



A study of applying soil moisture for improving false alarm rates in monitoring landslides

Oh, Seungcheol^a · Jeong, Jaehwan^b · Choi, Minha^c · Yoon, Hongsik^{d*}

^aGraduate Student, Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^bPh.D, Center for Built Environment, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^cProfessor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^dProfessor, Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 21-074

Received: 24 September 2021; Revised: 6 October 2021; Accepted: 8 October 2021

Abstract

Precipitation is one of a major causes of landslides by rising of pore water pressure, which leads to fluctuations of soil strength and stress. For this reason, precipitation is the most frequently used to determine the landslide thresholds. However, using only precipitation has limitations in predicting and estimating slope stability quantitatively for reducing false alarm events. On the other hand, Soil Moisture (SM) has been used for calculating slope stability in many studies since it is directly related to pore water pressure than precipitation. Therefore, this study attempted to evaluate the appropriateness of applying soil moisture in determining the landslide threshold. First, the reactivity of soil saturation level to precipitation was identified through time-series analysis. The precipitation threshold was calculated using daily precipitation (P_{daily}) and the Antecedent Precipitation Index (API), and the hydrological threshold was calculated using daily precipitation and soil saturation level. Using a contingency table, these two thresholds were assessed qualitatively. In results, compared to P_{daily} only threshold, Goesan showed an improvement of 75% ($P_{\text{daily}} + \text{API}$) and 42% ($P_{\text{daily}} + \text{SM}$) and Changsu showed an improvement of 33% ($P_{\text{daily}} + \text{API}$) and 44% ($P_{\text{daily}} + \text{SM}$), respectively. Both API and SM effectively enhanced the Critical Success Index (CSI) and reduced the False Alarm Rate (FAR). In the future, studies such as calculating rainfall intensity required to cause/trigger landslides through soil saturation level or estimating rainfall resistance according to the soil saturation level are expected to contribute to improving landslide prediction accuracy.

Keywords: Precipitation, Soil moisture, Antecedent precipitation index, Landslides threshold

산사태 모니터링 오탐지율 개선을 위한 토양수분자료 활용에 관한 연구

오승철^a · 정재환^b · 최민하^c · 윤홍식^{d*}

^a성균관대학교 건설환경시스템공학과 석박통합과정, ^b성균관대학교 건설환경연구소 박사후연구원, ^c성균관대학교 수자원학과 교수,

^d성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수

요 지

강수는 공극수압의 상승에 관여해 토양 강도 및 응력의 변동을 발생시켜 산사태의 주요 원인 인자 중 하나로 지목된다. 따라서 강수는 산사태 발생 임계값 산정에 빈번히 사용되나, 지반 안정성을 직접적으로 산정하고 예측하기에는 무리가 있어 오탐지 사건에 대한 분석에는 한계가 있다. 한편 토양수분은 공극수압의 변동에 보다 직접적인 연관성을 지니므로, 다수의 연구에서 지반 안정성의 정량적인 평가에 활용된 바 있다. 이에 본 연구에서는 산사태 발생에 대한 임계값 산정에 있어 토양수분 인자 활용의 적정성을 평가하고자 하였다. 먼저 두 수문 인자의 거동 분석을 통해 강수에 대한 토양 포화도의 반응성을 파악하고, 선행 강수지수(Antecedent Precipitation Index)를 활용해 산사태 발생 임계값을 산정하였다. 이후 토양 포화도를 활용하여 산사태 발생 임계값을 산정했으며, 분할표를 활용해 두 임계값을 정성적으로 평가하였다. 그 결과, 일 강수량(P_{daily})을 단일 인자로 사용해 결정된 산사태 발생 임계값 대비 과산입에서는 각각 75% (API), 42% (SM)의 향상을 보였고 창수면에서는 각각 33% (API), 44% (SM)의 향상을 보였다. 따라서 토양수분과 선행 강수지수 모두 임계성공지수(Critical Success Index)를 효과적으로 향상시켰으며 오탐지율을 감소시켰다. 추후 토양 포화도를 통해 산사태 발생에 요구되는 강우 강도를 산정하는 연구와 토양 포화도 수준에 따른 강우 저항성을 산정하는 연구 등 토양수분 자료를 다각적으로 접목한 연구가 수행된다면 산사태 예측 정확성을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

핵심용어: 강수, 토양수분, 선행강수지수, 산사태 임계값

*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7536

E-mail: yoonhs@skku.edu (H. Yoon)

1. 서론

강수는 산림지역과 같은 투수층에서 토양 강도 및 응력의 변동을 발생시켜 산사태의 주요 원인 인자로 지목된다. 따라서 산사태의 감시, 예보, 조기 경보 등 재난 관리를 위한 측면에서 매우 중요한 인자이다. 그러나 산사태는 사면에서 다양한 인자들의 복잡한 메커니즘을 통해 발생하므로, 강수 인자만을 활용하여 지반 안정성을 정량적으로 산정하고 예측하기에는 무리가 있다(Sun *et al.*, 2019). 산사태로 인한 대규모 재난 및 인명피해를 방지하기 위해, 강수와 산사태 사이의 연관성을 규명하여 강수 특성을 통해 산사태를 예측하기 위한 연구가 다양하게 시도되었다. Caine (1980)는 최초로 강수 강도(Rainfall Intensity)와 기간(Duration)만을 활용해 산사태 발생 임계선을 결정하였으며, 이후 연구지역 고유의 지형 및 기후적 특성이 반영된 강수 임계값이 다양하게 제안되었다(Guzzetti *et al.*, 2007; Saito *et al.*, 2010; Segoni *et al.*, 2018). 이 외에도 선행 강수지수(Antecedent Precipitation Index)나 누적 강우(Cumulative rainfall) 등 지반에 대한 강수의 지속적인 영향을 반영하기 위한 인자들이 다양하게 활용되는 추세이며(Li *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2014), 이와 같은 연구는 다양한 특성을 가진 산지가 많은 국내에서도 활발히 이루어지고 있다(Hong *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2013; Pradhan *et al.*, 2019b).

강수 기반 산사태 발생 임계값은 산사태 발생 사례를 통해 경험적으로 평가되고 있다. 그러나 산사태 발생 조건은 연구지역의 기후 및 환경적 특성에 의해 달라지기 때문에, 임계값을 광범위한 지역에 일반화하여 적용할 경우 여러 불확실성을 내포하게 된다. 예컨대, 임계값을 충족했으나 산사태가 발생하지 않는 오탐지 사건(False alarm events)이나 조건이 충족되지 않았으나 산사태가 발생한 미탐지 사건(Miss alarm events)이 지역마다 상이하게 발생할 수 있다. 또한 미탐지와 오탐지는 균형(Trade-off) 관계(*i.e.*, 한쪽이 증가하면 한쪽이 감소하는)를 가지므로(Conrad *et al.*, 2021), 임계값 산정에 있어 이 해당사자의 주관이 요구된다.

이와 같은 한계를 극복하기 위해 최근에는 임계값의 일반화보다 전반적인 산사태 예측 정확도의 향상을 위한 연구가 다양하게 진행되는 추세이며(Berti *et al.*, 2012; Bezak *et al.*, 2016; Pradhan *et al.*, 2019a), 그중 선행 토양수분(Antecedent soil moisture), 선행 습도(Antecedent wetness) 등 해당 지역의 선행 조건을 반영한 연구들은 예측 정확도를 효과적으로 향상시켰다(Marino *et al.*, 2020; Thomas *et al.*, 2019; Wicki *et al.*, 2020). 특히 토양수분은 지반의 습윤 상태를 정량적으로 판단하기에 적합한 인자로, 산사태 발생 임계 산정에 있어 중요한

인자로 평가받고 있다. Abraham *et al.* (2021)의 연구결과에 따르면 건조한 지반의 경우 산사태가 발생하기 위해서는 단시간에 많은 양의 강수를 필요로 하는 반면, 지반을 구성하는 토양이 이미 많은 수분을 보유하고 있는 경우 강수 강도가 높지 않더라도 산사태가 발생할 수 있다. 즉, 산사태 예측에 있어 강수와 토양수분을 함께 고려하는 것이 오탐지율을 줄이고 예보 정확도 향상으로 이어질 수 있다.

토양수분의 변동은 지반을 구성하는 토양의 종류와 공극률, 주위의 식생과 태양 복사 등 다양한 환경적 인자의 영향을 받으므로 지역특성을 잘 반영할 수 있다(Western *et al.* 2002). 따라서 다양한 지역의 특성을 반영한 산사태 발생 임계값을 구하기 위해 필수적인 요소로 사용될 수 있으나, 토양수분 관측자료의 부재, 품질관리의 어려움 등 다양한 이유로 국내에서는 토양수분을 고려한 연구가 제한적인 실정이다. Lee *et al.* (2012)과 Oh and Lee (2014)는 무한사면안정해석기법에 각각 토양 습윤지수와 공간분포형 습윤지수를 고려하여 사면 안정성을 분석한 바 있으나, 연구지역에서의 토양수분 자료 부재로 모형 기반 토양 습윤지수를 사용하였다. Kim *et al.* (2016)는 직접 실험을 통해 붕괴 발생 전, 후의 토양수분 거동을 분석하였다. 연구결과를 통해 토양수분 관측이 토층 내 수문 거동을 파악하는 데 용이하며 토양수분 센서는 산사태 조기 경보에 효과적일 것이라는 결론을 도출했으나, 모든 산사태 취약 지역에 토양수분 센서를 설치하여 관측하는 것은 현실적으로 불가능에 가깝다고 언급하였다. 즉 국내에서도 산사태 분석에 있어 토양수분을 활용한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나, 가용할 토양수분 자료나 산사태 자료가 충분치 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 산사태 발생 임계값 산정에 있어 토양수분의 활용 가능성을 파악하고자 하였다. 4.1절에서는 강수와 토양수분 변동성을 분석하고, 산사태 발생 시 두 수문 인자의 거동을 파악해 산사태 임계 산정에 활용하고자 하였다. 4.2절에서는 일 강수량과 선행 강수지수를 사용해 산사태 임계를 산정하였고, 4.3절에서는 일 강수량과 토양수분을 사용해 산사태 임계를 산정해 두 임계값을 비교 및 평가하였다.

2. 연구지역 및 자료

2.1 연구지역

본 연구에서는 한반도에서의 산사태에 대한 평가를 위해 괴산읍과 창수면을 연구지역으로 선정하였다(Fig. 1). 괴산읍(Goesan)은 동경 127.75 E°~127.85 E°, 북경 36.79 N°~36.87 N°에 위치하고 있으며, 소백산맥 중에서도 비교적 평

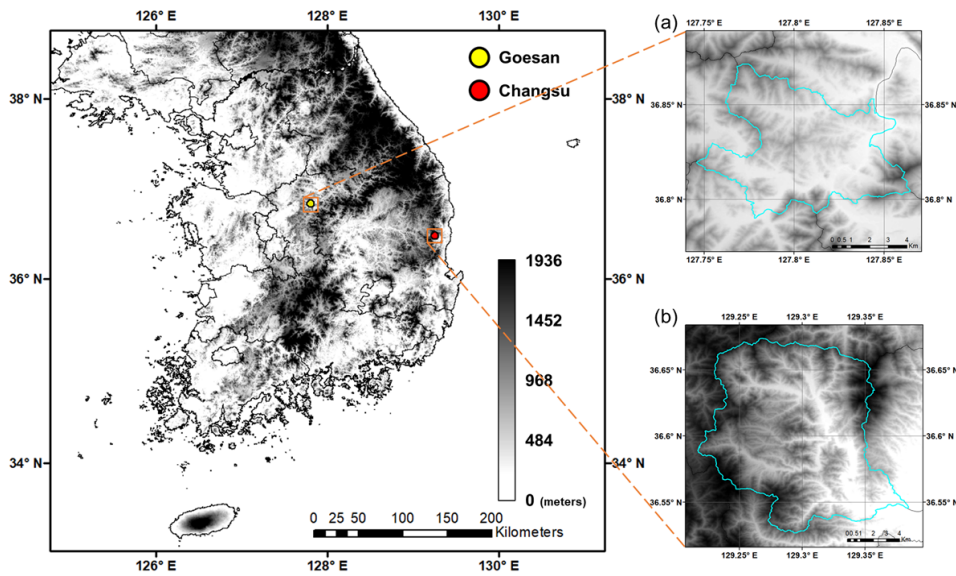


Fig. 1. Location of study area (a) Goesan and (b) Changsu

평한 지역에 자리하고 있다. 창수면(Changsu)은 동경 동경 129.92 E°~129.39 E°, 북경 36.52 N°~36.68 N°에 위치하고 있으며, 태백산맥에 자리하고 있어 지형이 비교적 복잡하다. 한반도의 연평균 강수량은 약 1000~1300 mm로, 그중 약 70%가 여름에 발생한다. 따라서 강수가 집중된 기간에 산사태 발생 빈도 또한 높은 편이다. 본 연구지역 또한 7월부터 10월에 걸쳐 산사태가 발생하였다. 괴산읍은 2017년 7월 14일부터 16일까지, 그리고 2018년 8월 26일부터 9월 1일까지 산사태가 발생하였으며, 창수면은 2018년에는 괴산읍과 같은 기간에, 그리고 2019년 10월 2일부터 3일까지 발생하였다.

2.2 연구자료

전지구강수관측위성(Global Precipitation Measurement, GPM)은 미국항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)과 일본우주항공연구개발기구(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)에 의해 2014년 2월에 발사된 위성이다. GPM은 기준 강수 자료를 기반으로 적외선 센서(Infra-red sensor)와 수동형 마이크로파 센서(Passive microwave sensor) 산출물에 가중치를 부여하므로, 통합형 강수 자료를 생산한다. 검증 단계에서는 우량계 기반의 편향 보정(Bias adjustment) 과정을 거치므로, 높은 정확도의 강수 자료가 생산된다(Huffman *et al.*, 2015).

Global Land Data Assimilation System (GLDAS)은 지표면 상태나 변화에 최적화된 인자를 생산하기 위한 모형 체계 중 하나로, 강수, 습도, 온도 등 다양한 입력 인자가 활용된다(Rodell *et al.*, 2004). 4가지 지표 모형(Land Surface Model,

LSM)이 각기 다른 자료를 생산하며, 모형에 따라 제공하는 토양수분의 깊이가 다르다. 본 연구에서는 Noah-LSM 기반 토양수분을 사용하였으며, 0-10 cm 깊이의 토양수분을 지표면 토양수분으로 사용하였다.

3. 연구방법

3.1 Antecedent Precipitation Index (API)

선형 강수지수(Antecedent Precipitation Index, API)는 강수를 기반으로 유역의 습도를 추정하는 방법론 중 하나다(Kohler and Linsley, 1951). 연구지역에 대한 강수의 영향이 시간의 흐름에 따라 감소한다는 가정을 전제로, 감쇠상수 k 를 적용해 습도를 정량화하였다(Eq. (1)).

$$API_{i+1} = \sum_{t=0}^i k^t P_{i-t} \quad (1)$$

P 는 일 강수량(mm/day), k 는 감쇠상수(decay coefficient)이다. 본 연구에서는 선형 연구결과를 바탕으로 k 에 0.90을 적용하였으나(Heggen, 2001), 보다 정확한 지수 산정을 위해서는 교정(calibration) 과정이 필요하다.

3.2 Accuracy assessment

본 연구에서는 산사태 발생 임계값의 정성적 평가를 위해 분할표를 활용하였다(Table 1). 분할표는 산사태 발생 임계값

의 산사태 관측 능력을 평가하는 지표로, True Positive (TP), False Positive (FP), False Negative (FN), 그리고 True Negative (TN)로 나뉜다.

TP는 발생한 산사태를 임계값 또한 발생한 것으로 예측한 사건, FP는 실제 산사태가 발생하지 않았으나 산사태가 발생한 것으로 예측한 사건, FN은 실제 산사태가 발생했으나 임계값이 예측하지 못한 사건, 그리고 TN은 실제 산사태가 발생하지 않았고 임계값 또한 발생하지 않은 것으로 예측한 사건의 수를 나타낸다. 산사태 발생 임계값의 정확도는 이러한 사건의 수를 통해 산정된 비율로 평가받는다.

$$FAR = \frac{FP}{TP + FP} \tag{2}$$

$$CSI = \frac{TP}{TP + FN + FP} \tag{3}$$

Eq. (2)는 오탐지율(False Alarm Rate, FAR)를, Eq. (3)은 임계성공지수(Critical Success Index, CSI)를 나타낸다. 오탐지율이란 전체 발생한 산사태 사건에 대해 임계값이 예측하지 못한 사건의 비율을 나타내며, 1에 가까울수록 오탐지 사건의 비가 높아 정확도가 낮은 것으로 평가된다. 임계성공지수란 산사태 발생과 연관 있는 사건에 대해 임계값이 예측한 사건의 비율을 나타낸다. 여기서 산사태 발생과 연관 있는 사건이란 TP, FN, FP의 합을 의미하는데, 이는 전체 사건에서 TN 사건의 수를 뺀 수와 같다. 1에 가까울수록 정확도가 높은 것으로 평가된다.

Table 1. Landslide detection contingency tables

Validation		Observed landslides	
		True	False
Modeled landslides	True	True Positive (TP)	False Positive (FP)
	False	False Negative (FN)	True Negative (TN)

4. 결과 및 고찰

4.1 산사태에 대한 수문인자 변동성 분석

Fig. 2는 산사태 발생 기간에 따른 토양 포화도와 강수의 시계열 자료를 나타낸다. P_{GPM}은 일 단위 강수량이며, 시간 해상도의 통일을 위해 3시간 단위 자료인 SM_{GLDAS} 또한 일 단위 자

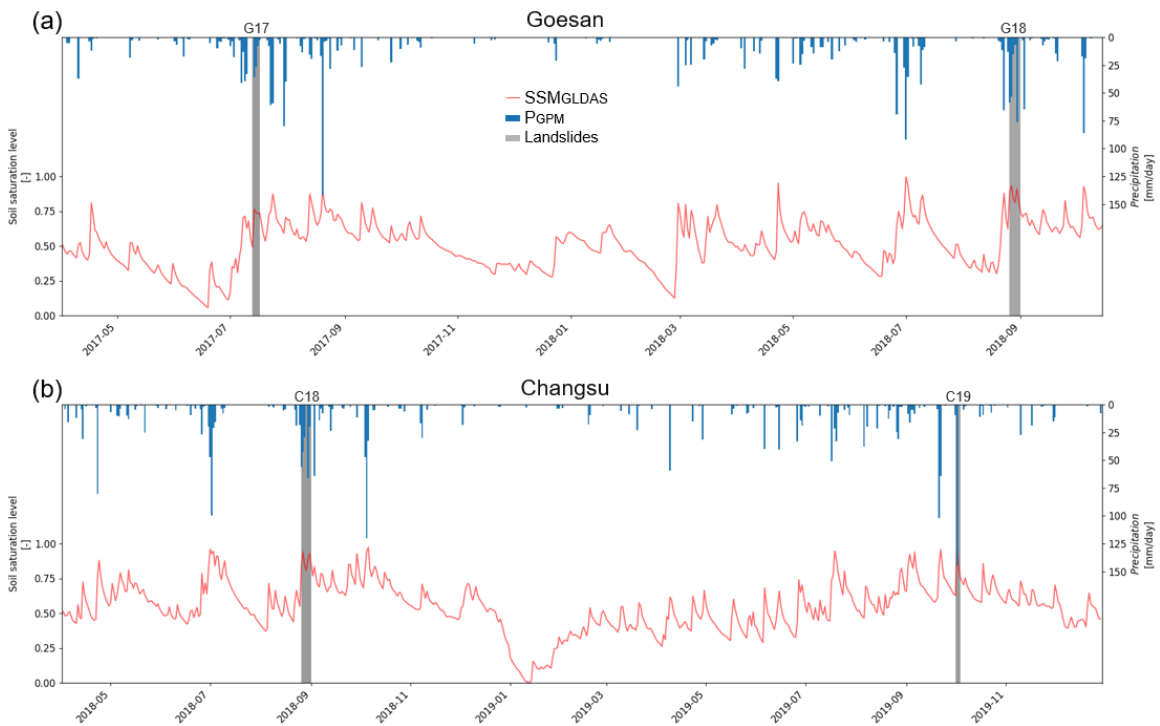


Fig. 2. Time series of GLDAS surface soil moisture (0-10 cm) based soil saturation level and GPM IMERG-Final run daily precipitation with landslide events

료로 통합하였다. 재분석 자료의 특성상 연속적인 강수나 고강도 강수가 발생한 기간의 경우 높은 상승폭을 보이나, 저강수 및 무강수 기간에는 지속적인 감소가 나타나는 특징이 있다.

회색으로 표시된 구간은 산사태 발생 기간을 나타낸다. 편의를 위해 각 지역에서 발생한 산사태를 발생 연도와 함께 명시하였다. 먼저 괴산읍에서 17년 7월 13일부터 16일까지 발생한 산사태(G17)는 연속적인 강수를 동반했으며, 산사태 이전에 발생한 연속적인 강수로 인해 토양 포화도가 이미 증가한 상태였음을 확인할 수 있다. 같은 지역의 18년 8월 26일부터 9월 1일까지 발생한 산사태(G18) 역시 60 mm에 육박하는 강수로 인해 토양 포화도가 이미 증가한 후임을 확인할 수 있다. 창수면에서 18년 8월 26일부터 9월 1일까지 발생한 산사태(C18)와 19년 10월 2일부터 3일까지 발생한 산사태(C19)는 급격한 토양 포화도의 상승을 동반하였는데, 다른 사건과 달리 C19는 단기간에 고강도 강수가 발생하였다.

산사태 발생 전후를 살펴보면, 75 mm 이상의 고강도 강수가 빈번히 발생한 것을 확인할 수 있다. 괴산읍의 경우 17년 8월 중순경 약 150 mm에 달하는 강수가 발생했으며 앞서 발생한 강수로 토양 포화도 또한 높은 수준이었다. 또한, 18년 6월 말부터 7월 초에는 비교적 높은 강도의 강수가 급격한 토양 포화도 증가로 이어진 것을 확인할 수 있다. 창수면(Fig. 2(b))의 경우 산사태 발생 전인 18년 7월 초, 10월 중순, 그리고 19년 9월 중순 경 모두 100 mm 이상의 강수가 발생한 것을 확인할 수 있다. 즉 고강도 강수가 산사태로 이어지지 않은 사건이 빈번한 것을 확인할 수 있으며, 이는 강수 관련 특성만으로 산사태 발생 가능성을 예측하기에는 한계가 있음을 의미한다. 강수로 인한 토양 포화도의 증가는 공극수압의 증가로 이어지며, 이는 토양 강도의 감소와 토양 응력의 증가를 야기한다

(Schulz *et al.*, 2009). 즉, 공극수압의 증가/감소는 지반 안정성에 직접적으로 관여해 산사태의 발생 여부를 좌우한다. 그러나 공극수압은 강수량과 비례하여 증가하지 않으므로, 강수만으로 공극수압의 변동을 판단하기 어렵다. 더욱이 산사태가 진행됨에 따라 공극수압은 점차 감소하게 되므로, 지반 안정도는 점차 증가하게 된다. 따라서 산사태가 발생했던 지역에서 동일한 수준의 강수 강도나 토양 포화도에서 산사태가 발생하지 않을 수 있게 된다. 토양 안정성과 공극수압의 관계성을 고려할 때(Bogaard and Greco, 2016), 산사태 발생에 있어 토양수분 자료는 지반 안정성을 파악하는 데 보다 직관적으로 활용될 수 있다.

4.2 강수 기반 임계값 분석

강수는 산사태와 밀접한 연관성을 지니며, 산사태 발생 임계값 산정에 있어 다른 기법이나 자료를 필요로 하지 않으므로 현재까지도 널리 활용되고 있다. 본 절에서는 빈도 분석을 통해 산사태 발생 시 강수 수준의 빈도를 파악하고, 강수 기반 산사태 발생 임계값을 산정하여 산사태 예측 능력을 평가하였다.

Fig. 3에는 두 연구지역의 일 강수량 별 확률밀도함수를 나타내었다. 괴산읍의 경우(Fig. 3(a)) G17은 약 35 mm 수준에서 발생했으며(THR_{G17}), G18은 약 60 mm 수준에서 발생하였다. 창수면의 경우(Fig. 3(b)) C18은 G18과 비슷한 수준에서, C19는 약 150 mm 수준에서 발생한 것을 확인할 수 있다. 두 연구지역 모두 약 30 mm를 초과하는 강수 사건의 빈도가 매우 낮아, 강수 강도 별 빈도를 통해 산사태를 예측하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 일 강수량과 선행 강수지수를 활용해 산사태 발생 임계값을 산정하였다. 본 연구에서는 전지구관측위성 일

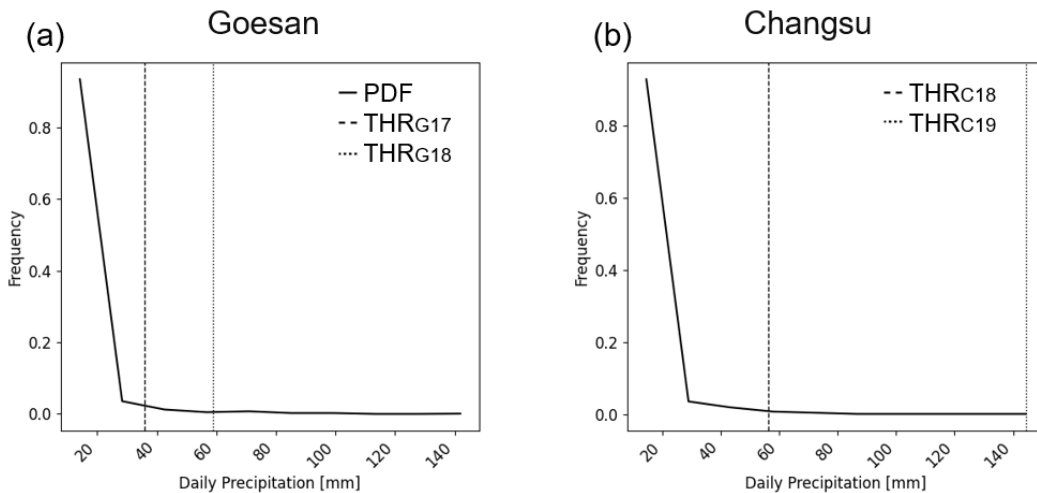


Fig. 3. Thresholds (THR) of each landslide event with probability density function (PDF) of daily precipitation in (a) Goesan (b) Changsu

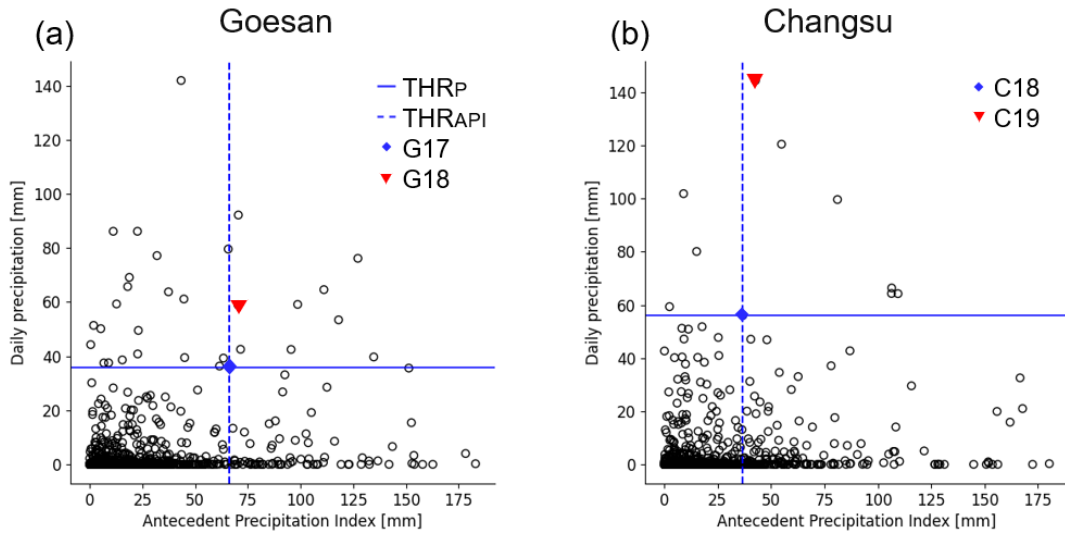


Fig. 4. Precipitation thresholds with each landslide event in (a) Goesan (b) Changsu

단위 자료를 활용했기 때문에, 특정 시점의 일 강수량이 익일 선행 강수지수 자료에 포함되게 된다. 따라서 고강도 강수 사건이 발생했을 때 익일 선행 강수지수 또한 해당 강수 사건의 영향을 받아 높은 값을 가지게 되므로, 일 강수량과 선행 강수지수는 지수형으로 감소하는 개형의 그래프를 나타낸다. 또한 선행 강수지수는 강수가 중단된 이후에도 영향이 지속되어, 일 강수량은 0mm에 가까우나 높은 선행 강수지수 값을 갖는 지점들이 빈번히 나타난다.

두 연구지역에 대해, 앞선 산사태 발생 시점의 일 강수량 (THR_P)과 선행 강수지수(THR_{API})를 기준으로 산사태 발생 가능 영역을 산정하였다. 일 강수량만을 활용할 경우 THR_P 위의 영역이 산사태 발생 가능 영역으로 지정되나, 선행 강수지수를 동시에 활용할 경우 산사태 발생 가능 영역이 상단 우측 영역으로 축소되는 것을 확인할 수 있다. 즉 선행 강수지수를 활용할 경우 상단 좌측 영역에 포함된 FN 지점들을 TN으로 재분류해, FAR을 감소시키고 CSI를 증가시켜 임계값의 정확도가 향상되었다. 괴산읍의 G18과 창수면의 C19가 모두 해당 영역 안에 있어, 두 강수 인자 기반 산사태 임계값이 산사태를 성공적으로 예측했다고 할 수 있다. 그러나 해당 지점 외에도 여전히 산사태가 발생하지 않은 FN 지점들이 다수 분포해 있는 것을 확인할 수 있으며, 이는 추후 산사태 관련 인자를 추가적으로 활용하거나, 기술적 도구를 활용해 분류하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.3 토양수분 기반 산사태 발생 임계값 산정 및 평가

본 절에서는 산사태 발생 시 토양 포화도를 파악하고, 나아가 산사태 발생 임계(THR) 산정에 있어 토양 포화도를 활용하

고자 하였다. Figs. 5(a) and 5(b)는 토양 포화도 인자 별 확률밀도함수를 나타내었다. 두 연구지역의 확률분포는 비슷한 형태를 띠나, 산사태 발생 당시 토양 포화도(THR)는 상이한 것을 확인할 수 있다. 괴산읍의 경우 G17의 토양 포화도가 0.5이며 G18은 비교적 높은 0.9 수준임을 확인할 수 있다. G17 발생 시 토양 포화도의 빈도가 0.15~0.2 인 것으로 보아, 해당 수준은 타 기간에서도 빈번히 발생했음을 알 수 있다. 반면 G18, C18과 C19의 사건 비교적 높은 토양 포화도에서 발생했으며, 빈도 또한 적은 것을 확인할 수 있다.

토양 포화도의 증가와 감소는 강수에 대한 영향을 포함하는 지표이므로, 토양 포화도를 통해 해당 연구지역의 강수 사건을 어느 정도 파악할 수 있다. G17(Fig. 2)을 보면 산사태 발생 전에 연속적인 강수가 발생한 후 약 3일간 무강수 기간이 지속되었는데, 이로 인해 SM_{GLDAS}에는 급한 감소세가 나타난다. 이후 산사태 발생 기간 동안 연속적인 강수가 발생했는데, 강수 강도는 점차 약해지나 토양수분은 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이 같은 현상은 창수면(Fig. 5(b))에서도 나타난다. 창수면에서는 18년 7월, 8월 간 강수가 거의 발생하지 않았다. 이로 인해 8월 초 중순경 SM_{GLDAS}는 0.5 이하로 하락했으나, C18 직전에 발생한 강수로 인해 토양 포화도가 0.5 수준을 회복하였고, 산사태 발생 시점에는 이미 0.8 수준에 육박하였다. 이후 강수 강도가 잦아드는 시점에서 토양 포화도는 최고점에 도달하였으며, 이어지는 무강수 기간에는 점차 줄어드는 모습을 보였다.

토양 포화도의 증감은 강수 강도와 기간에 의해 좌우되며, 두 연구지역 모두 강수 발생 이후 약 1~2일이 경과한 시점까지 상승하게 된다. 이는 토양 포화도가 해당 연구지역의 선행

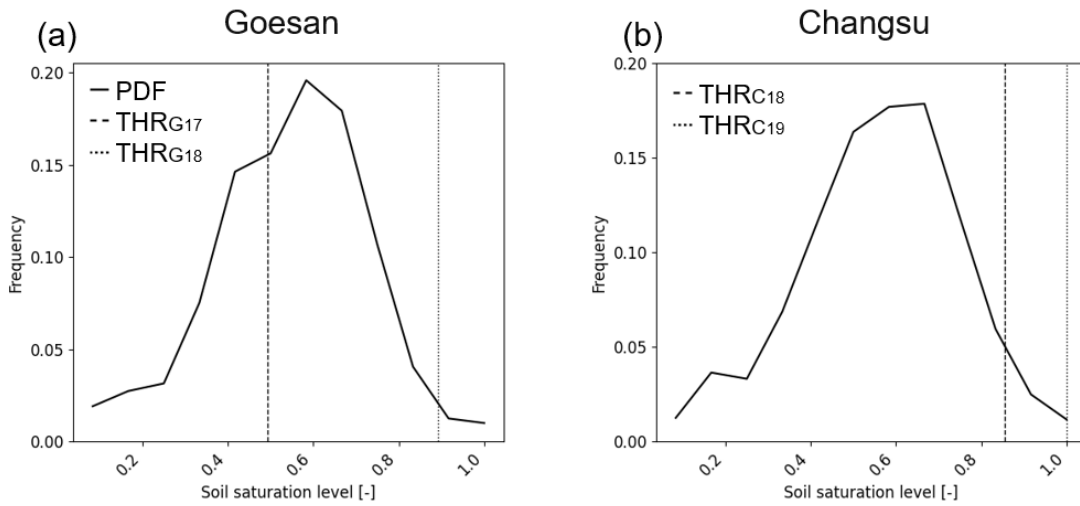


Fig. 5. Thresholds (THR) of each landslide event with probability density function (PDF) of soil saturation level in (a) Goesan (b) Changsu

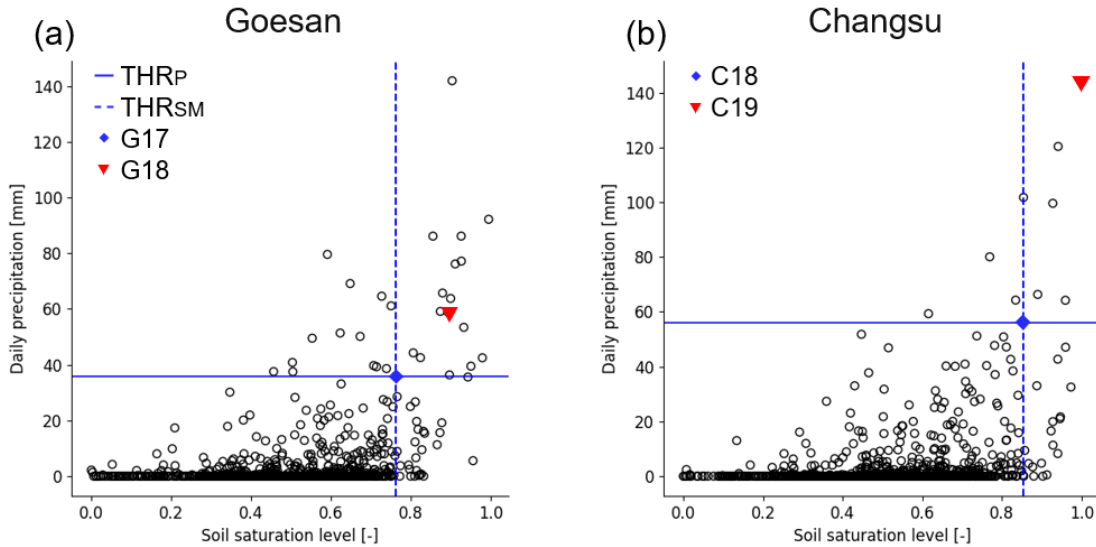


Fig. 6. Hydrological thresholds with each landslide event in (a) Goesan (b) Changsu

조건을 반영하고 있으며, 강우 저항성(rainfall resistance)을 파악하는 데 활용될 수 있음을 시사한다. 강우 저항성이란 토양 포화도에 따라 산정된 산사태 발생 확률을 일컫는다. 동일 강수 강도에 대한 산사태 발생 확률이 토양 포화도에 따라 상이하다는 연구결과는 산사태 발생에 있어 강수와 토양수분의 상호보완적 관계성을 나타낸다(Abraham *et al.*, 2021). 강수 자료를 활용한 연구에서는 해당 연구지역의 선행 조건을 고려하기 위해 선행 강수지수와 같은 인자를 활용한다(Rahimi *et al.*, 2011). 그러나 동일 강수 강도에 대해 토양 포화도의 변동성은 지역 특화성(site-specific)을 지니므로, 연구지역의 선행 조건을 정확하게 반영하기 위해서는 지형 및 환경에 의한 영향을 고려가 필수적임을 시사한다. 토양수분 기반 토양 포화도

는 해당 지역의 식생, 토질, 경사 등 지역적 영향이 반영된 지표로써, 연구지역의 선행 조건 파악에 있어 선행 강수지수보다 직접적인 연관성을 지닐 것으로 기대된다.

Figs. 6(a) and 6(b)에서는 산사태 발생 시점의 토양 포화도와 강수량을 절대적인 기준으로 산사태 발생 임계값을 선정하였고, 두 기준을 충족하는 영역을 산사태 발생 가능 영역으로 결정하였다(Thomas *et al.*, 2019). 강수와 토양수분 인자를 함께 활용하였으며, 수문학적 임계값(Hydrological threshold)라 명칭하였다. 괴산읍의 경우(Fig. 6(a)) G17 발생 당시 조건을 기준으로 산정한 영역에 G18가 위치하고 있다. 즉 이후에 발생한 산사태가 발생 가능 영역 내에 위치하고 있으므로, 산사태를 성공적으로 예측했다고 할 수 있다. 창수면의 경우(Fig.

Table 2. Accuracy assessment of thresholds capability in detecting landslides

Region	Precipitation thresholds				Hydrological thresholds			
	P _{daily}		P _{daily} + API		P _{daily}		P _{daily} + SM _{GLDAS}	
	FAR (%)	CSI (%)	FAR (%)	CSI (%)	FAR (%)	CSI (%)	FAR (%)	CSI (%)
Goesan	96.4	3.6	21.4	78.6 (+75)	96.4	3.6	53.6	46.4 (+42)
Changsu	88.9	11.1	55.6	44.4 (+33)	88.9	11.	44.4	55.6 (+44)

6(b))도 마찬가지로 산사태 발생 가능 영역을 산정하였으며, 산사태를 성공적으로 예측하였다.

Table 2에는 산사태 발생 임계값의 탐지 정확도 평가 결과를 나타내었다. 일 강수량만을 단일 인자로 활용했을 경우 각각 3.6%와 11.1% 수준으로, 산사태 예측에는 성공했으나 비교적 많은 오탐지건을 포함하고 있어 낮은 CSI(높은 FAR)를 보인다. 선행 강수지수를 적용한 경우, CSI는 각각 78.6%와 44.4%로, 이는 기존 임계값 대비 각각 75%, 33% 상승한 수치이다. 한편 토양 포화도를 적용한 경우, CSI는 각각 46.4%와 55.6%로, 기존 임계값 대비 각각 42%, 44% 상승한 수치이다. 괴산읍의 경우 토양 포화도를 적용했을 때 보다 선행 강수지수를 적용했을 때 오탐지율을 큰 폭으로 감소시켰으나, 창수면의 경우 선행 강수지수를 적용했을 때 높은 감소폭을 보였다. 따라서 산사태 발생 임계값 산정에 있어 어떤 변수가 우위에 있다고 판단하기는 어려우나, 두 변수 모두 오탐지율을 효과적으로 감소시켰다는 점에서 의미를 지닌다고 할 수 있다.

추후 보다 많은 산사태 발생 사례를 활용한다면 토양 포화도나 선행 강수지수 외에도 산사태 발생 임계값 산정에 효과적인 인자를 발굴하는 것이 가능할 것으로 보이며, 인자 간 우위 관계 평가를 통해 보다 간단한 형태로 산사태를 예측할 수 있을 것으로 보인다. 또한 토양 포화도를 통해 산사태 발생에 요구되는 강수 강도를 산정하는 연구, 토양 포화도 수준에 따른 강수 저항성을 산정하는 연구 등 기존 강수 기반 임계값에 토양수분 자료를 다각적으로 접목한 연구가 수행된다면 산사태 예측 정확성을 향상시키는 데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 산사태 발생 임계값 산정에 있어 토양수분 활용성을 평가하였다. 강수, 토양수분과 산사태가 갖는 관계성을 파악하기 위해 시간에 따른 변동성을 분석하였고, 이후 각 지역의 앞서 발생한 산사태를 기반으로 산사태 임계값을 산정하였다. 각 임계값을 통해 산사태 발생 가능 영역을 결정하였고, 이를 바탕으로 이후에 발생한 산사태를 예측하였다.

강수 기반 임계값 산정에는 일 강수량과 선행 강수지수를 사용하였으며, 수문학적 임계값 산정에는 일 강수량과 토양수분을 사용하였다. 오탐지율 개선도의 평가를 위해 산사태 분할표를 활용하였고, 다음의 연구결과를 통해 산사태 임계값 산정에 있어 토양수분 활용성을 구체화하였다.

- 1) 고강도 강수는 토양수분을 증가시켜 토양 포화도의 상승을 야기하며, 이는 토양 강도 및 응력의 변화로 이어져 지반 안정성에 영향을 끼친다. 즉 고강도 강수는 산사태로 이어질 수 있으나, 모든 고강도 강수가 산사태를 야기하는 것은 아니다. 따라서 산사태를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 지반 안정성과 밀접한 연관성을 지니는 추가적인 인자가 필요하다.
- 2) 보다 정확한 예측을 위해서는 연구지역의 선행조건을 파악해야 한다. 따라서 강수 기반 임계값 산정에 일 강수량과 선행 강수지수를 활용하여 산사태 발생 시점 이전에 발생했던 강수에 의한 영향을 고려하고자 하였다. 선행 강수지수는 이후에 발생한 산사태를 예측하는 데 성공했으며, 오탐지율을 효과적으로 개선하였다.
- 3) 일 강수량과 토양수분 자료를 사용해 수문학적 임계값을 산정하였으며, 강수 기반 임계값과 마찬가지로 산사태 예측 능력을 평가하였다. 토양수분 또한 선행 강수지수와 마찬가지로 산사태를 예측하는 데 성공했으며, 오탐지율을 효과적으로 개선하였다.
- 4) 괴산읍에서는 강수 기반 임계값이 오탐지율을 개선에 효과적이었으나, 창수면에서는 수문학적 임계값이 보다 효과적이었다. 두 인자 모두 산사태를 예측하는 데 성공했으며 오탐지율을 효과적으로 개선했다는 점에서, 기존의 임계값을 활용하는 것에 비해 보다 효과적인 산사태 예측이 가능할 것으로 판단된다.

산사태에 효과적으로 대응하기 위해서는 체계적인 선행 감시 체계를 구축해야 하며, 피해 저감을 위한 발 빠른 대응이 필수적이다. 이를 위해, 산사태의 위험성을 정량적으로 평가하고, 지반 안정성을 보다 직접적으로 모니터링하기 위해 다

양한 수문기상학적, 지질학적 요소를 고려하여야 한다. 현재 임계값 산정에 활발하게 사용되는 인자인 강수는 타 수문 인자에 비해 자료 획득이 용이하고, 비교적 높은 정확도를 지니며, 특히 지반 안정성을 떨어뜨려 산사태를 유발하는 직관적인 수문기상 요소이다. 그러나 연구지역의 지형 및 환경적인 특성이 상이해 강수 강도에 대한 반응성이 각기 다르게 나타나므로, 지반 안정성을 정량적으로 평가하기에는 한계가 있다. 반면 토양수분은 토심, 토성, 공극수압 등을 비롯한 연구지역의 특성을 내포하고 있는 인자로, 지반 안정성과 직접적인 상관관계가 있다. 본 연구는 토양수분을 함께 사용한 임계값 산정 방법이 기존의 임계값 산정방법에 비해 오탐지율을 크게 개선할 수 있음을 보여줌으로써, 효율적인 산사태 예방 및 대응을 위한 토양수분 자료의 활용성을 검증하였다. 선행 강수 지수, 강우 강도, 기간 및 주기 등 강수 관련 인자들이 산사태 발생 임계값 산정에 활용되는 것과 같은 맥락으로, 토양수분 관련 인자들이 임계값 산정에 적용된다면 산사태를 보다 효과적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 보다 고해상도 자료를 활용함으로써 복잡한 지형에서의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 따라서 후후 연구에서는 산사태 발생 위치의 불확실성과 데이터 처리 시간·비용을 고려한 해상도 선정이 중요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21 사업(4단계 BK21 사업)으로 지원된 연구임. 이 논문은 행정안전부 ‘자연재난 정책연계형 기술개발사업’의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-MOIS35-003). 이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R1A6A3A01087645).

References

- Abraham, M.T., Satyam, N., Rosi, A., Pradhan, B., and Segoni, S. (2021). "Usage of antecedent soil moisture for improving the performance of rainfall thresholds for landslide early warning." *Catena*, Vol. 200, No. 105147.
- Berti, M., Martina, M., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., and Pizziolo, M. (2012). "Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 117, No. F04006.
- Bezak, N., Šraj, M., and Mikoš, M. (2016). "Copula-based IDF curves and empirical rainfall thresholds for flash floods and rainfall-induced landslides." *Journal of Hydrology*, Vol. 541, pp. 272-284.
- Bogaard, T.A., and Greco, R. (2016). "Landslide hydrology: From hydrology to pore pressure." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Vol. 3, No. 3, pp. 439-459.
- Caine, N. (1980). "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows." *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, Vol. 62, No. 1/2, pp. 23-27.
- Conrad, J.L., Morphew, M.D., Baum, R.L., and Mirus, B.B. (2021). "HydroMet: A new code for automated objective optimization of hydrometeorological thresholds for landslide initiation." *Water*, Vol. 13, No. 13.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., and Stark, C.P. (2007). "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe." *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, No. 3, pp. 239-267.
- Heggen, R.J. (2001). "Normalized antecedent precipitation index." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 377-381.
- Hong, M., Kim, J., and Jeong, S. (2018). "Rainfall intensity-duration thresholds for landslide prediction in South Korea by considering the effects of antecedent rainfall." *Landslides*, Vol. 15, No. 3, pp. 523-534.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., and Yoo, S.H. (2015). "NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG)." *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*, NASA, Vol. 4, No. 26.
- Kim, D.-Y., Seo, J.-P., Lee, C.-W., and Woo, C.-S. (2016). "Analysis on the Behaviors of soil water characteristic sensors through rainfall-induced landslide flume experiments." *Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 6, pp. 209-218.
- Kim, S.-W., Chun, K.-W., Kim, M.-S., Kim, M.-S., Kim, J.-H., and Lee, D.-K. (2013). "Rainfall intensity-duration thresholds for the initiation of a shallow landslide in South Korea." *Journal of Korean Society of Forest Science*, Vol. 102, No. 3, pp. 463-466.
- Kohler, M.A., and Linsley, R.K. (1951). *Predicting the runoff from storm rainfall*. US Department of Commerce. Weather Bureau, Washington, DC, U.S.
- Lee, G.-H., Oh, S.-R., Lee, D.-U., and Jung, K.-S. (2012). "Analysis on Mt. Umyeon landslide using infinite slope stability model." *Korea Water Resources Association*, Vol. 5, pp. 737-741.
- Li, C., Ma, T., Zhu, X., and Li, W. (2011). "The power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level." *Geomorphology*, Vol. 130, No. 3/4, pp. 221-229.
- Ma, T., Li, C., Lu, Z., and Wang, B. (2014). "An effective antecedent precipitation model derived from the power-law relationship between landslide occurrence and rainfall level." *Geomorphology*, Vol. 216, pp. 187-192.
- Marino, P., Peres, D.J., Cancelliere, A., Greco, R., and Bogaard, T.A. (2020). "Soil moisture information can improve shallow landslide forecasting using the hydrometeorological threshold approach." *Landslides*, Vol. 17, No. 9.
- Oh, S.-R., and Lee, G.-H. (2014). "Slope stability analysis at catchment scale using spatially-distributed wetness index." *Association*

- of Korean Geographers*, Vol. 3, No. 2, pp. 111-126.
- Pradhan, A.M.S., Kang, H.-S., Lee, J.-S., and Kim, Y.-T. (2019a). "An ensemble landslide hazard model incorporating rainfall threshold for Mt. Umyeon, South Korea." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 1, pp. 131-146.
- Pradhan, A.M.S., Lee, S.-R., and Kim, Y.-T. (2019b). "A shallow slide prediction model combining rainfall threshold warnings and shallow slide susceptibility in Busan, Korea." *Landslides*, Vol. 16, No. 3, pp. 647-659.
- Rahimi, A., Rahardjo, H., and Leong, E.-C. (2011). "Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 137, No. 5, pp. 483-491.
- Rodell, M., Houser, P., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., and Bosilovich, M. (2004). "The global land data assimilation system." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 85, No. 3, pp. 381-394.
- Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H. (2010). "Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity-duration thresholds in Japan." *Geomorphology*, Vol. 118, No. 1/2, pp. 167-175.
- Schulz, W.H., McKenna, J.P., Kibler, J.D., and Biavati, G. (2009). "Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide-evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion?." *Landslides*, Vol. 6, No. 3, pp. 181-190.
- Segoni, S., Piciullo, L., and Gariano, S.L. (2018). "A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence." *Landslides*, Vol. 15, No. 8, pp. 1483-1501.
- Sun, H.Y., Wu, X., Wang, D.F., Liang, X., and Shang, Y.Q. (2019). "Analysis of deformation mechanism of landslide in complex geological conditions." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 78, No. 6, pp. 4311-4323.
- Thomas, M.A., Collins, B.D., and Mirus, B.B. (2019). "Assessing the feasibility of satellite-based thresholds for hydrologically driven landsliding." *Water Resources Research*, Vol. 55, No. 11, pp. 9006-9023.
- Western, A.W., Grayson, R.B., and Blöschl, G. (2002). "Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 30, No. 1, pp. 149-180.
- Wicki, A., Lehmann, P., Hauck, C., Seneviratne, S.I., Waldner, P., and Stähli, M. (2020). "Assessing the potential of soil moisture measurements for regional landslide early warning." *Landslides*, Vol. 17, No. 8, pp. 1881-1896.