지형학적 특성과 물리 기반 모델을 이용한 토석류 발생원 예측 기법 개발

Predicting the Initiation Area of a Debris Flow Using Geomorphological Characteristics and a Physically-Based Model

송창호* · 이지성** · 김윤태***

Song, Chang-Ho*, Lee, Ji-Sung**, and Kim, Yun-Tae***

Abstract

A debris flow is a phenomenon in which sediment matter and water become mixed and flow down to a deposition area, thereby causing significant damage to people and property. In Korea, majority of the past debris flows initiated in the form of shallow landslides during rainfall. To address the hazards associated with debris flows, it is necessary to establish a method for predicting the location of the debris flow initiation. In this study, we propose a method for predicting the source of a debris flow by incorporating geomorphological characteristics and designing a physically-based model. The geomorphological characteristics associated with the initiation area of the debris flow were determined by analyzing previous literature. The physically-based model was developed by incorporating landslide inventory data, rainfall data, and geotechnical characteristics, and the map of safety factor less than 1.2 was thereby established. Furthermore, the region prone to the occurrence of debris flows was identified by the superposition of each unstable pixel obtained from the geomorphological characteristics and the physically-based model. The proposed method was validated through quantitative index analysis. The obtained results indicate that compared to other methods, the proposed method has a high success index and a low error index for predicting the source of a debris flow.

Key words : Landslide, Debris Flow, Geomorphological Characteristic, TRIGRS Model, Debris Flow Source

요 지

토석류는 강우로 인해 토사와 물이 섞여 산지 아래의 유하부까지 흘러내리는 현상으로 많은 인명과 재산피해를 유발한다. 우리나라에서 발생한 대부분의 토석류는 집중강우 시 얇은 사면파괴가 발생한 지점에서 계곡부를 따라 토석류로 전이되었다. 따라서 토석류 위험에 대응하기 위해서는 우선적으로 토석류 발생 위치를 정확히 식별해야 한다. 본 연구에서는 2011년에 많은 피해가 발생했던 서울 우면산을 대상으로 지형학적 특성과 물리 기반 모델을 결합하여 토석류가 발생할 수 있는 위치를 예측하는 방법을 제안하였다. 우선 국내·외 토석류 발생 위치의 지형학적 특성을 기반으로 연구대상 지역의 지형학적 특성을 구축하였다. 그리고 물리 기반 모델과 당시의 누적강우량 자료를 활용하여 안전율 지도를 제작하였다. 최종적으로 토석류 지형학적 특성과 안전율이 1.2 이하인 곳이 중첩되는 셀을 추출함으로써 토석류 발생원 예측 기법을 개발하였다. 정량지수 분석을 통해 검증을 수행한 결과 본 연구에서 제안한 토석류 발생원 예측 기법의 순 성공지수가 가장 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 연구를 통해 토석류의 발생 위치를 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 산사태, 토석류, 지형학적 특성, TRIGRS 모델, 토석류 발생원

*정회원, 부경대학교 해양공학과 석사과정(E-mail: chsong913@naver.com)

Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 스마트인프라기술연구소 전임연구원(E-mail: js3497@naver.com)

Member, Associate Researcher, Smart Infra-Structure Technology Institute, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

***교신저자, 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

1. 서론

최근 기후변화로 인한 잦은 태풍과 집중호우로 인해 산지 재해 발생 확률이 크게 증가하고 있다. 우리나라는 강우량의 대부분이 6월에서 9월 사이에 집중된다. 특히 산지가 약 70% 이상으로 산사태에 취약한 지형적 특성을 가지고 있다. 강우로 인한 산사태는 발생유형에 따라 얇은 사면파괴와 토석류로 나뉘며, 토석류로 전이되면 규모가 대형화되어 인명과 재산피해가 크게 증가된다. 특히 2011년에 발생한 사면재해 유형별 사망자중 얇은 사면파괴로 인한 사망자수 비율은 25%인데 토석류로 인한 사망자 수는 75%로 3배 높은 결과를 나타내었다(Lee and Kim, 2013). 이를 통해 토석류 위험을 예측 및 예방하기 위해서는 토석류 발생 위치를 정확히 예측하는 연구가 필요할 뿐만 아니라, 지속적으로 수행되어야 한다.

토석류 발생지에 관한 연구는 국내에서 2011년 우면산 산사태 이후 많은 연구가 이루어지고 있다. Kim et al. (2011)은 GIS를 이용한 중첩 분석을 통해 토석류 발생지점에 대한 지형학적, 임상학적, 토양학적 특성 및 발생 현황의 상관성을 분석하였다. Kang et al. (2015)은 산사태 및 토석류 발생지점으로부터 GIS 기반 지형 자료를 추출하여 산사태 및 토석류 발생 지점과의 특성 차이를 분석하였다. Kim and Han (2017)은 정밀도양도와 토양도별 지반강도 정수를 이용하여 다중보정영역을 적용하는 방법을 제안하였고, SINMAP 모형을 이용한 토석류 발생지역 예측기법을 제안하였다. Choi et al. (2017)은 도심지 토사 재해 예비중점관리 대상지역을 선정하여 토사재해 위험지 예측 분석을 실시하였다. Nam et al. (2018)은 토석류 발생 유발인자인 강우량, 강우강도 및 누적강우량을 이용하여 강우경보지수를 산정하고 등급화하여 토석류 피해가 발생한 곳에 적용하여 평가하였다. Kim et al. (2019)은 드론을 활용하여 토석류 발생 지역의 DSM을 생성하여 수치지형도와 비교분석을 하였고, 현장 사진과의 비교를 통해 침식 및 퇴적높이를 검증하였다.

국외에서는 Horton et al. (2008)은 지형학적 요소를 통해 토석류 발생원을 예측한 토석류 민감도 지도를 개발하였다. Blahut et al. (2010)은 산사태 인벤토리를 기반으로 통계기법을 사용하여 토석류가 발생할 수 있는 지역을 식별하였다. Kappes et al. (2011)은 프랑스 남부 알프스 일대를 대상으로 토석류 발생 확률이 높은 곳을 계산하기 위해 경험적으로 접근하여 민감도 분석과 시나리오별 시뮬레이션을 수행하였다. Meyer et al. (2014)은 429개의 토석류 인벤토리와 토석류 유발 지형학적 요소를 이용하여 토석류 민감도 지도를 만들고 검증하였다. Tiranti and Deangeli (2015)은 암석학을 기반으로 서부 알프스의 토석류 발생원을 분류하고 토석류 흐름 시뮬레이션을 수행하여 신뢰성을 입증하였다. Kang and Lee (2018)는 다양한 연구에서 사용된 경험적 접근 방식을 정리하여 토석류 민감도를 평가하였다. Si et al.

(2020)은 정상류 상태에서 무한사면을 이용하여 토석류 민감도를 평가하고 검증하였다.

토석류 위험을 선제적으로 대응하기 위해서는 토석류 발생 위치를 정확히 예측하는 기술이 확보되어야 한다. 기존의 토석류 연구는 지형학적 특성을 분석하여 통계적 방법으로 토석류 위험지를 예측 또는 평가하거나 강우량을 이용한 토석류 민감도를 평가하는 연구가 주로 수행되었다. 통계적 방법과 물리적 방법은 서로 다른 데이터를 기반으로 분석되므로 발생 위치를 예측하는 범위가 서로 다르게 분석된다.

따라서 본 연구에서는 보다 정확하게 토석류 발생지점을 예측하기 위해 토석류가 발생할 수 있는 지형학적 특성들을 분석하였다. 또한 산사태 발생 지점 자료, 지반공학적 특성을 바탕으로 물리 기반 모델을 이용하여 사면의 안전율을 평가하였다. 지형학적 특성과 물리적 기반 모델 결과를 결합하여 토석류 발생원을 예측하고 정량지수 분석을 통해 검증함으로써 토석류 발생원 예측 기법을 개발하였다.

2. 연구 지역

본 연구에서는 2011년 서울 우면산에서 발생한 토석류를 대상으로 연구를 수행하였고, 연구대상 지역은 Fig. 1과 같다. 우면산의 경우 2011년 폭우로 인해 산사태 및 토석류 재해가 발생하여 큰 인명 피해가 발생하였다. 특히, 토석류 발생 당일 강우량은 서울시 연간 강우량의 27%에 해당하는 약 370 mm의 강우량이 발생하였고, 이로 인해 155건의 산사태가 발생하였다. 이중 대부분이 토석류로 전이되어 116채의 건물피해와 16명의 인명 피해가 발생하였다(Yune et al., 2013). 이처럼 강우에 의해 토석류로 발전되는 경우 발생하는 피해는 일반 산사태의 피해보다 심각한 피해를 초래하므로 토석류가 발생하는 위치를 예측할 수 있는 연구가 필요하다.

3. 방법론

본 연구의 목적인 토석류 발생원 예측 기법 개발을 위한

Fig. 1. Study Area of This Research

연구흐름은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서 사용된 모든 지형학적 데이터베이스는 국토지리정보원에서 제공된 1:5,000 수치지도(digital map)를 통해 제작하였다. 우선 첫 번째 방법으로 GIS를 기반으로 국내·외 토석류가 발생한 지형학적 특성(slope, curvature, SPI, STI, TCI, TWI, upslope contributing area)을 분석하여 토석류 잠재 발생원을 추출하였다(Method 1). 두 번째 방법으로 산사태 발생자료와 강우량 데이터, 지반공학특성을 기반으로 TRIGRS Model을 이용해서 셀단위로 사면의 안전율을 산정하였고, 산정된 안전율이 1.2 이하인 곳을 토석류 잠재 발생원으로 추출하였다(Method 2). 최종적으로 첫 번째 방법과 두 번째 방법에서 추출된 토석류 발생원에서 중첩되는 셀들을 토석류 발생원으로 제안 제안하였다(Method 3). 그리고 예측된 토석류 발생원은

정량지수 분석 방법으로 평가 및 검증하였다.

정량지수 분석은 일반적으로 산사태 및 토석류 발생원을 검증하기 위해서 활용된다(Crosta and Frattini, 2003; Salciarini et al., 2006; Sorbino et al., 2007; Godt et al., 2008; Kang and Kim, 2015). 본 연구에서는 제안된 방법에 대한 신뢰성 평가 및 비교를 위해 정량지수 분석을 수행하였다. 정량지수 분석은 Fig. 3과 같이 정의된다. 분석을 위해 ArcGIS를 통해서 2011년 우면산에서 발생한 토석류 발생지를 분석하여 토석류가 발생한 지점을 따로 가공하여 구축하였다. 성공지수(Success Index, SI)는 Eq. (1)과 같이 실제로 토석류가 발생한 셀(A_{unst})에 대해 예측에 성공한 셀($A_{success}$)의 비율을 나타낸다. 오류 지수(Error Index, EI)는 Eq. (2)와 같이 토석류가 발생하지 않은 셀(A_{stab})에 대해 토석류가 발생할

Fig. 2. Flowchart of This Study

Fig. 3. Definition of Quantitative Indexes

것이라고 예측된 셀(A_{error})의 비율을 나타낸다. 그리고 순 성공지수(Net Success Index, NSI)는 Eq. (3)과 같이 성공지수에서 오류지수를 뺀 값으로서 해석결과의 정확도를 나타내는 지수이다(Kang and Kim, 2015).

$$SI(\%) = \frac{A_{success}}{A_{unst}} \times 100 \quad (1)$$

$$EI(\%) = \frac{A_{error}}{A_{stab}} \times 100 \quad (2)$$

$$NSI(\%) = SI - EI \quad (3)$$

3.1 지형특성 기반 모델

토석류의 발생 원인은 다양한 형태로 분류된다. 그 중 얕은 사면파괴가 발생한 후 토석류로 발전하는 경우가 가장 빈번하다. 토석류로 발전하는 요인에는 사면경사, 사면곡률, 상부사면기여면적이 중요하다. 사면경사는 많은 연구자들이 토석류 전이 연구에서 많이 사용하는 중요 인자이고, 사면곡률은 사면곡면이 흰 정도로서 사면의 형태를 나타낸다. 상부사면기여면적은 토석류로 전이되기 위한 각 셀에 유입되는 물의 양을 나타내는 지표이다.

토석류 발생지의 지형학적 인자를 통해 분석한 토석류

발생원의 지형학적 특성들을 Table 1에 나타내었다. Kim (2008)은 5년간 발생한 48개소의 토석류에 대한 지형을 분석한 결과 토석류는 29~55°의 경사에서 시작되고 대부분의 토석류는 0.35 km² 미만의 유역크기에서 발생한다고 하였다. Jun and Oh (2011)은 토석류 발생 전후 토석류 발생 지역을 분석한 결과 토석류가 시작된 발생부는 20~25°의 지형경사를 갖는 사면에서 발생하고, 유하부는 침식과 퇴적이 동시에 일어나며 흐름이 발달된 부분의 평균 경사는 20~25°의 경사분포를 보인다고 하였다. Kang et al. (2015)는 14.32° 이상에서 토석류가 발생한다고 하였다. Choi et al. (2017)은 2013년 대룡산에서 발생한 토석류 산사태 현장 51개소를 조사하고 토석류의 거동특성을 분석한 결과 토석류의 발생지점의 경사는 25~50°의 범위를 가진다고 하였다. Lee and Kim (2020)은 경사도가 22° 이하인 구간은 안정적이고, 30~40° 구간에서 토석류 위험도가 높다고 하였다. Rickenmann and Zimmermann (1993)은 사면의 경사가 15도 이상에서 토석류가 발생 가능성이 있고, 일반적으로 27~38° 범위에서 토석류가 빈번히 발생한다고 하였다. Lorente et al. (2002)은 사면경사가 25~30° 사이에서 토석류 발생이 가장 빈번하다고 하였다. Brayshaw and Hassan (2009)은 토석류 발생지점의 사면경사를 분석한 결과 23~35° 범위를 보였다. 이와 같이 토석류가 발생한 사면경사는 연구대상지 특성에 따라 다양하게 분포하는 것을 알 수 있다.

Table 1. Geomorphological Characteristics of Debris Flow Initiation

No.	Factor	Value	Reference	Proposed value in Method 1
1	Slope	29~55°	Kim (2008)	More than 21°
		20~25°	Jun and Oh (2011)	
		More than 14.32°	Kang et al. (2015)	
		25~50°	Choi et al. (2017)	
		More than 22°	Lee and Kim (2020)	
		More than 15°	Rickenmann and Zimmermann (1993)	
		25~30°	Lorente et al. (2002)	
		23~35°	Brayshaw and Hassan (2009)	
2	Curvature	Less than 0	Kang et al. (2015)	Less than 0
		Less than 0	Lee and Kim (2020)	
		Less than 0	Wieczorek et al. (1997)	
		Less than 0	Delmonaco et al. (2003)	
	Plan Curvature	Less than -0.5 ~ -2	Fischer et al. (2012)	Less than -0.5
3	Upslope Contributing area	More than 50 m ² /m	Kang et al. (2015)	More than 50 m ² /m
		More than 10 ³ m ³	Griswold and Iverson (2008)	
4	STI	More than 11	Kang et al. (2015)	More than 11
5	SPI	More than 3		More than 3
6	TWI	More than 4.2		More than 4.2
7	TCI	Less than 10		Less than 10

Fig. 4. Net Success Index According to Slope

본 연구의 연구대상지인 우면산을 대상으로 Fig. 4와 같이 사면경사에 대한 정량지수 분석을 수행하였다. 순 성공지수 (NSI)를 비교한 결과 사면경사 21°에서 정확도가 가장 높게 분석되었다. 따라서 토석류가 발생할 가능성이 있는 사면경사는 21° 이상을 사용하였다(Table 1).

토석류로 전이되는 사면곡률은 대체로 음수이고, 0에 가까운 구간은 토석류 위험도가 낮다고 하였다(Wieczorek et al., 1997; Delmonaco et al., 2003; Kang et al., 2015; Lee and Kim, 2020). Fischer et al. (2012)은 대부분의 토석류는 등고선구배곡률이 -0.5 ~ -2 이하에서 발생한다고 하였다. 따라서 사면곡률은 0 이하, 등고선구배곡률은 -0.5 이하를 사용하였다.

다음으로 국내에서 Kang et al. (2015)은 상부사면기여면적은 $50 \text{ m}^2/\text{m}$ 이상에서 토석류가 발생한다고 하였고, 국외에서 Griswold and Iverson (2008)은 상부사면기여면적이 10^3 m^2 이상에서 토석류가 발생한다고 하였다. 따라서 국내에서 발생한 토석류 발생원을 분석하기 위해 상부사면기여면적은 $50 \text{ m}^2/\text{m}$ 이상을 사용하였다.

STI, SPI, TWI, TCI는 Kang et al. (2015)이 수도권 및 경기도 일대와 산지 분포도가 높은 강원도 일대에서 발생했던 산사태 및 토석류 발생지점으로부터 GIS 기반의 지형 자료를 추출하여 제안한 임계값을 사용하였다.

이와 같이 토석류 발생지역의 지형학적 특성은 대상지에 따라 다양하다. 연구대상 지역의 지형학적 요인들은 Fig. 5와 같이 구축되었다. DEM은 국토지리정보원(National Geographic Information Institute, NGII)에서 제공되는 1:5,000의 수치지도로부터 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 격자로 제작하였다. 제작된 DEM을 통해 사면경사, 사면곡률, 상부사면기여면적, STI, SPI, TCI, TWI를 구축하였고, 구축된 자료들로부터 사면경사는 21° 이상, 사면곡률과 등고선구배곡률은 각각 0 이하와 -0.5

이하, 상부사면기여면적은 $50 \text{ m}^2/\text{m}$ 이상, STI, SPI, TWI, TCI는 각각 11 이상, 3 이상, 4.2 이상, 10 이하를 사용하여 토석류 발생원을 추출하였다.

3.2 물리 기반 모델

두번째 방법으로는 물리 기반 모델을 이용하였다. TRIGRS 모델은 정상류 및 비정상류 해석이 가능한 무한사면 모델로서, 안전율 기반으로 산사태 발생 가능성을 예측할 수 있다(Baum et al., 2010; Sorbino et al., 2010; Salciarini et al., 2012). TRIGRS는 침투해석 시 정상류 모델과 비정상류 모델을 동시에 활용할 수 있다. 본 연구에서는 강우를 고려하고 일정시간에 해당하는 강우강도와 누적강우량의 안전율을 산정하기 위해 비정상류 모델을 활용하였다. TRIGRS의 침투모델은 Iverson (2000)이 Richards 식을 활용하여 강우에 따른 간극수압의 시간적 변화를 산정하였으며, 산정된 사면의 간극수압의 변화를 통해 무한사면을 이용하여 안전율을 산정하게 된다.

연구대상지역인 우면산 지역을 대상으로 지형학적 특성 및 지반공학적 특성 DB를 산정하고, 실제 강우량을 적용하였다. 강우조건은 Table 2와 같이 실제로 산사태를 발생시킨 유발강우량을 고려하였다. 그리고 침투모델 분석을 통해 실제 유발강우량에 따른 간극수압 및 안전율을 산정하였고 ArcGIS를 통해 Fig. 6과 같이 안전율 지도를 제작하였다. 그리고 정량지수 분석을 활용하여 Fig. 7과 같이 사면의 안전율에 따른 순 성공지수(NSI)를 분석한 결과 안전율이 1.2에서 순 성공지수 값이 가장 높은 것으로 분석되었다. 따라서 물리 기반 모델에서 안전율이 1.2 이하인 곳을 토석류 발생확률이 높은 곳으로 간주하여 발생원으로 결정하였다.

3.3 토석류 발생원 예측 기법 개발

보다 정확한 토석류 발생원을 예측하기 위해 지형학적 특성과 물리 기반 모델을 동시에 고려하여 토석류 발생원 예측 기법을 개발하였다. Fig. 8과 같이 토석류를 유발하는 지형학적 요인들의 값들을 사용하여 토석류 발생원을 계산한 맵과 물리 기반 모델을 통해 산정된 안전율 맵에서 중첩되는 셀을 토석류 발생원 예측기법으로 개발하였다. 개발된 융합 모델은 토석류가 발생한 지형학적 DB와 흙의 물리적인 특성, 강우량 DB를 동시에 고려하여 토석류 발생원을 예측한다.

- (1) Method 1: 지형특성 기반 모델(사면경사, 사면곡률, 상부사면기여면적, SPI, STI, TCI, TWI 제안 값을 만족)
- (2) Method 2: 물리 기반 모델($FS < 1.2$)
- (3) Method 3: 방법 1과 방법 2의 융합 모델(combined model)

Fig. 5. Geomorphological Characteristics of the Study Area

Table 2. Rainfall Conditions for Analysis in TRIGRS Model

Rainfall condition	Rainfall intensity (mm/hr)	Cumulative rainfall (mm)	Rainfall duration (hr)
Real rainfall condition	20.0	340	17

Fig. 6. Safety Factor Map Considering Rainfall Conditions in 2011 Umyeon M.T

Fig. 7. Net Success Index According to FS

Fig. 8. Proposed Model for Prediction of Debris flow Initiation Area

4. 연구 결과

본 연구에서는 지형학적 특성과 물리 기반 모델을 이용한 토석류 발생원 예측을 수행하였고, 방법별로 예측된 발생원은 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)는 지형 특성 기반 모델, Fig. 9(b)는 물리 기반 모델을 통해 안전율이 1.2 이하인 곳, Fig. 9(c)는 본 연구에서 제안한 예측기법으로 산정된 토석류 발생원을 나타낸다. 빨간색 표시된 영역이 각 방법별로 토석류 발생원을 예측한 결과이다. 연구대상 지역의 전체 셀 개수는 67,587개이고, 실제로 토석류가 발생한 셀(A_{unst})은 620개로 전체 면적의 0.91%, 토석류가 발생하지 않은 셀

(A_{stab})은 66,967개로 전체 면적의 99.09%이다.

각 방법에 의해 토석류 발생원 예측에 성공한 셀($A_{success}$)과 토석류가 발생하지 않았는데 발생할 것이라고 예측된 셀(A_{error})은 Table 3과 같다. 토석류 발생원을 추출한 결과 지형특성 기반 모델은 8,724개로 전체 면적의 12.9%, 물리 기반 모델은 18,950개로 전체 면적의 28.1%, 본 연구에서 제안된 기법은 3,485개로 전체 면적의 5.2%로 분석되었다. 실제로 토석류가 발생한 셀(A_{unst}) 620개 중 지형특성 기반 모델은 406개로 토석류 발생 면적의 65.5%, 물리 기반 모델은 414개로 토석류 발생 면적의 66.8%, 본 연구에서 제안한 기법은 382개로 토석류 발생 면적의 61.6% 예측에 성공하였

Fig. 9. Map of Debris Flow Source

Table 3. Results by Each Model

Method	No. total cell	No. debris flow initiation cell	Predicted cell		$A_{success}$ (cell)		A_{error} (cell)	
			No.	%	No.	%	No.	%
(a) Geomorphological characteristics	67,587	620	8,724	12.9	406	65.5	8,318	12.4
(b) Physical-based model			18,950	28.1	414	66.8	18,536	27.7
(c) Proposed model			3,485	5.2	382	61.6	3,103	4.6

다. 또한, 토석류가 발생하지 않았는데 발생할 것이라고 예측된 셀(A_{error})은 지형특성 기반 모델은 8,318개로 토석류가 발생하지 않은 면적의 12.4%, 물리 기반 모델은 18,536개로 토석류가 발생하지 않은 면적의 27.7%, 본 연구에서는 3,103개로 토석류가 발생하지 않은 면적의 4.6%를 예측하였다.

토석류 발생원 예측에 성공한 셀($A_{success}$)은 물리 기반 모델이 가장 높은 것으로 분석되었으나 토석류가 발생하지 않았는데 발생할 것이라고 예측된 셀(A_{error})이 27.7%로 과하게 예측을 하여 정확한 토석류 발생지점 예측이 힘든 것으로 분석되었다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 기법의 지형특성 기반 모델과 물리 기반 모델보다 토석류 발생원 예측에 성공한 셀($A_{success}$)은 다소 적지만, 토석류가 발생하

지 않았는데 발생할 것이라고 예측된 셀(A_{error})이 가장 적어 정확한 토석류 발생지점 예측을 한 것으로 분석되었다.

Fig. 10은 각 방법으로 구한 토석류 발생원을 검증하기 위해 수행한 정량지수 분석결과를 나타낸다. 지형특성 기반 모델의 성공지수(SI)는 65.5%, 오류지수(EI)는 12.4%로서 순 성공지수(NSI)는 53.1%이다. 물리 기반 모델의 성공지수(SI)는 66.8%, 오류지수(EI)는 27.7%로서 순 성공지수(NSI)는 39.1%이다. 마지막으로 본 연구에서 개발한 기법의 성공지수(SI)는 61.6%, 오류지수(EI)는 4.6%, 순 성공지수(NSI)는 57.1%로 분석되었다. 성공지수(SI)의 경우 물리 기반 모델이 가장 높으나 오류지수(EI)도 높아 순 성공지수(NSI)는 가장 낮은 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발한 기법의

Fig. 10. Analysis of Quantitative Index

성공지수(SI)는 두 모델보다 낮지만 오류지수(EI)가 낮아 순 성공지수값이 가장 크게 나타났다. 지형학적 인자와 물리 기반 모델을 결합한 제안된 모델의 순 성공지수(NSI)는 57.1%로 지형특성 기반 모델보다 4%, 물리 기반 모델보다 18% 높다. 즉 제안된 모델의 해석결과 정확도가 가장 높은 것으로 분석되었다. 추후 연구대상 지역을 확대하여 적용하여 검증된다면 토석류 발생을 예측하는 중요한 기법으로 활용할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내와 국외의 토석류 지형학적 특성 문헌을 분석하여 토석류 지형학적 값들을 제안하였고, 지반공학 적 특성과 누적강우량 자료, 산사태 발생자료를 활용하여 물리 기반 모델을 통해 안전율 지도를 제작하였다. 이를 통해 새로운 토석류 발생원예측 기법을 개발하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내와 국외의 토석류 지형학적특성 문헌을 분석하여 사면경사는 21° 이상, 사면곡률은 음수, 등고선구배곡률은 -0.5 이하, 상부사면기여면적은 $50 \text{ m}^2/\text{m}$, STI는 11 이상, SPI는 3 이상, TWI는 4.2 이상, TCI는 10 이하의 값을 제안하였다. 그리고 제안된 값을 이용해서 토석류 발생원을 추출한 결과 연구대상지역의 전체 셀개수 67,587개 중 8,724개로 분석되었다. 정량지수 분석을 통해 성공지수는 65.5%, 오류지수는 12.4%, 순 성공지수는 53.1%로 분석되었다.
- (2) 물리 기반 모델과 정량지수 분석을 통해 안전율이 1.2에서 순 성공지수(NSI)가 가장 높아 안전율이 1.2 이하인 곳을 토석류 발생원으로 계산하였다. 그리고 계산한 결과 전체 셀개수 67,587개 중 18,950개로

분석되었다. 정량지수분석을 통해 성공지수는 66.8%, 오류지수는 27.7%, 순 성공지수는 39.1%로 지형 특성 기반 모델보다 성공지수는 높으나 오류지수도 높아 순 성공지수는 가장 낮은 것으로 분석되었다.

- (3) 토석류 지형학적 특성과 물리 기반 모델을 동시에 고려하여 토석류 발생원 예측 기법을 개발하였다. 개발된 기법으로 토석류 발생원을 계산한 결과 연구대상 지역의 전체 셀개수 67,587개 중 3,485개로 분석되었다. 정량지수 분석을 통해 성공지수는 61.6%, 오류지수는 4.6%, 순 성공지수는 57.1%로 두 개의 방법보다 오류지수가 낮아서 순 성공지수는 가장 큰 것으로 분석되었다.

국내·외에서 발생한 토석류 DB, 지형학적 인자, 강우기록, 지반공학 적 데이터를 이용해서 토석류 발생원 예측 기법을 개발한 결과 기존의 방법보다 높은 예측율을 확인하였다. 추후 연구대상 지역 이외에도 적용하여 검증한다면 토석류 발생을 예측하는 중요한 기법으로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었고(21TSRD-B151228-03), 또한 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20201510100020)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Baum, R.L., Godt, J.W., and Savage, W.Z. (2010). Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, Issue F03013, pp. 1-26.
- Blahut, J., van Westen, C.J., and Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology*, Vol. 119, pp. 36-51.
- Brayshaw, D., and Hassan, M.A. (2009). Debris flow initiation and sediment recharge in gullies. *Geomorphology*, Vol. 109, pp. 122-131.
- Choi, W.I., Choi, E.H., and Baek, S.C. (2017). Analysis of hazard area by sediment disaster prediction techniques based on ground characteristics. *Korea Geo-Environmental Society*, Vol. 18, No. 12, pp. 47-57.
- Crosta, G.B., and Frattini, R. (2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall.

- Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 3, pp. 81-93.
- Delmonaco, G., Leoni, G., Margottini, C., Puglisi, C., and Spizzichino, D. (2003). Large scale debris-flow hazard assessment: A geotechnical approach and GIS modeling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 3, pp. 443-455.
- Fischer, L., Rubensdotter, L., Sletten, K., Stalsberg, K., Melchiorre, C., Horton, P., et al. (2012). Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway. *Proceedings of the 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides*, Banff, Alberta, Canada.
- Godt, J.W., Baum, R.L., Savage, W.Z., Salciarini, D., Schulz, W.H., and Harp, E.L. (2008). Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Eng Geol*, Vol. 102, pp. 214-226.
- Griswold, J.P., and Iverson, R.M. (2008). *Mobility and statistics and automated hazard mapping for debris flows and rock avalanches*. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2007-5276, 59 pages.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., and Bardou, E. (2008). Debris flow susceptibility mapping at a regional scale. *Proc. of the 4th Canadian Conference on Geohazards*, Quebec, Canada, 339-406.
- Iverson, R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 7, pp. 1897-1910.
- Jun, K.W., and Oh, C.Y. (2011). Study on risk analysis of debris flow occurrence basin using GIS. *The Korean Society of Safety*, Vol. 26-2, pp. 83-88.
- Kang, H.S., and Kim, Y.T. (2015). Study on physical vulnerability curves of buildings by numerical simulation of debris flow. *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 5, pp. 155-167.
- Kang, S.H., and Lee, S.R. (2018). Debris flow susceptibility assessment based on an empirical approach in the central region of South Korea. *Geomorphology*, Vol. 308, pp. 1-12.
- Kang, S.H., Lee, S.R., Nikhil, N.V., and Park, J.Y. (2015). Analysis of differences in geomorphological characteristics on initiation of landslides and debris flows. *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 249-258.
- Kappes, M.S., Malet, J.P., Remaitre, A., Horton, P., Jaboyedoff, M., and Bell, R. (2011). Assessment of debris-flow susceptibility at medium-scale in the Barcelonnette Basin, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, pp. 627-641.
- Kim, G.H., Yune, C.Y., Lee, H.G., and Hwang, J.S. (2011). Debris flow analysis of landslide area in Inje using GIS. *Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, pp. 47-53.
- Kim, K.S. (2008). Characteristics of basin topography and rainfall triggering debris flow. *Korean society of civil engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 263-271.
- Kim, N.G., Kim, M.I., Kwak, J.H., and Jun, B.H. (2019). Analysis of the topography characteristics of a debris-flow area using drones, *KOSHAM*, Vol. 4, pp. 127-133.
- Kim, P.G., and Han, K.Y. (2017). Numerical modeling for the detection of debris flow using detailed soil map and GIS. *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 1, pp. 43-59.
- Lee, H.N., and Kim, G.H. (2020). Analysis of topographical factors in woomyun mountain debris flow using GIS. *KSIC*, Vol. 23, No. 5, pp. 809-815.
- Lee, M.J., and Kim, Y.T. (2013). Movement and deposition characteristics of debris flow according to rheological factors. *Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 5, pp. 19-27.
- Lorente, A., Garcia-Ruiz, J.M., Begueria, S., and Arnaez, J. (2002). Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows. *Mountain Research and Development*, Vol. 22, No. 1, pp. 32-39.
- Meyer, N.K., Schwanghart, W., Korup, O., Romstad, B., and Etzelmüller, B. (2014). Estimating the topographic predictability of debris flows. *Geomorphology*, Vol. 207, pp. 114-125.
- Nam, D.H., Lee, S.H., Kim, M.I., and Kim, B.S. (2018). Calculation of rainfall triggering index (RTI) to predict the occurrence of debris flow. *Engineering Geology*, Vol. 28, No. 1, pp. 47-59.
- Rickenmann, D., and Zimmermann, M. (1993). The 1987 debris flows in Switzerland: Documentation and analysis. *Geomorphology*, Vol. 8, No. 2-3, pp. 175-189.
- Salciarini, D., Godt, J.W., Savage, W.Z., Conversini, P., Baum, R.L., and Michael, J.A. (2006). Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria region of central Italy. *Landslides*, Vol. 3, pp. 181-194.
- Salciarini, D., Tamagnini, C., Conversini, P., and Rapinesi, S. (2012). Spatially distributed rainfall thresholds for

the initiation of shallow landslides. *Natural Hazards*, Vol. 61, Issue 1, pp. 229-245.

Si, A., Zhang, J., Zhang, Y., Kazuva, E., Dong, Z., Bao, Y., et al. (2020). Debris flow susceptibility assessment using the integrated random forest based steady-state infinite slope method: A case study in changbai mountain. China, Water, Vol. 12, 2057.

Sorbino, G., Sica, C., and Cascini, L. (2010). Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. *Springer*, Vol. 53, pp. 313-332.

Sorbino, G., Sica, C., Cascini, L., and Cuomo, S. (2007). On the forecasting of flowslides triggering areas using physically based models. In *Proceedings of 1st North American Landslides Conference*, Vol. 1. AEG Special Publication 23, pp. 305-315.

Tiranti, D., and Deangeli, C. (2015). Modeling of debris

flow depositional patterns according to the catchment and sediment source area characteristics, *frontiers in EARTH SCIENCE*, Vol. 3, Article 8.

Wieczorek, G.F., Mandrone, G., and Decola, L. (1997). The influence of hillslope shape on debris-flow initiation, In *ASCE(editor), First International Conference Water Resources Engineering Division*, San Francisco, CA, 21-31.

Yune, C.Y., Chae, Y.K., Paik, J., Kim, G., Lee, S.W., and Seo, H.S. (2013). Debris flow in metropolitan area – 2011 Seoul debris flow. *Journal of Mountain Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 199-206.

Received	January 22, 2021
Revised	January 22, 2021
Accepted	January 28, 2021