The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 1, March, 2023, pp. 201-211
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.1.201

RESEARCH ARTICLE

랜덤워크 모델을 이용한 토석류 산사태 피해범위 산정기법 제안

송영석[1*] · 이민선[2]

[1]한국지질자원연구원 지질재해연구본부 책임연구원,
[2]하이드로종합기술연구소 재난방재시스템 및 해석 그룹 서브 그룹매니저

A Random Walk Model for Estimating Debris Flow Damage Range

Young-Suk Song[1*] · Min-Sun Lee[2]

[1]Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[2]Deputy Group Manager, Disaster Prevention System & Analysis Department, Disaster Prevention System and Analysis Department, Hydro Technology Institute Co., Ltd., Japan

Abstract

This study investigated the damage range of the debris flow to predict the amount of collapsed soil in a landslide event. The height of the collapsed slope and the distance traveled by the collapsed soil were used to predict the total trajectory distance using a random walk model. Debris flow trajectory probabilities were calculated through 10,000 Monte Carlo simulations and were used to calculate the damage range as measured from the landslide scar to its toe. Compiled information on debris flows that occurred in the Cheonwangbong area of Mt. Jirisan was used to test the accuracy of the proposed random walk model in estimating the damage range of debris flow. Results of the comparison reveal that the proposed model shows reasonable accuracy in estimating the damage range of debris flow and that using 10 m × 10 m cells allows the damage range to be reproduced with satisfactory precision.

Keywords: debris flow, collapsed soil, trajectory distance, random walk model, damage range

초 록

본 연구에서는 산사태 발생시 붕괴토사량을 산정하기 위하여 산사태 발생면적과 붕괴토사량의 상관관계를 활용하고, 붕괴토사량의 총 이동거리를 예측하기 위하여 붕괴토사량과 붕괴사면의 높이 및 붕괴토사의 도달거리를 활용하였다. 그리고 토석류의 이동경로를 예측하기 위하여 붕괴토사량의 유동 및 퇴적 특성을 경사도의 인자로 단순화시킨 랜덤워크 모델을 적용하였다. 산사태 발생지점에서 이동경로 및 피해범위를 산정하기 위하여 토석류 이동 확률계산을 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 10,000회 반복적으로 수행하였다. 이때 계산된 다양한 랜덤워크의 궤적을 피해영역으로 제시하였다. 제안된 랜덤워크 모델을 이용한 산사태 피해범위 산정기법의 정확도를 확인하기 위하여 지리산 천왕봉 일대에서 발생된 산사태 발생이력을 적용하였다. 제안된 모델의 적용성을 검토한 결과 비교적 정확하게 피해범위를 산정하는 것으로 나타났으며, 10 m × 10 m 크기의 셀을 활용하는 것이 실제 피해범위에 대한 정확한 재현이 가능한 것으로 확인되었다.

주요어: 토석류 산사태, 붕괴토사량, 이동거리, 랜덤워크 모델, 피해범위

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Young-Suk Song
E-mail: yssong@kigam.re.kr

Received: 9 March, 2023
Revised: 28 March, 2023
Accepted: 28 March, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

국내에서 주로 발생되는 산사태의 발생유형은 활동심도가 2 m 이내로 얕은 전이형 파괴로 발생되고(Kim and Song, 2015), 이후 붕괴토사가 계곡부를 따라 하부로 이동하는 토석류로 전이되는 형태이다. 이와 같은 형태의 산사태는 발생위치가 비록 인간 생활권과 떨어져 있고 소규모 일지라도 붕괴토사가 계곡부를 따라 주변토사와 함께 빠른 속도로 하부로 이동하므로 인간 생활권이 위치한 하부지역에 큰 피해를 줄 수 있다.

1917년부터 2005년까지 약 90년 동안 전세계에서 발생된 자연사면 산사태 2,626개를 분석한 결과 얕은 전이형 파괴 형태는 1,386개로 전체의 53%를 차지하고 있으며, 토석류 산사태 형태가 1,109개로 전체의 42%를 차지하는 것으로 조사되었다(Guzzetti et al., 2008).

자연사면에서 발생하는 토석류 산사태의 경우 자연적인 현상에 의해 발생하는 것으로 산사태 자체의 발생을 원칙적으로 저지하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 산사로 인한 피해를 줄이는데 최선의 노력을 기울이는 것이 필요하다. 즉 산사태 발생가능성이 높은 지점을 사전에 예측하고, 이를 토대로 피해범위를 산정하여 대책을 마련하는 것이 매우 중요하다(Song and Chae, 2013).

산사태 발생으로 인한 피해범위에 대한 예측은 크게 경험에 의한 방법과 수치모델에 의한 방법으로 구분할 수 있다. 경험에 의한 방법은 오랜 경험을 가진 전문가의 주관에 의해 결정되는 것으로 수치모델에 의해 해석될 수 없는 부분을 전문가의 판단으로 해결할 수 있는 장점이 있으나 매우 주관적이므로 다른 문제를 야기할 수 있다. 수치모델에 의한 방법은 물리기반 해석기법과 응답모델 해석기법으로 나눌 수 있다. 물리기반 해석기법은 수학적인 방법을 이용한 수치해석을 통하여 퇴적구역을 예측하는 방법이다(O'Brien et al., 1993; Medina et al., 2008). 이 방법은 토석류 발생 메카니즘을 기반으로 해석되므로 정확도가 높은 장점이 있으나 많은 입력인자가 필요하므로 적용이 어렵고 범위도 한정적이다. 한편, 응답모델 해석기법은 토석류의 이동 및 퇴적구간에 대한 예측을 위하여 수학적 모델의 인자를 활용하되 설명하기 어려운 복잡한 부분은 난수를 이용하여 해결한다(Immamura and Sugita, 1980). 이는 복잡한 현상을 단순화시킬 수는 있으므로 넓은 지역을 대상으로 비교적 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 결과에 대한 역학적인 근거가 다소 부족하여 설명이 어렵고 정확도가 물리기반 해석기법에 비해 상대적으로 낮다.

물리기반 해석기법과 응답모델 해석기법에서 토석류의 피해범위를 예측하는데 매우 중요한 요소는 토석류 발생시 유출되는 토사량이다. 일반적으로 붕괴토사량 추정은 현지조사에 의한 방법과 물리기반의 해석모델에 의한 방법이 활용되고 있다. 현지조사는 재해 직후 현장에 대한 접근이 어렵고 재해 발생전 원지형에 대한 정보가 부족해 실제 붕괴토사량을 추정하기는 어렵다.

본 연구에서는 산사태 발생으로 인한 피해범위 예측을 위하여 수치모델에 의한 방법 가운데 응답모델 해석기법을 적용하고자 한다. 먼저 산사태 발생시 붕괴토사량을 산정하고 붕괴토사량의 피해영역을 예측하기 위하여 Guzzetti et al.(2009) 및 Corominas(1996)에 의해 제안된 관계식을 각각 활용하였다. 그리고 토석류의 이동경로를 예측하기 위하여 붕괴토사량의 유동 및 퇴적특성을 경사도의 인자로 단순화시킨 통계모델인 랜덤워크 모델을 적용하였다. 이와 같이 개발된 모델을 실제 토석류 산사태 발생현장을 대상으로 재현계산을 수행하여 적용 가능성을 평가하였다.

산사태 발생시 붕괴토사량 산정 및 이동거리 예측

산사태 발생시 붕괴토사량과 도달거리는 기존의 연구결과를 토대로 산정하였다. 먼저 산사태 발생시 붕괴토사량은 산사태 발생예측 결과로부터 계산된 산사태 발생위치와 면적을 토대로 산정한다. Guzzetti et al.(2009)은 산사태 발생면적

(A_L)과 붕괴토사량(V_L)의 상관관계를 토대로 식 (1)과 같이 붕괴토사량 산정식을 제안하였다.

$$V_L = \epsilon \times {A_L}^{\alpha} \tag{1}$$

여기서, V_L는 붕괴토사량의 체적(m^3), A_L는 산사태 발생면적(m^2), ϵ과 α는 회귀분석 상수이다. Fig. 1은 677건의 산사태 발생사례를 토대로 산사태 발생면적과 붕괴토사량에 대한 회귀분석을 실시한 결과이다. 677건의 산사태 발생사례에서 산사태 발생면적과 붕괴토사량의 범위는 각각 $2.1 \times 100\,m^2 \le A_L \le 7.0 \times 100\,m^2$ 및 $3.4 \times 10^{-1}\,m^3 \le V_L \le 2.9 \times 10^{10}\,m^3$에 해당된다. 그림에서 밀도(density)는 조사된 산사태 자료의 밀집도를 나타낸 것이며, 회귀분석 결과로 부터 $\epsilon = 0.074$, $\alpha = 1.450$ ($R^2 = 0.9707$)로 제안되었다.

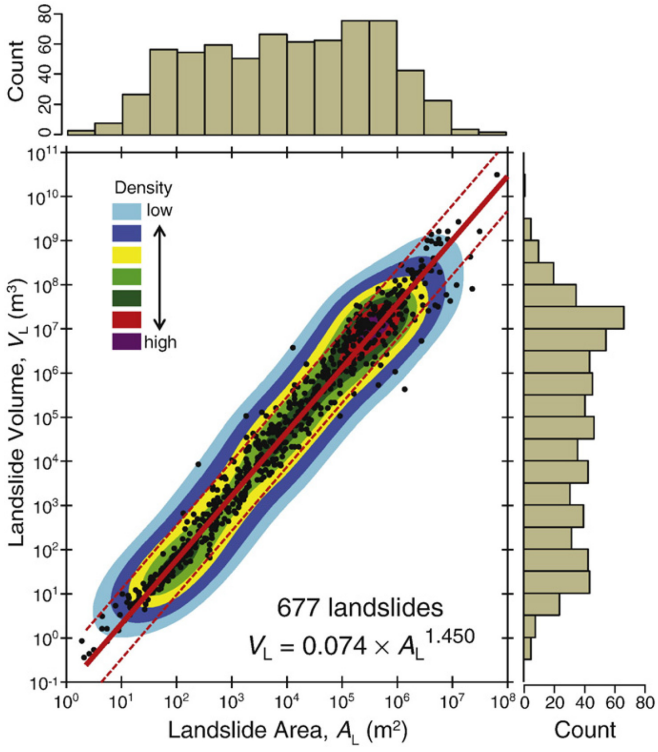


Fig. 1. Relationship between landslide area and landslide volume (Guzzetti et al., 2009).

한편, 산사태 붕괴토사량의 총 이동거리는 붕괴토사량과 붕괴사면의 높이 및 붕괴토사의 도달거리를 이용하여 산정한다. Fig. 2는 산사태 발생시 붕괴사면의 높이와 붕괴토사 도달거리를 나타낸 것이다. Corominas(1996)는 붕괴토사량(V_L)과 붕괴사면의 높이 및 붕괴토사 도달거리의 비(H/L)를 토대로 식 (2)와 같이 붕괴토사의 도달거리를 산정하였다.

$$\log\left(\frac{H}{L}\right) = a + b \bullet \log V_L \tag{2}$$

여기서, H는 붕괴사면의 높이, L은 붕괴토사 도달거리이며, a 및 b는 회귀분석 상수이다.

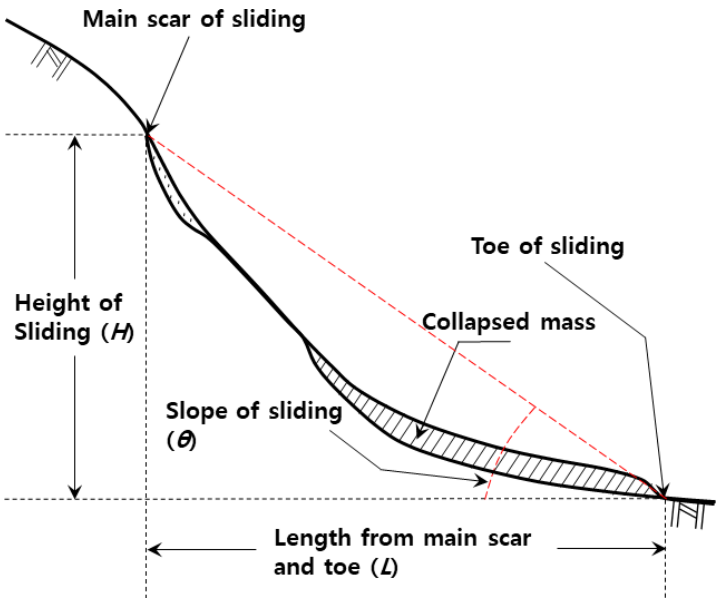


Fig. 2. Schematic diagram of a sliding plane after landslide occurrence (Fukuda et al., 2005).

Corominas(1996)는 204건의 산사태 발생사례를 발생형태에 따라 Rockfalls, Debris flows, Earthflows and mudslides, Translational slides로 구분하고 각각에 대한 회귀분석 상수를 제안하였다. Table 1은 회귀분석을 통하여 산정된 Rockfalls 및 Debris flows의 회귀분석 상수 a 및 b를 나타낸 것이다.

Table 1. Constants of regression analysis according to landslide type (a and b)

Type	a	b
Rockfalls	0.210	-0.109
Debris flows	-0.012	-0.105

랜덤워크 모델을 이용한 산사태 이동거리 산정기법

토석류 산사태로 인한 피해예측 모델은 최근 컴퓨터의 성능향상으로 대상지역의 경사뿐만 아니라 유동 및 퇴적 메카니즘을 기본원리로 한 물리모델에 의한 접근이 다양하게 이루어지고 있다. 그러나 적용에 있어 토석류 유동과 관련한 입력인자의 불확실성, 계산초기조건 및 경계조건의 적합성 등의 한계점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 계산방법이 간단하고 토석류의 유동 및 퇴적특성을 경사도의 인자로 단순화한 통계모델인 랜덤워크 모델을 적용하였다. 특히 Fukuda et al.(2005)에 의해 제안된 랜덤워크 모델을 이용한 토석류의 피해범위 산정방법을 활용하였다. 먼저 랜덤워크 모델은 다음과 같은 기본 가정을 추가하여 적용하였다.

① 토석류 발생부에서의 붕괴토사량는 Guzzetti et al.(2009)에 의해 제안된 붕괴면적과 붕괴토사량의 관계식으로부터 계산하며, 계산된 붕괴토사량으로 분배하여 하류로 흘려보낸다.

② 셀 단위로 구분된 지형도 위에서 일정량의 토사가 이동하기 시작하며, 이동경로는 임의의 셀에서 주위의 경사를 비교하여 가장 확률이 높은 방향으로 이동을 결정한다. 이 때 각 방향으로 이동할 확률은 경사도와 난수에 의한 가중치로 결정된다.

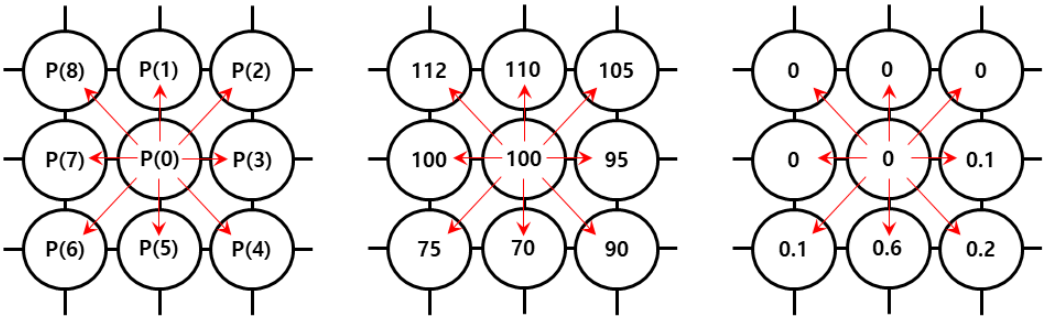
③ 토사의 정지 또는 퇴적은 토사가 도달한 임의의 지점에서 정지 및 퇴적된다. 이때 붕괴토사량의 도달거리는 Corominas(1996)에 의해 제안된 회귀분석식을 활용한다.

④ ①-③을 충분히 반복하여 각 랜덤워크 궤적의 영역을 붕괴토사의 도달범위로 선정한다.

점의 이동확률 계산

Fig. 3은 Fukuda et al.(2005)에 의해 제안된 랜덤워크 모델에서 점의 이동방향에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 3a에서 보는 바와 같이 어느 임의의 점 $P(0)$로부터 다음의 점으로 진행할 때, 진행할 방향은 $P(1) \sim P(8)$의 8가지 방향중 하나가 될 것이다. 여기서 $P(1) \sim P(8)$과 $P(0)$사이의 높이 차이는 $[P(1) \sim P(8) - P(0)]$를 $V(1) \sim V(8)$로 정의하고, $P(0)$보다 높은 값을 갖는 경우에는 0으로 간주한다. 즉 $V(1) \sim V(8) > 0$이면 $V(1) \sim V(8) = 0$으로 치환한다. 이후 $V(1)$부터 $V(8)$까지 모두 더한 값에서 $V(1) \sim V(8)$을 나눈 절대값을 지형경사에 따른 점의 이동확률로 정의한다.

Fig. 3b에서 보는 바와 같이 $P(0) = 100$이라고 하고 $P(1) \sim P(8)$은 각각의 고도 값을 갖는 다고 하면, $P(0)$에서 $P(1) \sim P(8)$의 각각에 대한 이동확률은 Fig. 3c와 같이 계산되므로 $P(5)$방향으로 이동하는 확률이 가장 높음을 알 수 있다.



(a) Potential movement direction (b) Altitude (c) Calculated probability of movement

Fig. 3. Method for calculating the probability of movement of a point using random walk model (Fukuda et al., 2005).

점의 이동

점의 이동확률을 계산한 이후 균등난수 r_n(0~1)의 값을 활용하여 이동방향을 선정한다. Fig. 4는 균등난수 값에 따른 이동방향의 선정방법을 나타낸 것이다. Fig. 3에서와 같이 고도에 따른 이동확률은 각각 $P(1) = 0$, $P(2) = 0$, $P(3) = 0.1$, $P(4) = 0.2$, $P(5) = 0.6$, $P(6) = 0.1$, $P(7) = 0$, $P(8) = 0$이 된다. 그러므로 $0 \le r_n < 0.1$일 경우 $P(3)$방향,

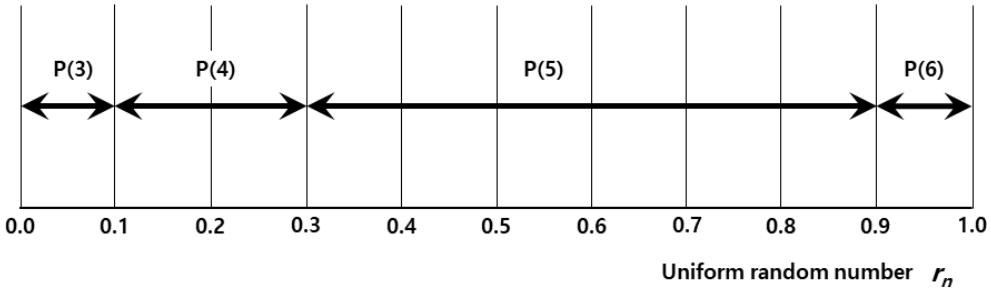


Fig. 4. Selection for the movement direction of a point using random number (Fukuda et al., 2005).

$0.1 \le r_n < 0.3$일 경우 $P(4)$방향, $0.3 \le r_n < 0.9$일 경우 $P(5)$방향, $0.9 \le r_n < 1.0$일 경우 $P(6)$방향으로 이동하게 된다. 그리고 $P(1) \sim P(2)$ 및 $P(7) \sim P(8)$방향으로의 이동확률은 0이므로 이들 방향으로는 이동하지 않는다.

점의 정지

점의 정지조건은 이동된 각 지점에서의 붕괴높이와 붕괴토사 도달거리를 구하고 식 (3)의 조건을 만족하게 되면 정지하는 것으로 하였다.

$$\log\left(\frac{H_i}{L_i}\right) < a + b \cdot \log V_L \tag{3}$$

붕괴토사 도달범위 선정

산사태 발생지점에서 이동확률 계산과 이동방향을 선정하고, 붕괴토사의 정지조건을 만족하면 붕괴토사의 도달범위를 선정할 수 있다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 이러한 과정을 10,000회 반복적으로 수행하며 이때 다양한 랜덤워크의 궤적이 나타나게 된다. 이러한 랜덤워크의 궤적을 피해영역으로 제시할 수 있다. Fig. 5는 랜덤워크 모델을 적용하여 반복적으로 산사태 이동궤적으로 도시하고 이를 토대로 산사태 피해범위를 산정한 결과이다. 그림에서 RW(n)은 n번째 랜덤워크 궤적을 의미하는 것이며, 10,000회의 랜덤워크 궤적을 이용하여 산사태 피해범위를 산정하는 것을 도시한 것이다.

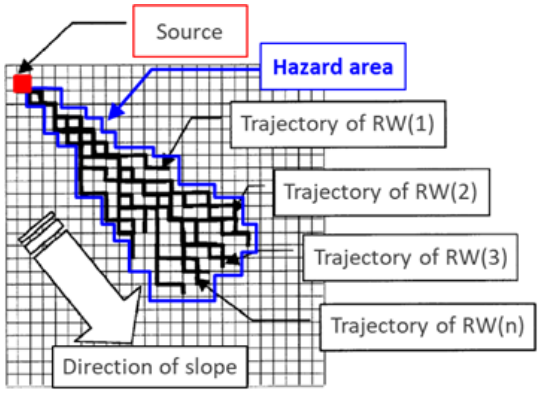


Fig. 5. Estimation of damage area using random walk trajectory (Fukuda et al., 2005).

산사태 피해범위 산정기법 검증

본 연구에서는 제안된 랜덤워크 모델을 이용한 산사태 피해범위 산정기법의 정확도를 검증하기 위하여 지리산 천왕봉 일대에서 2014년 7월 31일부터 8월 8일 사이에 발생된 산사태 이력을 활용하였다(KIGAM, 2021). Fig. 6은 위성영상 자료를 토대로 지리산 천왕봉 일대에서 발생된 산사태 피해영역를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 산사태는 사면의 정상부에서 시작되어 하부로 이동하는 것으로 나타났다.

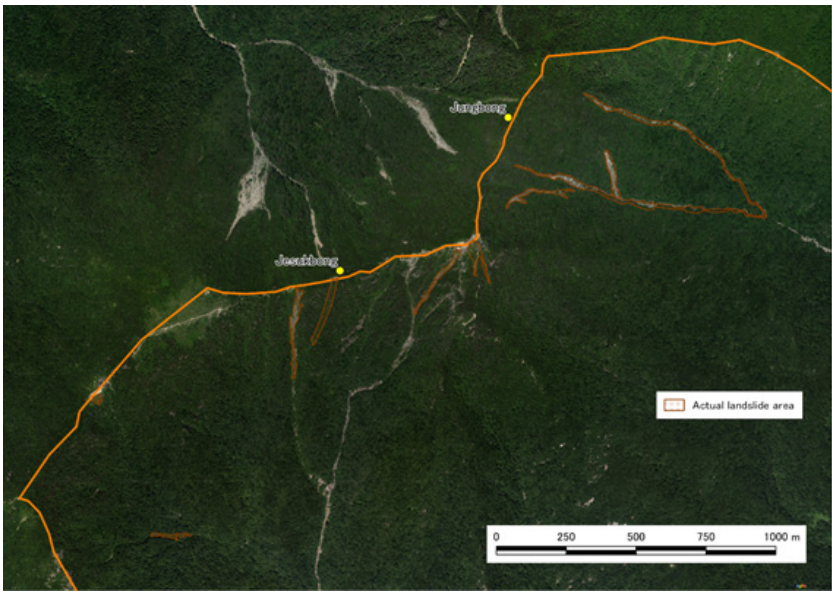


Fig. 6. Debris flow damage area around Cheonwang peak in Mt. Jiri.

Fig. 7은 산사태가 발생된 기간 동안 지리산 천왕봉 일대에서 가장 가까운 산청관측소(35.4099°N, 127.8791°E)에서 조사된 강우자료를 나타낸 것이다. 그림에서 가로축은 측정일자를 나타낸 것이고, 세로축은 시간당 강우량을 도시한 것이다. 산청관측소는 연구지역에서 약 16 km 북동쪽에 위치하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강우는 8월 2일부터 8월 3일까지 24시간 동안 약 300 mm가 발생한 것으로 나타났으며, 시간당 최대강우강도는 8월 3일 01:00경 약 40 mm/hr인 것으로 확인되었다.

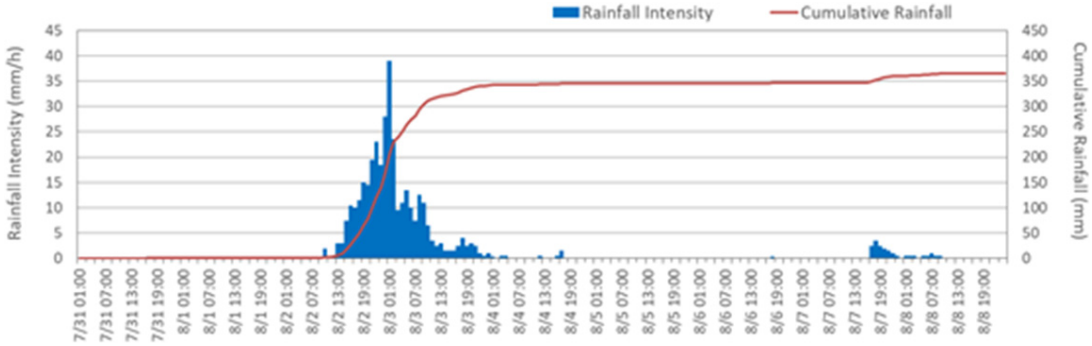


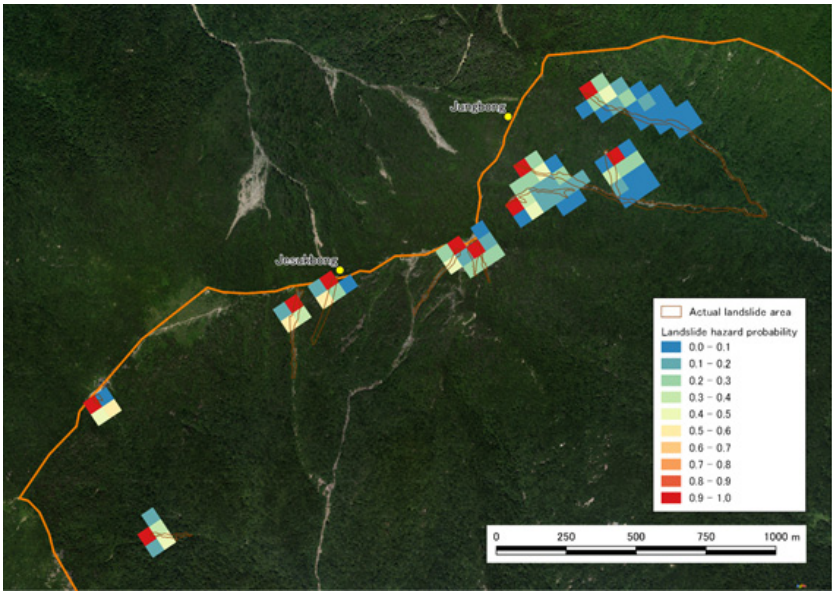
Fig. 7. Observed precipitation in the study area (Sancheng observatory) from July 31 to August 8, 2014.

Fig. 6의 연구지역에서 발생된 산사태 피해범위의 시점부를 기점으로 각각 10,000회의 랜덤워크 모델을 적용하여 피해범위를 산정하였다. 랜덤워크 모델의 총 적용횟수 N_{RW}와 각 메쉬를 랜덤워크의 이동궤적이 통과한 횟수 N_{pass}를 이용하여 랜덤워크의 통과확률 P를 식 (4)와 같이 구할 수 있다(Fukuda et al., 2005).

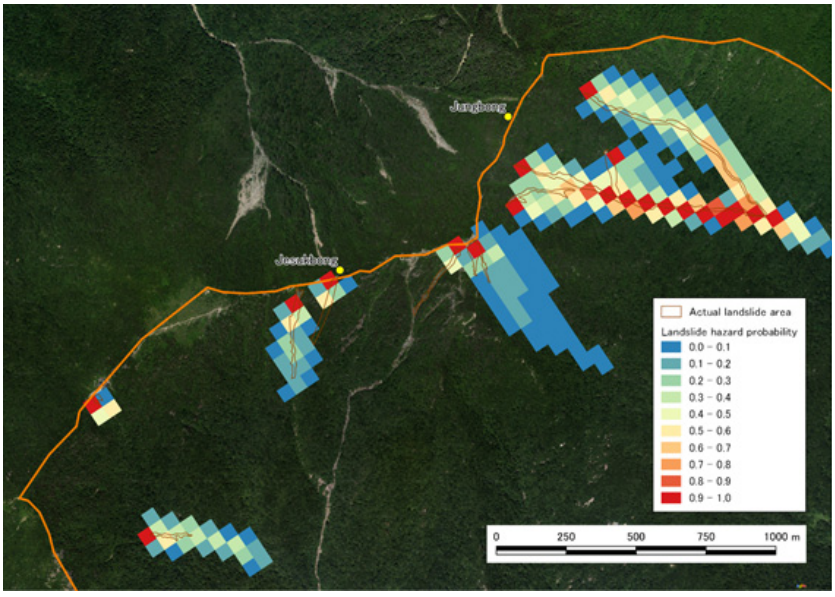
$$P = \frac{N_{pass}}{N_{RW}} \tag{4}$$

위 식을 이용하여 랜덤워크의 통과확률을 계산하고 이를 붕괴토사의 도달확률로 간주할 수 있다. 그리고 랜덤워크의 통과확률 $P > 0$이 인 영역을 피해범위로 선정한다. 어떤 메쉬의 경우 복수의 산사태로 인하여 랜덤워크의 경로가 될 수 있으며, 이때 $N_{pass} > N_{RW}$가 될 수도 있다. 이때는 랜덤워크의 통과확률 P는 1로 설정하였다.

먼저 50 m 메쉬를 대상으로 랜덤워크 모델을 적용하여 피해범위를 산정하였다. 이때 붕괴토사의 도달거리는 앞서 설명한 Corominas(1996)의 제안식을 활용하며, 회귀분석 상수는 Rockfalls 및 Debris flows의 값을 모두 적용하여 적합성을 평가하였다. Fig. 8은 50 m × 50 m 크기의 셀을 대상으로 랜덤워크 모델을 적용하여 피해범위를 산정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 피해범위의 계곡 폭은 10~20 m정도이므로 50 m × 50 m 크기의 셀로 표현하는 것은 불가능한 것



(a) Results obtained by applying the regression analysis constant of rockfalls

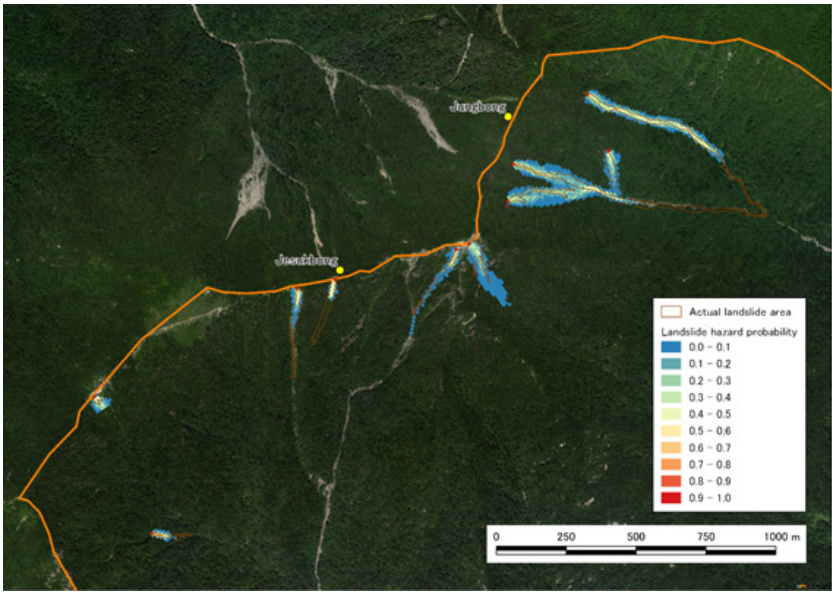


(b) Results obtained by applying the regression analysis constant of debris flows

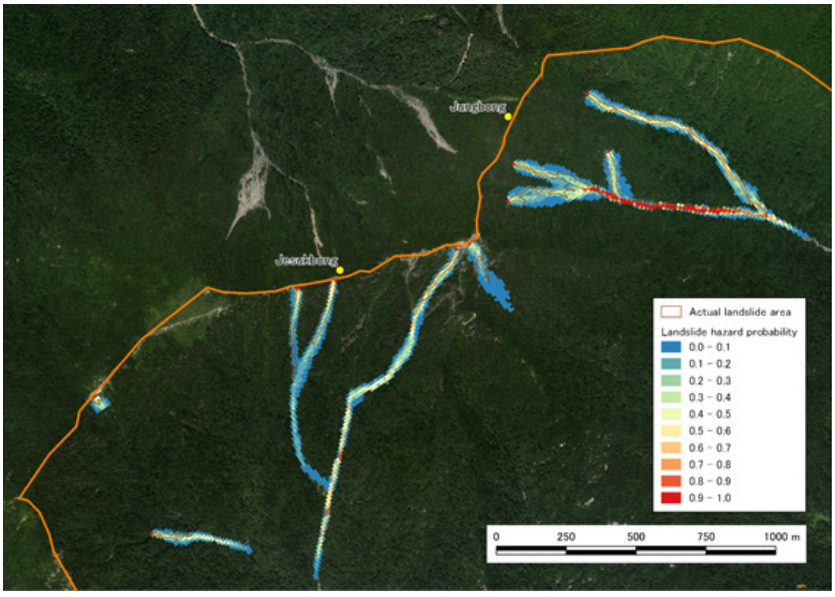
Fig. 8. Damage areas determined using a random walk model (50 m × 50 m cells), (a) Results for rockfalls; (b) results for debris flow.

으로 확인되었다. 또한 Corominas(1996)의 제안식을 이용한 피해범위 도달거리는 실제 피해범위와 비교하면 Rockfalls 회귀분석 상수는 과소평가되고, Debris flows 회귀분석 상수는 과대평가되는 것으로 나타났다.

50 m × 50 m 크기의 셀을 활용하는 경우 피해범위에 대한 평가가 어려우므로 10 m × 10 m 크기의 셀을 활용하여 피해범위를 산정하였다. Fig. 9는 10 m × 10 m 크기의 셀을 대상으로 랜덤워크 모델을 적용하여 피해범위를 산정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 지형에 대한 표현이 정교하므로 실제 피해범위에 대한 재현이 가능한 것으로 나타났다. Corominas(1996)의 제안식을 이용한 피해범위 도달거리는 실제 피해범위와 비교하면 Rockfalls 회귀분석 상수는 과소평가되고, Debris flows 회귀분석 상수는 과대평가되는 것으로 나타났다.



(a) Results obtained by applying the regression analysis constant of rockfalls



(b) Results obtained by applying the regression analysis constant of debris flows

Fig. 9. Damage areas determined using a random walk model (50 m × 50 m cells), (a) Results for rockfalls; (b) results for debris flow.

따라서 산사태 발생이후 피해범위는 실제 피해범위의 도달거리보다 과소평가되는 Rockfalls 회귀분석 상수의 적용결과와 과대평가되는 Debris flows 회귀분석 상수의 적용결과 사이에 존재함을 알 수 있다. 그러나 안정적인 측면에서 피해범위를 추정하기 위해서는 피해범위가 넓게 평가되는 Debris flows 회귀분석 상수를 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 산사태 발생으로 인한 피해범위 예측을 위하여 수치모델에 의한 방법 가운데 랜덤워크 모델을 적용하였다. 산사태 발생시 붕괴토사량을 산정하기 위하여 Guzzetti et al.(2009)의 제안식을 활용하고, 붕괴토사량의 피해영역을 예측하기 위하여 Corominas(1996)의 제안식을 각각 활용하였다. 그리고 토석류의 이동경로를 예측하기 위하여 붕괴토사량의 유동 및 퇴적특성을 경사도의 인자로 단순화시킨 랜덤워크 모델을 적용하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 산사태 발생시 붕괴토사량은 산사태 발생예측 결과로부터 산정된 산사태 발생위치와 면적을 토대로 산정하며, Guzzetti et al.(2009)에 의해 제안된 산사태 발생면적과 붕괴토사량의 상관관계를 적용하였다.

(2) 산사태 붕괴토사량의 총 이동거리는 Corominas(1996)에 의해 제안된 산사태 발생시 붕괴사면의 높이 및 붕괴토사 도달거리의 비와 붕괴토사량의 상관관계로 산정할 수 있으며 산사태 발생형태를 고려할 수 있다.

(3) 산사태 발생지점에서 이동경로 및 피해범위를 산정하기 위하여 토석류 이동 확률계산을 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 10,000회 반복적으로 수행하였다. 이때 계산된 다양한 랜덤워크의 궤적을 피해영역으로 제시하였다.

(4) 제안된 랜덤워크 모델을 이용한 산사태 피해범위 산정기법의 정확도를 확인하기 위하여 지리산 천왕봉 일대에서 발생된 산사태 발생이력을 적용하였다. 제안된 모델의 적용성을 검토한 결과 비교적 정확하게 피해범위를 산정하는 것으로 나타났으며, 10 m × 10 m 크기의 셀을 활용하는 것이 실제 피해범위에 대한 정확한 재현이 가능한 것으로 확인되었다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “실시간 도시지역 산사태 조기경보기술 및 지질환경 오염물질 위험관리기술 개발(23-3412-1)”과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

Corominas, J., 1996, The angle of reach as a mobility index for small and large landslides, Canadian Geotechnical Journal, 33, 260-271.

Fukuda, T., Sasaki, Y., Wakizaka, Y., 2005, Development of probabilistic estimation method on hazard areas of shallow slope failure debris, Journal of the Japan Society of Engineering Geology, 46(5), 265-279.

Guzzetti, F., Ardizzone, F., Cardinali, M., Rossi, M., Valigi, D., 2009, Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy, Earth and Planetary Science Letters, 279, 222-229

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, Landslides, 5(1), 3-17.

Immamura, R., Sugita, M., 1980, Study on simulation of debris depositing based on a Random Walk Model, Journal of the

Japan Society of Erosion Control Engineering, 32, 17-26.

KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2021, Development of real-time landslide early warning technology in urban areas and risk management technique of pollutants in geologic environment, GP2020-016-2021, Ministry of Science and ICT of Korea, 448p.

Kim, K.S., Song, Y.S., 2015, Geometrical and geotechnical characteristics of landslides in Korea for various geological conditions, Journal of Mountain Science, 12(5), 1267-1280

Medina, V., Hurlimann, M., Bateman, A., 2008, Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsular, Landslides, 5, 127-142.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T., 1993, Two dimensional water flood and mudflow simulation, Journal of Hydraulic Engineering, 199(2), 244-261.

Song, Y.S., Chae, B.G., 2013, Development of a GIS-based computer program to design countermeasures agains debris flows, The Journal of Engineering Geology, 23(1), 57-65 (in Korean with English abstract).