korea Forest Service, 2006; KIGAM, 2009).

국내의 산사태 및 토석류 위험성 평가 및 위험지도 작성에 관한 연구동향을 살펴보면 국외의 경우 GIS 기술을 이용하여 무한평면사면안정모델을 통해 사면의 경사와 집수지역을 기반으로 하는 사면안정등급을 정의한 바 있으며(Montgomery and Dietrich, 1994), 무한평면사면안정모델에 동적인 수리모델링을 접합시킨 더욱 정교한 모델을 제시하고(Wu and Sidle, 1995), 수리적 모델을 무한평면사면안정모델과 결합하여 사면 안정 분석을 위한 SINMAP을 개발하였다(Pack, 1995). 또한 토석류 발생 영향인자인 모암의 종류, 기반암 내단층의 길이, 사면파괴 면적, 사면 경사, 사면 방향, 계곡부 경사, 유역 면적, form factor, C factor를 선택하여 GIS를 이용하여 토석류 발생 위험도를 예측하였으며(Lin et al., 2002), 산간지방의 지역별 지형 및 지질정보를 중심으로 로지스틱 회귀분석을 수행하여 산사태 영향인자를 결정하고, 인자별 분석 계수를 제시하여 산사태 위험지도를 작성한 바 있으며(Ayalew et al., 2004), Deb and El-kadi (2009)는 SINMAP과 수문학적 모델을 이용하여 산사태의 민감성 평가를 실시하였다.

국내의 경우 금호강 유역을 대상으로 산사태 발생에 영향을 미치는 환경인자들을 추출하고 GIS와 원격탐사 기법을 활용하여 각 인자를 매트릭스 방법을 이용하여 산사태 취약성 지도를 작성한 바 있으며(Kim et al., 2005), 596개의 산사태 발생이력 자료와 산사태 발생요인 정보를 기초로 산사태 발생과 발생요인 간의 상관관계를 분석하고 분석결과를 통해 가중치 및 위험도 인덱스를 통해 산사태 위험지도를 작성한 바 있으며(Yun et al., 2009), 토석류 발생지역에 대한 위험성 분석을 위해 통계적 기법과 결정론적 기법을 이용하여 GIS 기법을 통해 재해위험지도를 작성하였다(Jun and Oh, 2011).

Lee (2016)는 춘천지역을 대상으로 강우량조사와 주변의 지형, 수문, 토양, 지질요인들을 이용하여 GIS를 활용한 WOE모델 기법을 적용하여 산사태가 발생할 확률이 높은

지역을 선정하고 SINMAP을 통하여 토석류 위험지도를 작성하였으며 토석류 시뮬레이션 모델인 Flo-2D를 활용하여 물리학적 피해 지수 중 건물에 대한 리스크를 평가하였다.

그 밖에도 많은 연구자들이 토사재해와 관련된 많은 연구를 진행하고 있으나, 대부분의 산사태 및 토석류 위험지도는 피해를 유발하는 강우나 하부에 위치한 시설물들을 고려하지 않으며, 주로 경사도를 이용하여 발생위치를 예측하거나 위험지역을 선정하며, 피해지역의 시뮬레이션을 통해 위험성을 평가하거나 계측을 통해 이상 징후가 발견되었을 때 작동되는 예·경보시스템 또는 대피 기준을 선정하는데 집중되어 왔다(Choi et al., 2012).

따라서 본 연구에서는 2011년에 발생했던 서울시 우면산과 춘천시 마적산을 대상으로 토석류를 유발하는 강우를 고려하기 위하여 지속시간 9시간의 빈도별 확률강우량(30년, 100년, 200년)을 이용하여 분포형 강우-유출모형인 S-RAT에 적용하여 토사유출모형 RAMMS의 입력자료인 침투홍수량과 유출총량을 산정하였다. 산정된 침투홍수량과 유출총량을 RAMMS모형에 적용하여 빈도별 토석류동심(H), 토석유속(V)을 산정하였으며, 이를 통해 토석류 위해성지도를 작성하고, 국토교통부의 용도별 건축물의 종류(MOLIT, 2017)에 따라 하부의 시설물별 중요도로 분류하여 영향중요도지도를 작성하였다. 또한 작성된 토석류 위해성지도와 영향중요도지도를 위험도 매트릭스에 적용하여, 최종적으로 토석류 위험영향지도를 작성하였다.

2. 연구지역 및 자료수집

우리나라의 토사재해는 6월부터 9월 여름철의 태풍 및 집중호우로 인해 발생한다. 2011년 서울시 서초구에 위치한 우면산과 강원도 춘천시의 마적산에서 발생한 토석류 피해역시 7월 여름철에 국지성 집중호우로 인해 발생한 피해이며, 이로 인해 많은 인명과 재산 피해가 발생하였다.

연구 지역은 서울시 서초구 우면산 일대 중에 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 281 mm, 강남구 318 mm, 관악구 348 mm, 남현 358 mm, 강원도 춘천시의 경우 소양2교 261 mm, 지촌초교 257 mm, 천전리 306 mm 이상 강우가 발생하였다.

본 논문에서는 서울시 서초구 우면산 일대와 강원도 춘천시 마적산 일대의 1:5,000 수치지도를 활용하여 5 m × 5 m 격자의 DEM을 생성하였으며 토지이용도와 토양도 또한 동일한 크기로 생성하여 S-RAT 모형과 RAMMS 모형에 적용하였다. Fig. 1은 서울시 우면산 및 춘천시 마적산의 누적강우량을 나타냈으며, Fig. 2는 연구지역 및 피해사진을 나타냈다.

(a) Umyeon Mt. accumulation rainfall (Seoul)

(b) Majeok Mt. accumulation rainfall (Chuncheon)

Fig. 1. Hydrograph and Accumulated Rainfall

Fig. 2. Study Area

3. 연구지역 및 자료수집

본 논문의 연구흐름도는 Fig 3과 같다. 2011년 실제 토석류를 유발시킨 강우자료와 지속시간 9시간의 빈도별 확률강우량(30년, 100년, 200년)을 이용하여 Spatial Runoff Assessment Tool (S-RAT)모형에 적용하였고 토사유출모형인 Rapid Mass Move Simulations (RAMMS)모형의 입력자료인 침투홍수량과 유출총량을 산정하여 사용하였다. RAMMS모형

의 입력자료인 토사량은 일본 국토교통성에서 제시한 토사량 산정식에 근거하여 산정하였다(Kim, 2011). 또한 실제 발생했던 토석류 피해 범위와 RAMMS모형에서 산정되는 피해 범위는 상이하기 때문에 Net Success Index (NSI) 정량지수를 이용하여 RAMMS 모형의 최적의 매개변수를 산정하여 적용하였으며, 토석유동심(H)과 토석유속(V)을 산정하여 토석류 위험성지도를 작성하였다(Nam et al., 2016). 영향중요도지도는 3단계 높음, 중간, 낮음으로 분류하였으며, Fig 3의

Fig. 3. Flowchart of Study

연구흐름도에 나타냈다. 또한 피해지역 하부에 있는 시설물을 국토교통부 용도별 건축물의 종류(MOLIT, 2017)를 이용하여 피해 범위내의 시설물에 대해 국한하여 시설물 중요도를 주거지역의 경우 높음, 제1종 근린시설과 제2종 근린시설은 중간, 그 외 논, 밭 등을 낮음으로 분류하여 영향중요도 지도를 작성하였으며, 위해성지도와 영향중요도지도를 위험도 매트릭스에 적용하여 토석류 위험영향지도를 작성하였다.

3.1 분포형 강우-유출모형(Spatial Runoff Assessment Tool, S-RAT)

Spatial Runoff Assessment Tool (S-RAT)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 설계되었다. 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 간소화되어 있다.

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

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

3.2 토석류 2차원 수치모형(Rapid Mass Move Simulation, RAMMS)

RAMMS모형은 스위스 눈사태 기관인 Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF)의 Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee Und Landschaft (WSL, 2011)팀에서 개발되었고 Dynamic modeling으로 토석류(Debris flow), 낙석(rockfall), 눈사태(Avalanches)의 세 가지 모듈을 수치표고모형(DEM)에서 분석이 가능하도록 구성되어 있다. 모형의 기본방정식은 Vollemy-salm의 접근 방법에 기초하고 Eq. (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, μ 는 dry-coulomb type friction coefficient, g는 중력가속도(m/s^2), ρ 는 밀도(kg/m^3), U는 유속(m^3/s), N은 활동면에 대한 수직응력(Mpa)을 의미한다. C는 응집력을 가지고 있는 흐름 물질로, N=0, U=0의 조건일 때 마찰력 S는 0이 된다. C의 값이 증가하면 마찰력은 증가하게 되고 이에 전단응력이 증가하게 되어 토석류나 눈사태의 흐름이 약해지는 현상이 발생한다(Nam et al., 2016).

3.3 위험도 매트릭스(Risk impact matrix)

본 논문에서 토석류 위험영향지도는 토석류가 가할 위해성과 시설물에 대한 영향을 곱으로 나타낸다(Eq. (3)). 위험도 매트릭스(Risk matrix)는 위험을 정량화하는 기법으로 위험

관리(Risk management)의 중요한 부분인 위험평가(Risk assessment)의 위험분석방법으로 위험에 대해서 정확히 예상하고 분석하여 위험을 줄이는 방법이다(Shin et al., 2013). 위해성(Hazard)과 그 위험이 미칠 수 있는 시설물(Obj)에 대한 영향(Impact)은 일반적으로 정확하게 값으로 표현할 수 없기에 위험 매트릭스는 위험의 확률과 중요도를 단계(Level)로 나누어서 최종 위험을 판단한다(Table 1).

$$Risk\ impact\ map = Hazard \times Impact\ level \quad (3)$$

3.4 토석류 위해성지도(Debris flow hazard map)

토석류 위해성지도는 토석류 피해를 극대화 시키는 인자인 토석유동심(H)과 토석유속(V)을 이용하여 위험등급을 분류하였으며, 토석유동심과 토석유속의 곱이 $2.5\text{ m}^2/\text{s}$ 이상일 때 위험등급 높음(High), $1\text{ m}^2/\text{s}$ 이상이거나 $2.5\text{ m}^2/\text{s}$ 이하일 때 중간(Middle), $1\text{ m}^2/\text{s}$ 이하일 때 낮음(Low)으로 산정하여 작성하였다. Eq. (4)는 토석류 위해성지도 작성에 대한 산정식을 나타냈으며, Table 2는 위해성지도 산정 기준을 나타냈다.

$$Hazard\ map = Debris\ flow\ depth\ map \times Debris\ flow\ velocity\ map \quad (4)$$

3.5 영향중요도지도(Impact level map)

토석류 영향중요도지도는 국토교통부 용도별 건축물의 종류(MOLIT, 2017)를 이용하여 3단계로 분류하였다. 사람이 주거하는 단독주택, 공동주택, 아파트, 열립주택, 다세대주택, 기숙사 등을 위험등급 높음으로 분류하였으며, 사람의 생활 편의를 도우는 제1종 근린시설(가게, 병원, 교회, 사무

소 등), 제2종 근린시설(영화관, 학원, 동물병원 등)이나 일반 도로를 중간등급으로 분류하였고, 그 밖의 평지, 논, 밭을 낮음 등급으로 나타냈다. Table 3은 시설물의 중요도별 분류 기준을 나타냈다.

4. 연구결과

본 논문에서는 서울시 우면산 일대와 춘천시 마적산 일대를 대상으로 토석류 위험영향지도를 작성하기 위하여 토석류를 유발하는 빈도별(30년, 100년, 200년) 강우분석을 실시하여 토석류 수치모형 RAMMS의 입력자료인 침투홍수량 및 유출총량을 산정하였으며, 산정된 빈도별(30년, 100년, 200년) 침투홍수량 및 유출총량을 RAMMS모형에 적용하여 토석유동심 및 토석유속을 산정하였다. 분포형 강우-유출모형 S-RAT을 이용한 강우분석 결과와 토석류 수치해석모형 RAMMS를 이용한 결과 및 NSI 정량지수를 이용한 매개변수 최적화에 대한 결과는 Nam et al. (2016)에서 제시한 최적 매개변수를 사용하였다.

서울시 우면산과 춘천시 마적산의 토석류 위험영향지도 작성 결과 서울시 우면산의 경우 아파트 A-1, A-2, A-5, A-6은 위해성지도에서는 위험등급이 낮음이나, 영향중요도 지도로 볼 때 위험등급 높음으로 산정되었으며, 위험영향지도에서는 위험등급 높음으로 산정되었다. C-1은 위해성지도나 중요도에서도 위험등급 중간으로 산정되었으며, 위험영향지도에서도 중간 등급으로 산정되었다. 실제로 C-1은 토석류 피해로 인해 완파되어 재건축되었다. A-3, A-4의 경우 30년 빈도일 때에는 피해를 받지 않으나 100년, 200년 빈도일 때 피해가 발생하였으며, 위해성지도에서는 위험등급이 낮

Table 1. Debris flow Risk Impact Matrix

Debris flow Risk impact map		Hazard		
		High	Middle	Low
Impact level	High	High	High	High
	Middle	High	Middle	Low
	Low	Low	Low	Low

Table 2. Estimation of Risk Hazard Map Catalogue (Yin, 2013)

Catalogue	Definition
High	$(H \times V)_{\max} > 2.5\text{ m}^2/\text{s}$
Middle	$1\text{ m}^2/\text{s} < (H \times V)_{\max} < 2.5\text{ m}^2/\text{s}$
Low	$(H \times V)_{\max} < 1\text{ m}^2/\text{s}$

Table 3. Impact Level

Class	Type
High	Apartment, Apartment unit in a house, Row house, Detached dwelling, Dormitory, Pension etc.
Middle	Church, Hospital, Restaurant, Factory, Store, Movie theater, Road etc.
Low	Field, Paddy field, Mountainous district

음으로 산정되었으나 영향중요도지도로 볼 때는 높음 등급으로 산정되었고, 위험영향지도에서도 위험등급 높음으로 산정되었다. R-1은 위해성지도에서 높음 등급으로 나타났고, 영향중요도지도에서는 중간으로 산정되었으나 위험영향지도로 산정하였을 때 높음 위험등급으로 나타났다.

춘천시 마적산은 P-1, P-2, P-3, H-1은 30년 빈도일 경우 피해를 받지 않으며 100년, 200년 빈도부터 피해가 발생하며, 위해성지도에서의 위험등급은 낮음, 영향중요도지도로 보았을 때 중간등급으로 산정되었으며, 위험영향지도에서는 위험등급 낮음으로 산정되었다. P-4, P-5, P-6 또한 위해성지도에서 낮음 등급으로 산정되었고, 영향중요도지도 또한 중간등급으로 산정되었다. R-1, R-2는 위해성지도에서 중간등급으로 산정되었고, 영향중요도지도 또한 중간등급으로 산정되어 위험영향지도에는 중간등급으로 산정되었다. F-1, F-2

는 위해성지도로 볼 때 위험등급이 중간등급이나, 영향중요도지도로 볼 때 낮음, 위험영향지도 또한 낮음으로 산정되었다. H-1은 100년 빈도 및 200년 빈도일 때 위험영향지도에서는 높음 등급으로 산정되었으며, H-2의 경우 위해성지도에서는 중간등급이나, 영향중요도지도에서는 높음 등급으로 위험영향지도에서 높음 등급으로 나타났다. 실제로 H-2는 토석류로 인해 많은 피해가 발생한 곳이다. C-1은 중간등급, C-2는 30년, 100년 빈도일 때 낮음 등급으로 보이나 200년 빈도일 때 중간등급으로 산정되었다. C-3, C-4, C-5는 위해성지도 및 영향중요도지도에서 중간등급으로 나타났고, 위험영향지도에서 또한 중간등급으로 산정되었다(Tables 4, 5). Figs. 4, 5는 서울시 우면산과 춘천시 마적산의 토석류 위해성지도를 나타냈고, Fig. 6은 시설물 영향중요도지도를 나타낸 것이며 Figs. 7, 8은 위험영향지도를 나타낸 것이다.

(a) Hazard map (30y)

(b) Hazard map (100y)

(c) Hazard map (200y)

Fig. 4. Hazard Map of Seoul Umyun M.t

(a) Hazard map (30y)

(b) Hazard map (100y)

(c) Hazard map (200y)

Fig. 5. Hazard Map of Chuncheon Majeok M.t

(a) Impact level map (Seoul Umyun M.t)

(b) Impact level map (chuncheon Majeok M.t)

Fig. 6. Impact Level Map

(a) Risk impact map (30y)

(b) Risk impact map (100y)

(c) Risk impact map (200y)

Fig. 7. Risk Impact Map of Seoul Umyun M.t

Table 4. Estimation of Risk Impact Map (seoul Umyun M.t)

Area	Frequency	Case	Hazard map	Impact level map	Risk impact map
Seoul	30y	A-1 (A.P.T)	Low	High	High
		A-2 (A.P.T)	Low	High	High
		A-3 (A.P.T)	-	High	Low
		A-4 (A.P.T)	-	High	Low
		A-5 (A.P.T)	Low	High	High
		A-6 (A.P.T)	Low	High	High
		C-1 (Church)	Middle	Middle	Middle
		R-1 (Road)	High	Middle	High

Table 4. (Continued)

Area	Frequency	Case	Hazard map	Impact level map	Risk impact map
	100y	A-1 (A.P.T)	Low	High	High
		A-2 (A.P.T)	Low	High	High
		A-3 (A.P.T)	Low	High	High
		A-4 (A.P.T)	Low	High	High
		A-5 (A.P.T)	Low	High	High
		A-6 (A.P.T)	Low	High	High
		C-1 (Church)	High	Middle	High
		R-1 (Road)	High	Middle	High
	200y	A-1 (A.P.T)	Low	High	High
		A-2 (A.P.T)	Low	High	High
		A-3 (A.P.T)	Low	High	High
		A-4 (A.P.T)	Low	High	High
		A-5 (A.P.T)	Low	High	High
		A-6 (A.P.T)	Low	High	High
		C-1 (Church)	High	Middle	High
		R-1 (Road)	High	Middle	High

(a) Risk impact map (30y)

(b) Risk impact map (100y)

(c) Risk impact map (200y)

Fig. 8. Risk Impact Map of Chuncheon Majeok M.t

Table 5. Estimation of Risk Impact Map (Chuncheon Majeok M.t)

Area	Frequency	Case	Hazard map	Impact level map	Risk Impact map
Chuncheon	30y	P-1 (Pension)	-	Middle	Low
		P-2 (Pension)	-	Middle	Low
		P-3 (Pension)	-	Middle	Low
		P-4 (Pension)	Middle	Middle	Low
		P-5 (Pension)	Middle	Middle	Low
		P-6 (Pension)	Middle	Middle	Low

Table 5. (Continued)

Area	Frequency	Case	Hazard map	Impact level map	Risk Impact map
Chuncheon	30y	H-1 (House)	-	High	Low
		H-2 (House)	Middle	High	High
		C-1 (Cafe)	Low	Middle	Low
		C-2 (Cafe)	Low	Middle	Low
		C-3 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		C-4 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		C-5 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		F-1 (Field)	Middle	Low	Low
		F-2 (Field)	Middle	Low	Low
		R-1 (Road)	Middle	Middle	Middle
		R-2 (Road)	Middle	Middle	Middle
	100y	P-1 (Pension)	Low	Middle	Low
		P-2 (Pension)	Low	Middle	Low
		P-3 (Pension)	Low	Middle	Low
		P-4 (Pension)	Middle	Middle	Low
		P-5 (Pension)	Middle	Middle	Low
		P-6 (Pension)	Middle	Middle	Low
		H-1 (House)	High	High	Low
		H-2 (House)	Middle	High	High
		C-1 (Cafe)	Low	Middle	Low
		C-2 (Cafe)	Low	Middle	Low
		C-3 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		C-4 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		C-5 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		F-1 (Field)	Middle	Low	Low
		F-2 (Field)	Middle	Low	Low
		R-1 (Road)	Middle	Middle	Middle
		R-2 (Road)	Middle	Middle	Middle
	200y	P-1 (Pension)	Low	Middle	Low
		P-2 (Pension)	Low	Middle	Low
		P-3 (Pension)	Low	Middle	Low
		P-4 (Pension)	Middle	Middle	Low
		P-5 (Pension)	Middle	Middle	Low
		P-6 (Pension)	Middle	Middle	Low
		H-1 (House)	High	High	Low
		H-2 (House)	Middle	High	High
		C-1 (Cafe)	Low	Middle	Low
		C-2 (Cafe)	Low	Middle	Low
		C-3 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		C-4 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		C-5 (Cafe)	Middle	Middle	Middle
		F-1 (Field)	Middle	Low	Low
		F-2 (Field)	Middle	Low	Low
		R-1 (Road)	Middle	Middle	Middle
		R-2 (Road)	Middle	Middle	Middle

5. 결 론

본 논문에서는 2011년 토석류 피해지역인 서울시 우면산 일대와 춘천시 마적산 일대를 대상으로 토석류 위험영향지도를 작성하기 위해 빈도별 확률강우량(30년, 100년, 200년)을 이용하여 분포형 강우-유출모형 S-RAT에 적용하여 토석류를 유발하는 인자인 침투홍수량과 유출총량을 산정하였으며, 산정된 침투홍수량과 유출총량을 이용하여 토석류 수치해석 모형인 RAMMS에 적용하여 빈도별 토석유동심(H)과 토석유속(V)을 산정하였다. 토석류의 피해를 극대화시키는 인자인 토석유동심과 토석유속을 이용하여 빈도별 토석류 위해성지도를 작성하여 높음, 중간, 낮음 3단계로 분류하였다. 또한 토석류로 인해 하부에 피해를 받는 시설물을 국토교통부 용도별 건축물의 용도(MOLIT, 2017)에 의거하여 높음, 중간, 낮음 3단계로 분류하였으며, 최종적으로 위해성지도와 영향중요도지도를 위험도 매트릭스에 적용하여 토석류 위험영향지도를 작성하였다. 서울시 우면산 및 춘천시 마적산의 토석류 위험영향지도 작성 결과 서울시 우면산의 경우 30년의 빈도에서 A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, R-1 모두 동일하게 높음 등급으로 나타났으며, C-1은 중간 등급으로 나타났다. 100년 빈도 및 200년 빈도는 모두 동일하게 높음 등급으로 나타났다. 또한 춘천시의 경우 30년의 빈도에서는 F-1, F-2, C-1, C-2, P-1, P-2, P-3, P-4, P-5, P-6이 낮음 등급, C-3, C-4, C-5, R-1, R-2가 중간 등급, H-2가 높음 등급으로 나타났으며, 100년 빈도 및 200년 빈도에서는 피해 규모가 커지면서 H-1이 높음 등급으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때 토석류의 피해 규모도 중요한 인자이나 하부의 구조물의 용도(주거지, 식당, 나지 등) 및 구조물의 재료(콘크리트, 조적조, 목조 등)에 따라 피해가 크게 달라진다. 따라서 본 논문에서 작성한 토석류 위험영향지도를 전국적으로 작성하여 도시계획 및 방재계획에 이용한다면 신규 구조물의 재료 결정이 가능할 것이라 판단된다. 향후 연구계획으로는 하부의 구조물이 받는 외력(Pressure)과 구조물의 재료별에 따라 저항하는 저항력(Resistance)을 고려하여 위험영향지도를 개선할 계획이다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리 사업의 지원으로 수행되었습니다(83091).

본 연구는 행정안전부 재난예측및저감연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(MOIS-재난-2015-05).

이 논문은 행정안전부장관의 재난관리분야 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

References

- Ayalew, L., Yamagishi, H., and Ugawa, N. (2004). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, The case in Tsugawa area of Agano River, Niigata prefecture, Japan. *Landslide*, Vol. 1, pp. 73-81.
- Choi, W.I., Lee, S.G., Lee, B.K., and Jang, S.J. (2012). A study of vulnerability of structure by debris flow. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 3, pp. 141-146.
- Forschungsanstalt WSL. (2011). *RAMMS manual*.
- Jun, K.W., and Oh, C.Y. (2011). Study on risk analysis of debris flow occurrence basin using GIS. *Journal of the KOSOS*, Vol. 26, No. 2, pp. 83-88.
- Kim, B.S., Yoon, S.K., Yang, D.M., and Kwon, H.H. (2010). Development of grid-based conceptual hydrologic model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 7, pp. 667-679.
- Kim, K.T., Jung, S.G., Park, K.H., and Oh, J.H. (2005). Evaluation of landslide susceptibility using GIS and RS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Society*, Vol. 8, No. 1, pp. 75-87.
- Kim, N.G. (2011). *A study on transport and diffusion of debris flow with FLO-2D*. Master's thesis, Kangwon National University.
- Korea Forest Service. (2006). *Criteria for grading hazardous landslides and basic data for grading*. Research Report, p. 1.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM). (2009). *Development of landslide prediction technology and damage mitigation countermeasures*. Research Report, pp. 1-595.
- Lee, G.B. (2016). *A study on risk assessment from debris flow hazard*. Master's thesis, Sungkyunkwan University.
- Lin, P.S., Lin, J.Y., Hung, J.C., and Yang, M.D. (2002). Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan. *Engineering Geology*, Vol. 66, No. 3-4, pp. 295-313.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2017). *Enforcement Decree of the Building Act, Article 3-5 (Types of Buildings by Use) attached Table 1*.
- Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, Vol. 30, No.

- 4, pp. 1153-1171.
- Nam, D.H., Lee, S.H., Jun, K.W., and Kim, B.S. (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*, Vol. 12, No. 8, pp. 131-143.
- National Institute of Disaster Safety. (2004). *Study on the monitoring and detection of slope failure (I): Field investigation and case studies*. Research Report, pp. 18-145.
- Pack, R.T. (1995). Statistically-based terrain stability mapping methodology for the Kamloops Forest Region, British Columbia. *Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference*, Canadian Geotechnical Society, Vancouver, Canada, pp. 617-624.
- Deb, S.K., and El-kadi, A.I. (2009). Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall event. *Geomorphology*, Vol. 108, No. 3-4, pp. 219-233.
- Shin, S.S., Lee, K.S., and Cho, H.G. (2013). An objective method of risk assessment based on stochastic modelling. *Journal of the Korean Society for Quality Management*, Vol. 41, No. 3, pp. 465-474.
- Wu, W., and Sidle, R.C. (1995). A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 2097-2110.
- Yun, H.S., Lee, D.H., and Suh, Y.C. (2009). Preparation of landslide hazard map using the analysis of historical data and GIS method. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Society*, Vol. 12, No. 4, pp. 59-73.
- Yin, H.Y. (2013). Debris flow management in Taiwan. *The 2013 International Training Workshop on Earth Sciences*.
-
Received	August 29, 2019
Revised	September 4, 2019
Accepted	September 23, 2019