물리적 강도와 사회적 취약성을 통합한 토석류 위험도 예측모형 개발

Development of Risk Prediction Model for Debris Flow Combining Physical Impact and Social Vulnerability

우충식* · 이창우** · 김경하*** · 권현정****

Woo, Choongshik*, Lee, Changwoo**, Kim, Kyongha***, and Kwon, Hyunjung****

Abstract

Recently, the loss of life and property is increasing by debris flow that is occurring very often in urban zone near mountainous area. However, because most studies have only focused on prediction of landslide occurrence and damage area by debris flow, the study on risk prediction reflecting a social vulnerability is demanded. In this study, we developed the risk prediction model for debris flow that was combined with physical impact(magnitude) of debris flow and social vulnerability. The risk of combining magnitude and vulnerability for debris flow was classified 1~5 grades according to dangerous degree, and the 1st grade is most dangerous. Using this model, the case study adapting Yongin city, Gyeonggi province shows that 1st grade are 2 sites, 2nd grade are 40 sites, 3rd grade are 60 sites, 4th grade are 124 sites, 5th grade are 53 sites. To compare this model by preceding research, we adapted to Mt. Umyeon which was damaged by debris flow in 2011. As a result, the risk of debris flow on this area was shown in 2nd grade on each model.

Key words : Debris flow, Risk prediction model for debris flow, Social vulnerability, Magnitude

요 지

최근 도시생활권에서 토석류가 빈발하여 인명 및 재산피해가 증가하고 있다. 그러나 많은 연구가 산사태 발생 및 토석류 피해범위 예측에 중점을 두어 사회적 취약성이 반영된 연구가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 토석류의 물리적 강도와 사회적 취약성을 결합하여 토석류 위험도 예측모형을 개발하였다. 토석류 위험도 예측모형은 1~5등급으로 구분되며 1등급이 가장 위험한 등급이다. 경기도 용인시를 대상으로 토석류 위험도를 예측한 결과 전체 279개소 중 1등급은 2개소, 2등급은 40개소, 3등급은 60개소, 4등급은 124개소, 5등급은 53개소로 나타났다. 토석류 위험도 예측모형을 선행연구 결과와 비교하기 위해 우면산 산사태지역을 적용한 결과 토석류 위험등급이 각 모델에서 2등급으로 나타났다.

핵심용어 : 토석류, 토석류 위험도 예측모형, 사회적 위험도, 물리적 위험도

1. 서 론

토석류(土石流)란 산사태 등과 같은 붕괴토사와 계류 바닥에 쌓인 흙, 돌, 바위가 물(강우)과 섞여 파괴력을 가지고 산지유역 아래로 흘러내려, 인명과 재산 피해를 발생시키는 대표적인 산지토사재해이다(우충식, 2011). 토석류는 발생형태 및 유동특성, 구성물질(농도) 등을 기준으로 연구목적이나 분

야에 따라 다양하게 분류되고 있다. 발생형태를 기준으로 분류할 경우 토석류는 사면형 토석류(hillslope debris flow)와 수로형 토석류(channelized debris flow)로 구분된다(Hutchinson, 1968). 사면형 토석류는 토사가 사면을 따라 흘러내린 후 퇴적된 것으로 유동길이가 짧아 산사태와 유사하다. 수로형 토석류는 사면형 토석류가 수로에서 흐르는 물과 합쳐져 규모가 증가하면서 수로를 따라 침식, 유하, 퇴적을 일으키는 현상

*정회원. 국립산림과학원 산림방재연구과 연구사(E-mail: woocs@forest.go.kr)

Member. Senior Researcher, Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

**교신저자. 정회원. 국립산림과학원 산림방재연구과 연구사(Tel: +82-2-961-2688, Fax: +82-2-961-2699, Email: leecw@forest.go.kr)

Corresponding Author. Member. Senior Researcher, Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

***국립산림과학원 산림방재연구과장

Header, Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

****국립산림과학원 산림방재연구과 인턴연구원

Interne Researcher, Division of Forest Disaster Management, Korea Forest Research Institute

으로 전형적인 토석류를 뜻한다(윤찬영 등, 2009; 박남선, 2008). 우리나라는 산지면적이 전국토의 64%가 넘어 도시화로 인한 산지개발이 증가하고 있고, 여름철 강우량이 연강수량의 2/3정도로 토석류로 인한 피해가능성이 높은 편이다. 특히, 인구밀도가 높은 도시생활권지역은 2011년 발생한 우면산 및 춘천 산사태와 같이 막대한 인명 및 재산피해를 일으킬 수 있다. 이러한 토석류의 위험도 예측을 위해 최근 많은 연구가 수행되고 있다.

Guzzetti(2005)는 토석류 위험도 예측을 위해 발생확률 외에 직접적 피해 당사자인 사회적 인자를 포함한 위험도 산정 방안을 제시하였으며, 식 (1)과 같다.

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Elements at risk} \times \text{Vulnerability} \quad (1)$$

재해위험도(Risk)는 재해발생확률(Hazard)과 피해 물량 및 가치를 나타내는 위험요소(Elements at risk), 손실지수를 나타내는 취약성(Vulnerability)의 곱으로 나타난다. 이 결과를 이용하여 본 연구에서는 토석류 위험도를 산출하기 위해 토석류 발생확률(Hazard of debris flow)과 사회적 인자인 위험요소 및 취약성을 결합한 사회적 취약성(Social vulnerability)을 통합하여 적용하였다.

토석류 발생확률과 관련한 연구는 직접적인 발생원인인 산사태 발생확률 외에 크게 유출토사량의 규모를 추정하는 연구와 유출된 토사에 의해 하류에 퇴적되는 범위를 추정하는 연구로 나눌 수 있다. 유출토사량의 규모에 관한 연구는 대부분 물리적 기반의 수치해석방법을 이용하고 있다. 이와 관련된 국내의 연구는 아직까지 미미하다. 국외의 경우 알프스산맥과 인접한 유럽국가와 일본, 대만을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다(Rickenmann *et al.*, 1999; Nakatani *et al.*, 2008). 토석류에 의한 토사량은 현지조사를 통해서도 추정하고 있으나, 재해 직후 현장에 대한 접근이 어렵고 재해발생원지형에 대한 정보가 부족해 실제 토사량을 추정하기가 어렵다. 최근 토석류 발생 전·후의 항공사진과 항공라이다 자료를 이용하여 토석류 유출토사량을 매핑하는 연구가 진행되고 있으나(Breien, 2008; Matsuoka *et al.*, 2009; 우충식, 2011) 연구대상지가 토석류가 발생된 지역으로 한정될 수밖에 없어 토석류 예측에 적용할 수 없는 한계를 가지고 있다. 토석류 연구에서 가장 핵심이 되는 부분인 토석류 퇴적구역 예측은 경험에 의한 방법과 모델에 의한 방법으로 구분되는데 오스트리아의 경우는 경험에 의한 방법으로 토석류 퇴적구역을 예측하였다. 경험에 의한 방법은 오랜 경험자의 주관에 의해 결정되는 것으로, 수치 및 모델에 의해 표현될 수 없는 부분을 경험자가 판단을 할 수 있는 점이 장점이자 단점으로 지적되고 있다. 모델에 의한 방법은 물리기반의 수치해석방법과 응답모델(블랙박스)로 나눌 수 있다. 수치해석방법은 대부분 토사량 수치해석결과를 이용하여 퇴적구역을 예측하는 방법이며(O'Brien, 1993; Median 2008) 토석류 예측에 자주 이용

되고 있는 응답모델은 Random Walk Model로 토석류의 이동 및 퇴적구역 예측에 경사도를 주요 인자로 이용하고 그 외 인자의 영향은 난수를 이용해 해결하고 있다(이창우 등, 2011). 이것은 복잡한 현상을 단순화시킬 수 있는 장점이 있지만 결과에 대한 물리적 근거가 미약한 단점이 있다.

재해의 물리적 강도에 관련 연구는 여러 가지가 있으나, 크게 재해를 일으킨 자연현상의 규모를 지수화 하는 방법과 발생확률에 근거를 둔 방법으로 나눌 수 있다(Fema, 1998; Odeh, 2002). 규모를 지수화 하는 방법은 지진의 진도 혹은 태풍의 크기를 지수화한 것이며 발생확률에 근거를 둔 방법은 몇 년에 1회와 같이 재해의 규모를 평가하는 방법이다. 그러나 아직 이 두 가지 방법 모두 명확히 확립되어 있지는 않다. 이에 Uchida *et al.*(2005)는 재해의 규모를 나타내는 다양한 자연재해의 지표를 아래의 3가지 형태로 분류하고 나누어 토사재해에 대한 적절한 형태를 분석하였다.

Type 1 : 화산 분화 진도 등 자연현상의 규모를 나타내는 하나의 주요 물리량

Type 2 : 눈사태 진도 등 자연현상의 규모를 나타내는 복수의 물리량에서 산출된 값

Type 3 : INES¹⁾ 등의 피해의 규모를 표현하는 지표

산지토사재해에 대해서는 산사태, 토석류, 붕괴 등의 다양한 재해를 표현하는 데에 Type 1로는 설명이 부족하고 Type 2의 형태가 보다 활용가능성이 높다고 판단하였으며, 이에 대한 적절한 지표로 토사이동 진도(이동토사량과 고도차의 2개 물리량 적용)를 적용한 지표를 발표하였다.

토석류의 사회적 취약성과 관련한 연구는 아직 전 반적으로 미미한 수준이다(Guzzetti *et al.*, 1999). Kojima *et al.*(2009)는 토석류로 인한 사상자 수를 분석하여 사회적 취약성을 분석하였다. Hayashi *et al.*(2013)는 토석류의 규모와 사상자수를 결합하여 토석류 위험도 산정방안을 제시하였으며, 2006년 발생한 인제, 평창 산사태 및 2011년 발생한 우면산 산사태와 일본의 여러 사례를 포함하여 비교하였다. 그러나 이 연구들은 토석류 발생 후의 피해규모를 정량화시키기 위한 목적으로, 토석류 위험도 예측에는 한계가 있다. 국내의 경우 최형선 등(2013)은 GIS를 이용하여 건물특성에 따른 상주인구 및 이용인구를 정량화하여 토석류의 사회적 취약성 산정방안을 제시하였다.

본 연구에서는 경기도 용인시를 대상으로 산사태 발생확률이 반영된 토석류 물리적 강도와 피해물량 및 손실지수를 고려한 사회적 취약성을 산정하여 도시생활권지역의 토석류 위험도 예측방안을 제시하였다.

1) International Nuclear Event Scale: IAEA에서 1999년 원자력 사고에 대해 각국에서 사용되어지고 있는 각각의 원자력 사고 지표를 세계통일지표로 표준화한 것임(IAEA, 1999).

2. 이론적 고찰

2.1 토석류 물리적 강도

토석류 물리적 강도는 Uchida *et al.*(2005) 및 Hayashi *et al.*(2013)의 산정방법을 이용하였다.

$$M = \log(V \times H) \quad (2)$$

- M : Magnitude
- V : Volume of moved sediment(m^3)
- H : Vertical elevation of sediment source above the deposit(m)

식 (2)는 토석류의 물리적 강도를 추정할 수 있는 산정식으로, 지진의 진도 개념인 Magnitude를 도입한 것이다. 이 식은 토석류 발생원이 갖고 있는 위치 및 운동에너지를 에너지보전의 법칙에 적용하여 산출한 것으로, 이동토사량(V)은 고도차(H)에 비례하며 충격도(M)는 0~8의 값을 가진다.

2.2 토석류 사회적 취약성

토석류의 사회적 취약성은 최형선 등(2013)의 산출방법을 이용하였다.

이 방법은 Fig. 1과 같이 GIS를 기반으로 건물유형별 예상 재실 인구 원단위를 산정하고 사회적 취약지역의 건물 용적

Fig. 1. Flowchart for Estimating the Social Vulnerability(Choi *et al.*, 2013).

를 도출하여 위험지역의 예상 재실 인구수를 산출한다. 경기도 용인시를 대상으로 예상 재실 인구수를 분류한 결과 5구역으로 분류되었다. 예상 재실 인구수에 따라 위험지역 내에 건물이 없거나 존재하여도 1명 미만으로 추정되는 ‘0’ 구역, 예상 재실 인구수가 1~2명인 구역, 예상재실인구수가 3~7명인 구역, 예상 재실 인구수가 8~21명인 구역, 22명 이상인 구역으로 구분하였다. 예상 재실 인구수를 도출하기 위한 방법은 식 (3)과 같으며 상주인구 및 이용인구, 건물별 가중치를 달리하였다.

$$\sum_{i=1}^n ((S.P_i + U.P_i \times W_{u,p}) \times W_{s,p} \times W_b \times (F_i \times N.f_i)) \quad (3)$$

- $S.P_i$: Settled Population
- $U.P_i$: Utilization Population
- $W_{u,p}$: Weight of Utilization Population = 1/4(only, ‘Educational and cultural facilities’=1)
- W_b : Weight of building(‘Educational and cultural facilities’=2/3)
- F_i : The area of bottom
- $N.f_i$: Number of Floors

3. 연구자료 및 방법

토석류 위험도 예측모델을 개발하기 위해 Fig. 2와 같이 산림청에서 제작한 산사태 위험지도와 토석류 피해예측지도, 1:5,000 수치지형도를 이용하여 제작한 DEM 자료, 국가기본도의 건물자료 등 GIS 자료를 이용하였다.

또한 연구대상지의 건물유형별 재실 인구 원단위자료를 이용하였다. 산사태 위험지도와 DEM을 이용하여 유역별 토석류 물리적 강도를 산정하였으며, 토석류 피해예측지도와 국가기본도의 건물자료, 건물유형별 재실 인구 원단위자료를 이용하여 사회적 취약성을 산정하였다.

Fig. 2. The Research Procedure.

3.1 토석류 물리적 강도 산정 방법

토석류 물리적 강도를 산정하기 위해 산사태 위험지도의 1, 2등급의 면적과 1:25,000 수치산림입지도에서 추출한 대상구역의 평균토심을 이용하여 토석류 발생시 유출되는 이동토사량(V)을 추정하였다. 또한 토석류 피해예측지도의 유출구의 고도와 유역내 포함된 산사태 위험지도의 1, 2등급의 최대 고도를 이용하여 토석류 발생원과 퇴적구역의 고도차(H)를 산정하였다. 이후 식 (2)를 이용하여 각 유역별 물리적 강도(M)를 산출하였다. 산출된 물리적 강도는 연구대상지의 전체 분포를 고려하고 산사태 위험지도와 일관성을 유지하기 위해 5등급으로 구분하였다.

3.2 토석류 사회적 취약성 산정 방법

사회적 취약성은 토석류 피해예측지도의 퇴적범위 내에 포함된 건물별 예상재실 인구로 나타낼 수 있다. 먼저 토석류 피해예측지도와 국가기본도의 건물자료를 이용하여 건물유형별 면적을 추정하였다. 이때, 건물면적은 건물의 층수와 토석류 발생특성을 고려하여 2층으로 한정하였다. 건물별 예상재실인구는 대상지역의 건물유형별 면적과 원단위자료를 이용하여 식 (3)의 방법으로 상주인구와 이용인구별 가중치를 달리 적용하여 산출하였다. 사회적 취약성은 연구대상지의 전체 분포를 고려하여 토석류 물리적 강도와 같이 5등급으로 구분하였다.

3.3 토석류 위험도 예측방안

토석류 물리적 강도와 사회적 취약성을 통합한 토석류 위험도 예측은 Guzzetti(2005)의 식 (1)의 개념을 도입하여 발생확률과 위험요소, 취약성의 곱으로 나타내었다. 본 연구에서는 식 (1)의 발생확률(Hazard)은 토석류 물리적 강도로, 위험요소(Elements at risk)는 건물유형별 상주인구 및 이용인구, 취약성(Vulnerability)은 인구별 가중치로 정의하였다. 건물유형별 상주인구 및 이용인구로 나타내는 위험요소는 인구별 가중치인 취약성과 곱해져 사회적 취약성으로 산출되므로 토석류 물리적 강도와 사회적 취약성의 곱이 최종 토석류 위험도로 나타나게 된다. 그러나 두 인자간의 곱은 위험도의 등급범위를 매우 넓게 나타내게 되어 실효성이 낮아질 수 있다. 따

Fig. 3. The Risk Prediction Methods of Debris Flow Using Matrix.

라서 본 연구에서는 토석류 위험도 산정을 위해 Fig. 3과 같이 매트릭스 기법을 이용하여 2가지 방안을 고려하였다.

토석류 위험도 산정은 (a)와 같이 두 인자의 합을 토석류 위험도로 정의하는 방안과 (b)와 같이 두 인자 중 최대값을 토석류 위험도로 정의하는 방안으로 구분할 수 있다. 첫 번째 방안은 토석류 위험도의 범위가 2에서 10까지로 전체 9개 등급으로 구분되는데, 이럴 경우 등급범위가 넓어지는 단점이 있다. 두 번째 방안은 토석류 위험도의 범위가 1에서 5까지 5개 등급으로 구분되어 산사태 위험지도와의 같은 체계를 가질 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3의 (b)의 방법을 이용하여 토석류 위험도 예측을 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 연구지역의 자료처리 결과

경기도 용인시를 대상으로 토석류 위험도를 분석하기 위해 토석류 피해예측지도에서 위험구역 1,304개소를 추출하였다. 이 중 건물이 존재하지 않거나 유역 출구가 중복되는 지역을 제외하여 사회적 취약성 평가가 가능한 279개소를 선정하였다.

4.2 토석류 물리적 강도 분석 결과

토석류 물리적 강도를 분석한 결과는 Fig. 4와 같이 나타났다. 용인시에서 나타난 토석류 물리적 강도의 히스토그램은 정규분포의 형태를 나타내고 있으며 3.2에서 7.3까지의 값을

Fig. 4. Classification of the Magnitude.

가진다. 이 결과를 5등급으로 분류하기 위해 Natural breaks 분류방법과 Quantile 분류방법을 적용하였다. Natural breaks 분류방법은 데이터를 유사한 값으로 분류한 후 각 클래스 간 값의 차이가 있는 다른 클래스와의 분산을 최대화하고 클래스 내 분산을 최소화될 때까지 반복하여 분류하는 방법이다 (Jenks, 1967). Quantile 분류방법은 일정 빈도를 기준으로 분류하는 방법으로 전체 빈도에서 사용자가 정의한 등급 개수로 나누어 분류하는 방법이다.

토석류 물리적 강도는 집단간 분포특성을 반영할 수 있는 Natural breaks 분류방법을 적용하여 5개 등급으로 구분하였다. 물리적 강도가 가장 높은 1등급은 6.25 이상, 2등급은 5.70에서 6.25 미만, 3등급은 5.21에서 5.70 미만, 4등급은 4.56에서 5.21 미만, 5등급은 0에서 4.56 미만으로 나타났다.

4.3 토석류 사회적 취약성 분석 결과

토석류 사회적 취약성을 분석한 결과 Fig. 5의 (a)와 같이 나타났다. 분석결과에 나타난 사회적 취약성 분포는 0에 139까지 범위를 가지고 있으며, 평균이 6.5, 표준편차가 16.8로 전형적인 지수분포의 형태를 나타내고 있다. 지수분포는 표준편차가 크게 나타나 등급화하기가 어려우므로 Z-score 방법을 이용하여 정규화 하였다. Z-score는 평균이 0이고 표준편차가 1인 정규분포로 변환하는 방법으로 평균 이하의 분포는 음수로 변환된다.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

- X : sample, μ : mean, σ : standard deviation

본 연구에서는 Fig. 5의 (a)를 정규화 하기 위해 기존 분포에 Log를 취한 후 식 (4)와 같이 Z-score를 적용하였고, 음수

Fig. 5. Normalization of the Social Vulnerability Using Z-score.

를 없애기 위해 최소값만큼 평균을 이동하였다.

사회적 취약성의 정규화된 결과는 Fig. 5의 (b)와 같고, 최소 0.18에서 최대 5.84까지 범위로 평균은 3, 표준편차는 1이다. 사회적 취약성의 등급화는 토석류 물리적 강도와 같이 Natural breaks 분류방법을 이용하여 5개 등급으로 구분하였다. 위험도가 가장 높은 1등급은 4.43 이상, 2등급은 3.46에서 4.43 미만, 3등급은 2.75에서 3.46 미만, 4등급은 1.74에서 2.75 미만, 5등급은 0에서 1.74미만으로 나타났다.

4.4 토석류 위험도 예측 결과

5개 등급으로 구분한 토석류 물리적 강도와 사회적 취약성을 Fig. 6과 같이 나타낸 결과 3등급에 가까울수록 위험구역이 많이 나타났다. 또한 1등급 또는 5등급에 가까워질수록 위험구역이 줄어드는 경향을 나타냈다.

결국 두 위험도가 결합된 위험구역의 분포는 3등급을 평균으로 하는 정규분포의 형태를 가진다고 말할 수 있다. Fig. 6의 결과를 자세히 분석하기 위해 등급간 결합된 위험구역의 수와 최종 토석류 위험등급을 Table 1에 나타내었다. 전체 279개소 중 1등급은 2개소, 2등급은 40개소, 3등급은 60개소, 4등급은 124개소, 5등급은 53개소로 나타났다.

위의 위험등급 수준을 알아보기 위해 2011년 7월 발생한 우면산 산사태 피해지역 중 신동아 아파트 인근을 대상으로 토석류 위험도를 Fig. 7과 같이 적용해 보았다. 토석류 물리적 강도는 6.50, 사회적 취약성은 4.32로 토석류 위험도는 2등급으로 나타났다. 토석류 물리적 강도는 1등급으로 높게 나타났지만 사회적 취약성은 토석류 물리적 강도보다 낮은 2등급으로 나타났다.

사회적 취약성이 토석류 물리적 강도보다 낮게 나타난 것은 실제 산사태 피해면적과 토석류 피해예측지도에서의 피해에 상면적이 상이하기 때문이다.

Fig. 6. Combination of the Magnitude and the Social Vulnerability.

Table 1. Frequency by Each Grade Through Combination of Two Factors : (Number) is the Result of Debris Flow Risk Prediction

		Social vulnerability grade				
		1 > 4.43	2 > 3.46	3 > 2.75	4 > 1.74	5 > 0
Magnitude grade	1 > 6.25	2(1)	9(2)	23(3)	10(4)	2(5)
	2 > 5.70	7(2)	24(2)	27(3)	20(4)	5(5)
	3 > 5.21	1(3)	12(3)	24(3)	18(4)	8(5)
	4 > 4.56	7(4)	11(4)	20(4)	11(4)	4(5)
	5 > 0	5(5)	11(5)	10(5)	6(5)	2(5)

Fig. 7. Combination of the Debris Flow Hazard and Social Vulnerability.

Fig. 8. Plotting of Magnitude and Damage Level(Social Vulnerability) of Past Sediment Disaster and Categories(Hayashi *et al.*, 2013).

토석류 물리적 강도는 산사태 위험지도의 1, 2등급을 기준으로 하기 때문에 붕괴량 산정시 과대치를 나타낼 수도 있다. 결국 토석류 위험도 산정시 토석류 물리적 강도와 사회적 취약성은 산사태 위험지도와 토석류 피해예측지도의 정확도에 따라 달라질 수 있는 한계를 가지고 있다. 추후 토석류 위험도 예측의 정확도 향상을 위해 산사태 위험지도 및 토석류 피해예측지도의 정확도 향상은 같이 수반되어야 할 것이다.

Fig. 8은 Hayashi *et al.*(2013)에서 분석된 우면산 산사태지

역의 토석류 위험도를 나타낸 것이다.

우면산 지역의 토석류 물리적 강도는 본 연구의 결과와 같이 6.0~7.0의 범위에 있으며, 사회적 취약성은 2.0~2.5의 범위를 나타내고 있다. 이 연구의 사회적 취약성 산출한 방법은 사망자와 사상자를 기준으로 하고 있어 본 연구에서의 결과와는 다르게 나타났다. 그러나 두 인자가 결합된 토석류 위험등급을 비교한 결과 우면산의 위험등급은 두 연구에서 각각 2등급과 4등급(본 연구와 역순)으로 두 번째로 위험한 지역으

로 나타나 유사성을 보였다. Fig. 8의 결과가 토석류 발생 이후의 결과를 이용하여 분석한 것을 감안한다면 본 연구에서 개발한 토석류 위험도 예측모형은 정확도를 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 토석류 위험도 예측모형의 정확도 검증에 위해 보다 많은 지역을 대상으로 확대 적용하여 검증해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 토석류 물리적 강도와 사회적 취약성을 산출하고 두 인자를 통합하기 위한 토석류 위험도 예측모형을 개발하였다. 토석류 위험도 예측모형을 개발하기 위해 본 연구를 수행한 결과는 다음과 같은 요약할 수 있다.

- 1) 토석류 물리적 강도는 산사태 위험지도와 DEM 자료에서 각각 이동토사량(V)과 고도차(H)를 산출하여 추정하였으며, 5등급으로 분류하기 위해 Natural breaks 분류방법을 사용하였다. 분류결과 1등급은 6.25 이상, 2등급은 5.70에서 6.25 미만, 3등급은 5.21에서 5.70 미만, 4등급은 4.56에서 5.21 미만, 5등급은 0에서 4.56 미만으로 나타났다.
- 2) 토석류 사회적 취약성은 토석류 피해예측지도와 건물별 원단위자료, 국가기본도에서 토석류 피해범위와 상주·이용인구, 건물별 면적을 산출하여 추정하였다. 그 결과 지수분포의 형태를 나타내어 Z-score를 이용하여 정규화한 후 Natural breaks 분류방법을 사용하여 5등급으로 분류하였다. 분류결과 1등급은 4.43 이상, 2등급은 3.46에서 4.43 미만, 3등급은 2.75에서 3.46 미만, 4등급은 1.74에서 2.75 미만, 5등급은 0에서 1.74미만으로 나타났다.
- 3) 토석류 위험도 예측모형은 토석류 물리적 강도와 사회적 취약성을 매트릭스기법으로 결합하였으며 1~5등급으로 나타낼 수 있도록 두 인자 중 최대값을 토석류 위험도로 결정하였다.
- 4) 용인시를 대상으로 토석류 위험도를 예측한 결과 전체 279개소 중 위험도가 가장 높은 1등급은 2개소, 2등급은 40개소, 3등급은 60개소, 4등급은 124개소, 5등급은 53개소로 나타났다.
- 5) 토석류 위험도 예측모형을 검증하기 위해 우면산 산사태 발생지역을 대상으로 HAYASHI *et al.*(2013)와 비교한 결과 두 연구 모두 두 번째로 위험한 등급으로 분석되어 유사성을 보였다.

기존의 토석류 위험도 예측은 피해범위를 추정하는데 중점을 두었다. 그러나 최근 도시생활권 지역에서 산사태가 급증하고 있고 이로 인해 인명 및 재산피해가 증가하고 있다. 따라서 본 연구는 현실적인 위험도를 예측하기 위해 산사태 위험지도와 토석류 피해예측지도를 이용하여 토석류 물리적 위험도와 사회적 위험도를 산출하였으며, 두 인자를 통합한 토

석류 위험도 예측모형을 개발하였다. 토석류 위험도 예측모형은 우면산 산사태지역에서의 검증을 통해 신뢰도를 입증하였지만 보다 신뢰도를 높이기 위해서는 많은 지역을 대상으로 적용하여 정확도를 검증해야 할 것이다. 향후 토석류 위험도 예측모형은 토석류 예방을 위한 사방구조물 설치지역의 우선순위를 결정하고 산사태 발생시 경제피난을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구에서는 국립산림과학원의 연구과제인 ‘도시생활권의 산지토사재해 방재시스템 개발’에서 수행되었으며, 공동연구자인 일본 국토기술정책종합연구소 Uchida 박사와 강남대학교 김근영 교수님께 감사드립니다.

References

- Breien, H. Blasio, F. Elverhoi, and A. Hoeg, K. (2008), Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway, Landslides, No. 5, pp. 271-280.
- Choi, H.S. Kim, T.H., and Lee, J.H. (2013) A study on the classification of the spatial characteristics by TOD planning elements of subway station areas in Seoul, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 16, No. 2, pp. 1-15.
- Federal Emergency Management Agency (1998) Job Aid : Disaster Levels, Classification and Conditions, 9310. 1-JA
- Guzzetti, F. Carrara, A. Cardinali, M., and Reichenbach, P. (1999), Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, central Italy, Journal of the Geomorphology, No. 31, pp. 181-216.
- Guzzetti, F. (2005) Landslide Hazard and Risk Assessment. Doctoral dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Germany, pp. 373.
- Hayashi, S. Uchida, T. Okamoto, A. Osanai, N., and Lee, C.W. (2013) Estimation for socio-economic impact of sediment disaster by using evaluation indexes regarding magnitude of sediment movement and level of damage in society, The Japan Society of Erosion Control Engineering ‘International symposium on sediment disaster under the influence of climate change and tectonic activity(3rd)’, pp. 45-46.
- Hutchinson, J.N. (1968) Mass movement. In: R.W.Fairbridge(ed.), Encyclopedia of Geomorphology pp. 688-695. Reinhold, New York.
- Jenks, George F. (1967) The Data Model Concept in Statistical Mapping, International Yearbook of Cartography 7, pp. 186-190.
- Kojima, S. Osanai, N. Nishimoto, H. Ogawa, K., and Matsuda, M. (2009), Study of damage index based on a questionnaire survey of the image of damage caused by sediment disasters, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 62, No. 3, pp. 41-54.
- Lee, C.W. Woo, C.S., and Youn, H.J. (2011) Analysis of debris

- flow hazard zone by the optimal parameters extraction of Random Walk Model-case on debris flow area of Bonghwa county in Gyeongbuk province, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 100, No. 4, pp. 664-671.
- Matsuoka, A. Yamakoshi, T. Tamura, K. Nagai, Y. Maruyama, J. Kotake, T. Ogawa, K., and Tagata, S. (2009) Sediment dynamics in the mountainous watersheds based on differentiation of multi-temporal LiDAR survey data sets, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, No. 62 pp. 60-65.
- Medina, V. Hurlimann, and M. Bateman, A. (2008) Application of FLATModel, a 2d finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula, *Landslides*, No. 5, pp. 127-142.
- Nakatani, K. Wada, T. Satofuka, Y., and Mizuyama, T. (2008) Development of "Kanako 2D (Ver.2.00)," a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 62-72.
- O'Brien, J.S. Julien, P.Y., and Fullerton, W.T. (1993) Two dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, No. 119, pp. 244-259.
- Odeh, D.J. (2002) Natural hazards vulnerability assessment for statewide mitigation planning in Rhode Island, *Natural Hazard Review*, Vol. 3, pp. 177-187.
- Park, N.S. (2008) A Study on Characteristics of Landslide of Debris Flow in Kangwon-do, Master's dissertation, Kangwon University.
- Rickenmann, D. Laigle, D. Ardella, B.W., and Hublb, J. (2006) Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events, *Computational Geosciences*, No. 10, pp. 241-264.
- Uchida, T. Kunitomo, M. Terada, H. Ogawa, K., and Matsuda, M. (2005), An analysis of describing method for magnitude of sediment related disasters, *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 57, No. 6, pp. 51-55.
- Woo, C.S. (2011) Development of the restoration method of topography for debris flow area using airborne Lidar data, Doctoral dissertation, Inha University.
- Yune, C.Y. Kim, K.S., and Lee, J.W. (2009) Definition and Classification of debris flow, *Journal of Korean Geotechnical society*, Vol. 25, No. 4, pp. 28-35.

Received ■ May 7, 2014

Revised ■ May 12, 2014

Accepted ■ August 6, 2014