

## SWAT model과 기후변화 자료를 이용한 산사태 예측 기법 제안과 평가: 지리산 국립공원 중산리 일대 사례연구

김지수<sup>1</sup> · 김민석<sup>2\*</sup> · 조용찬<sup>2</sup> · 오현주<sup>2</sup> · 이춘오<sup>2</sup>

<sup>1</sup>전남대학교 일반대학원 사범대학 사회교육학과, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질환경연구본부

## Suggestion and Evaluation for Prediction Method of Landslide Occurrence using SWAT Model and Climate Change Data: Case Study of Jungsan-ri Region in Mt. Jiri National Park

Kim Jisu<sup>1</sup> · Kim Minseok<sup>2\*</sup> · Cho Youngchan<sup>2</sup> · Oh Hyunjoo<sup>2</sup> · Lee Choonoh<sup>2</sup>

*Department of Social studies Education, Chonnam National University, Gwangju, Korea*

*Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

### ABSTRACT

The purpose of this study is prediction of landslide occurrence reflecting the subsurface flow characteristics within the soil layer in the future due to climate change in a large scale watershed. To do this, we considered the infinite slope stability theory to evaluate the landslide occurrence with predicted soil moisture content by SWAT model based on monitored data (rainfall-soil moisture-discharge). The correlation between the SWAT model and the monitoring data was performed using the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the model's efficiency index (Nash and Sutcliffe model efficiency;  $NSE$ ) and, an accuracy analysis of landslide prediction was performed using auROC (area under Receiver Operating Curve) analysis. In results comparing with the calculated discharge-soil moisture content by SWAT model vs. actual observation data,  $R^2$  was 0.9 and  $NSE$  was 0.91 in discharge and,  $R^2$  was 0.7 and  $NSE$  was 0.79 in soil moisture, respectively. As a result of performing infinite slope stability analysis in the area where landslides occurred in the past based on simulated data (SWAT analysis result of 0.7~0.8), AuROC showed 0.98, indicating that the suggested prediction method was reasonable. Based on this, as a result of predicting the characteristics of landslide occurrence by 2050 using climate change scenario (RCP 8.5) data, it was calculated that four landslides could occur with a soil moisture content of more than 75% and rainfall over 250 mm/day during simulation. Although this study needs to be evaluated in various regions because of a case study, it was possible to determine the possibility of prediction through modeling of subsurface flow mechanism, one of the most important attributes in landslide occurrence.

**Keywords :** Landslide, SWAT model, Climate change data, subsurface flow, infinite slope theory

### 1. 서 론

최근 기후변화로 인한 기상이변으로 극심한 강우 현상이 찾아지고 있으며, 산사태, 홍수 등과 같은 자연재해도 빈번해지며 국토가 심각하게 훼손되고 있다. 특히 우리나라

라와 같이 국토의 대부분이 산지 지형으로 이루어진 국가들의 경우 산림피복의 변화에 함께 산사태 재해가 가속화될 수 있기 때문에 다양한 분야에서 지속적으로 연구가 수행되고 있다. 토양 침식의 일종인 산사태는 인명 및 재산에 직접적인 피해를 줄 뿐만 아니라, 유사를 급격하게 이동시켜 자연 생태계를 훼손하고 유한자원으로 인식되고 있는 토양자원 보존에 문제를 야기한다. 국내의 경우 산사태 관련 자연 재해는 지속적으로 증가하고 있으며, 역대 최악의 태풍으로 기록된 2006년 루사 이후 2020년까지 약 6,500여 개소에서 산사태가 발생하였으며, 피해면적은 5,600 ha가 넘는다고(Korean statistical information

주저자: 김지수, 박사과정생

공저자: 조용찬, 책임연구원; 오현주, 책임연구원, 이춘오, 연구원

\*교신저자: 김민석, 선임연구원

E-mail: minseok\_kim@kigam.re.kr

Received : 2021.12.01 Reviewed : 2021.12.02

Accepted : 2021.12.14 Discussion until : 2022.02.28

service). 이와 더불어 산지에서의 태양광 시설, 고랭지 농업의 확대, 귀농으로 인한 국토의 개발행위 등으로 인해 산사태 피해가 지속적으로 증가할 수 있다는 보고가 나오고 있어, 다양한 연구를 기반으로 산사태 피해를 저감하고 대책을 마련하고자 하는 노력이 진행되고 있다.

일반적으로 강우에서 기인하는 산사태는 강우가 토양층 내로 침투하여 기반암 근처에서 습윤대가 임계 깊이에 도달하여 발생하는 경우와, 강우가 지표 내로 침투하여 지하수의 상승에 의해 기반암 위 토양의 유효응력 감소로 인해 산사태가 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다 (Kim et al., 1994; Jeong et al., 2009). 즉 산사태의 발생은 토양층 내 포화도의 변화와 깊은 연관이 있음을 추정할 수 있다. 이런 메커니즘을 반영하여, 다양한 산사태 연구에서 무한사면안정성공식과 간단한 지표하수분식 이 결합된 물리학 모형에 대한 관심이 집중되고 있으며, 많은 연구자들이 이에 대한 정확성을 향상시키기 위해 TRIGRS, SHALSTAB, SINMAP과 같은 다양한 모델을 개발하고 평가하고 있다.

산사태를 해석하기 위해서는 다양한 변수들이 필요하고, 특히 이의 해석을 위해서는 정확한 토양수분 등을 확인할 수 있는 관측 자료가 필요하다. 위에서 설명한 바와 같이 강우에 반응하는 토양 내 토양수분량의 이동에 대한 신뢰성을 판단하기 위해서는 실제 모니터링 자료를 이용하는 것이 가장 이상적이다. 따라서 다양한 지질학적, 지형학적 조사를 통해 지표를 구성하고 있는 정확한 토양정보를 구해야 하지만, 광역적인 지역을 대상으로는 비용과 인력의 부족으로 정확한 정보를 획득하기는 쉽지 않다. 국내에서도 산지사면을 포함하는 유역 전반의 토양수분을 실측하는 경우는 없기 때문에 유역의 전반적인 토양수분은 실측 자료 대신 모의를 통한 토양수분 자료를 이용할 수밖에 없다. 그러므로 한정된 입력 자료를 이용한 합리적인 실험 및 모의와 한정된 자료로부터 어떻게 추가적인 공간 데이터를 구축할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

이와 더불어, 최근 탄소중립 등 다양한 측면에서 기후변화자료의 활용성에 대한 관심이 높아지고 있으며, 기후변화자료를 활용한 미래예측이 인간의 생활 등에 긍정적인 영향을 줄 것으로 많은 연구자들이 판단하고 있다. 자연재해 분야에서도 관련 연구가 진행 중이지만, 현재까지 기후변화 자료를 이용하여 장기적인 산사태 평가를 위한 연구는 미흡하다. 즉, 기후변화 시나리오를 이용하여 추후 발생할 수 있는 산사태 재해 등에 대한 대책 자료를 생성할 수 있는 기법이 필요하다. RCP 기후변화시나리오를 이용한 수질 혹은 수문현상에 대한 연구는 SWAT model

을 통해 한정적으로 진행되고 있으며(Joh et al., 2010), 설마천 유역을 대상으로 토양 내의 함수율의 변화(Hong et al., 2010)에 대한 연구가 미흡하게나마 진행되고 있지만, 모니터링 자료의 부족으로 한계성을 지니고 있는 것이 사실이다.

그러므로 본 연구의 목적은 1) SWAT model과 실제 자연사면에서 측정된 지표하 흐름 중 함수율을 기반으로 산사태의 발생 예측의 정확성을 판별 후 2) 이산화탄소의 증가를 반영한 RCP 8.5 기후변화자료를 이용하여 미래의 산사태 예측의 가능성 여부를 판별하는 기법을 제안하는데 있다. 이를 위해 실제 모니터링 자료(2015년 1월 1일부터 2020년 12월까지)와 SWAT model의 비교평가를 통해 검보정하여 매개변수 산정 후 과거 산사태가 발생한 시점을 대상으로 토양 내 함수저류량과의 관계를 살펴본다. 이후, 마찬가지로 검보정자료가 반영된 매개변수와 RCP 8.5기반의 2050년까지의 기후변화 시나리오를 이용하여 토양 내 함수저류량을 계산 후 사면 안정성공식의 입력 변수로 활용하여 이에 대한 정확성 평가를 수행하였다.

## 2. 연구지역

연구 지역은 경상남도 산청군 시천면 중산리에 위치하고 있으며, 연구 유역 내에 위치하고 있는 유출구 지점은 중산리 내 법계교(35°18'20.33"N, 127°44'53.55"E)이다. 연구 지역의 총 유역 면적은 약 6.9 km<sup>2</sup>이며, 연구지역의 지질분포는 화강암질편마암, 반상변정질 편마암, 혼성편마암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 기반암 위를 덮고 있는 토양은 자갈이 있는 사양토이며 대부분 송산통에 속한다(Korean Soil Information System). 유역 내 고도가 높은 북쪽 지역은 침엽수와 혼효림이 자라고 있으며, 일부경사가 급한 곳은 토양이 유실되어 기반암이 노출되어 있다. 이외의 대부분의 지역은 활엽수림이 분포한다(Forest Geospatial Information Services). 연구지역의 상부로 천왕봉(1,915 m), 제석봉(1,808 m), 연하봉(1,723 m)을 경계로 분기한 물은 남동쪽 방향의 법계교 아래로 흘러 남강의 지류인 시천천과 합류한다.

연구 지역이 속한 산청군의 지난 30년 간의 기상청 기후평년 값(1991~2020)은 연평균기온 13.0도, 최단월인 8월의 최고기온은 19.3도, 최한월인 1월의 최저기온은 -4.4도이다. 연평균 강수량은 1556.2 mm이며, 8월에 가장 많은 강수량(362.3 mm)이 기록되었으며, 연평균 풍속은 1.7 m/sec, 연평균 습도는 62.0%이다(KMA Weather Data Service). Fig. 2는 연구지역 주변의 강우사상을 나타낸

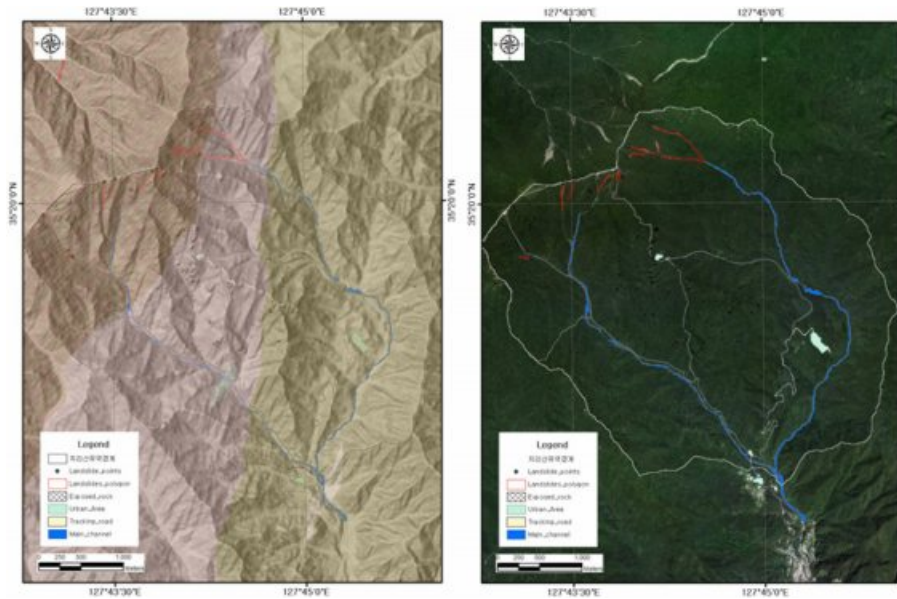


Fig. 1. Geologic map and aerial photography of study area.

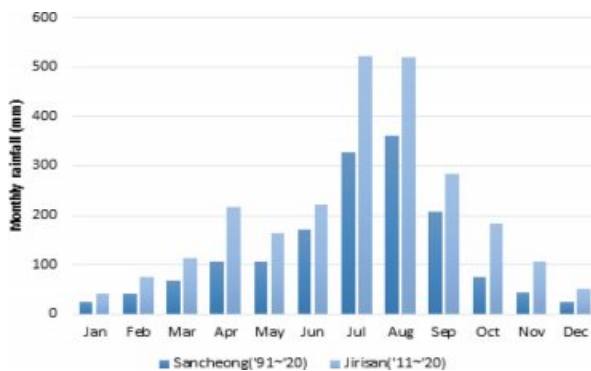


Fig. 2. Monthly rainfall of study area.

그림이며, 7월부터 8월에 강우가 집중되어 있는 것이 특징이다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. SWAT(Soil&Water Assessment Tools) model

SWAT model은 미국의 USDA에서 개발된 프로세스 기반의 준분포형 수문모형이며, 전 세계적으로 광범위하게 이용되고 있다. SWAT model은 장기간에 걸친 증발산량, 토양수분 및 유출량을 모의하고 각 수문성분에 관련된 변수의 조절을 통해 모형의 모의 결과를 향상시키기 위하여 미국농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발되었다.

SWAT 모형은 물수지 방정식에 근거를 두고 강수량, 증

발산량, 지표유출량, 기저유출량, 지하수, 토양수분 등에 변화에 대한 모의를 각 수문반응단위(HRUs, Hydrologic Response Units) 별로 계산 할 수 있다(Arnold et al., 1998). SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 다음과 같다(Neitsch et al., 2011).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - W_{seep} - E_a - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서,  $SW_t$ 는 최종 토양수분량( $\text{mmH}_2\text{O}$ ),  $SW_0$ 는  $t$ 일의 초기 토양수분량( $\text{mmH}_2\text{O}$ ),  $t$ 는 시간(일),  $R_{day}$ 는  $t$ 일의 강수량( $\text{mm}$ ),  $Q_{surf}$ 는  $t$ 일의 지표유출량( $\text{mm}$ ),  $E_a$ 는  $t$ 일의 증발산량( $\text{mm}$ ),  $W_{seep}$ 는  $t$ 일의 토양표면으로 부터 중력방향의 토양층으로 투수되는 총량( $\text{mmH}_2\text{O}$ )이며,  $Q_{gw}$ 는  $t$ 일 번째에서의 회귀수량( $\text{mm H}_2\text{O}$ )이다.

토양내 물의 흐름은 수리전도도, 사면경사, 토양수분량에 관한 동적모형(Kinematic storage model)으로 계산되며, 해당 모형은 다음과 같다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,ex} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (2)$$

여기서,  $Q_{lat}$ 는 사면유출구의 유량( $\text{mm}$ )이고,  $SW_{ly,ex}$ 는 토양수의 배수량( $\text{mm}$ ),  $K_{sat}$ 는 포화수리전도도( $\text{mm/h}$ ),  $slp$ 는 사면경사( $\text{m/m}$ ),  $\phi_d$ 는 배수성 공극( $\text{mm/mm}$ ),  $L_{hill}$ 는 사면길이( $\text{m}$ )이다.

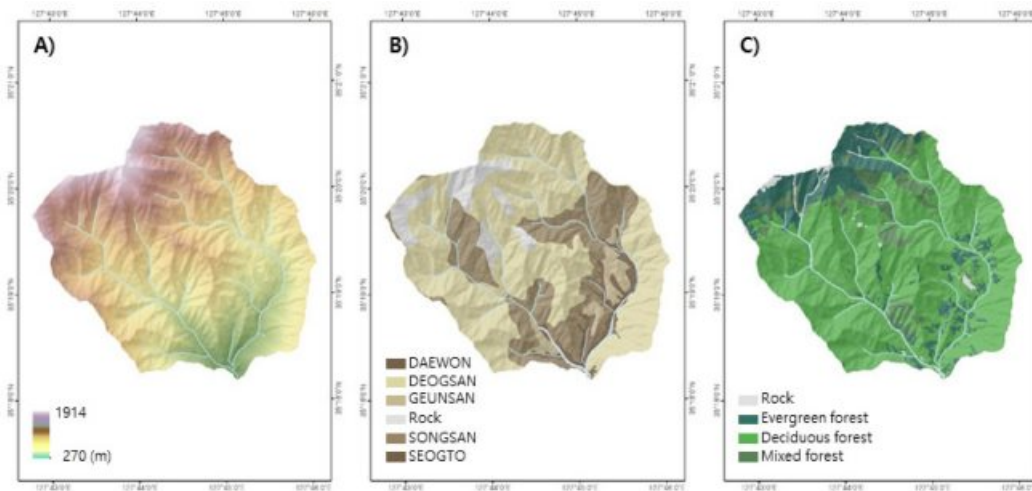


Fig. 3. Modelling data (Here, A) DEM; B) Soil map; C) Landcover map).

### 3.2. SWAT model의 입력 자료

모형에는 기상, 지형, 토양, 토지이용과 관련된 입력 자료가 필요하기 때문에, 국내 공공기관에서 제공하는 자료와 문헌 자료를 참고하여 입력 자료를 구축하였다. 측정된 강우 외 필요한 기상 자료는 기상청에서 제공하는 중관기상관측 자료와 방재기상관측 자료로 구축하였다. 지형 자료는 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지도의 등고선 자료를 기반으로, ArcGIS 10.4의 Topo to raster 기능을 이용하여 10 m 격자 크기 해상도를 가지는 수치표고모델(DEM)로 구축하였다. 토양 자료는 산림청에서 제공하는 1:5,000 산림입지 토양도를 기반으로, 국립농업과학원 흙토람(Korean Soil Information System)과 한국건설기술연구원(Korea Institute of Construction Technology, 2007)에서 제공하는 매개변수 값을 입력하여 구축하였다. 토지이용 자료는 산림청에서 제공하는 1:5,000 입상도를 기반으로, SWAT model의 입력자료를 구축하였다.

### 3.3. 매개변수 추정과 모형의 예측 정확성 평가

매개변수 추정에 있어 분석하고자 하는 전체 유역에 대해 실제 자연현상을 대표(모델링에 필요한 모든 요소)할 수 있는 모든 자료를 구하는 것이 거의 불가능하기 때문에 SWAT model을 이용한 모의에 실제 관측결과와 예측 결과를 이용한 매개변수의 추정이 추가적으로 필요하다. 이를 위해 다양한 연구자들에 의해 제안되어지고 개발된 SWAT-CUP은 여러 매개변수를 정해진 범위 내에서 무작위 값으로 여러 번 반복할 수 있어 매개변수를 추정하는데 매우 효율적인 것으로 알려져 있다(Abbaspour, 2013), 따라서 본 연구에서는 SWAT model의 불확실한 매개변수

의 합리적인 값을 추정하기 위해 SWAT-CUP 5.1.6.2의 SUFI-2 알고리즘을 사용하였으며, 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ 과, Nash and Sutcliffe(1970)이 제안한 모형효율기법(model efficient,  $NSE$ )을 활용하여 모형의 성능을 평가하였다. Moriasi et al.(2015)와 Chen et al. (2017) 등에 의하면  $R^2$ 은 모의 결과와 실측 결과의 상관관계가 높아질수록 1에 가까워지고,  $NSE$ 는 모의 결과가 실측 결과가 일치할수록 1에 가까워지는 것으로 제안하였으며, 전 세계적으로 이를 이용하고 있다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})^2}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{식 (4)}$$

여기서,  $O_i$ 는 개별 실측 값이고,  $\bar{O}$ 는 실측된 모든 값의 평균이다.  $P_i$ 는 개별 모의 값이고,  $\bar{P}$ 는 모의된 모든 값의 평균이다. 매개변수는 SWAT 매뉴얼(Neitsch et al., 2011)에 제시되어 있는 모든 매개변수를 이용하여 민감도 분석을 통한 매개변수를 보정 하였으며, Table 2에 정리하였다.

### 3.4. 산사태 해석을 위한 무한 사면 안정성식의 적용과 정확성 분석기법

지형학적인 특성과 토양 특성을 반영하여 사면의 불안정성을 해석하기 위해 사면안정성공식이 사용된다. 이 개념은 기반암면과 토양 내에서의 흐름(seepage 등)은 기반암면과 평행하게 움직이는 것을 가정(Fig. 3)하고 있으며, 움직이려는 힘(driving force)과 움직이지 않으려는 힘(resistance force)에 대한 비율이며, 일반적인 무한사면 안정성 공식의 경우  $F_s=1$ 을 기준으로 1이하이면 불안정 1이상일 때 안정을 가정으로 계산을 한다(Zizioli et al., 2013). 본 연구에서 사용한 무한사면 안정성 식은 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_{sat} \cdot H \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \beta} + \frac{\gamma' \cdot \tan \phi'}{\gamma_{sat} \cdot \tan \beta} \quad (5)$$

여기서,  $F_s$ 는 안전율( $F_s > 1$  안정,  $F_s < 1$  이하 불안정)을 의미하며,  $c'$ 는 점착력(토양점착력과 뿌리점착력의 관계),  $H$ 는 토양 내 흐름 깊이.  $\phi'$ 는 내부마찰각,  $\gamma_{sat}$ 는 토양의 포화단위중량,  $\gamma'$ 는 흙의 유효단위중량 그리고  $\beta$ 는 사면의 경사각이다. 본 연구에선 위의  $F_s$ 식의  $H$ 를 SWAT 모델에서 계산된 토양수의 변화 자료를 이용하여 단위유역에서 계산된 값을 이용하여 분석에 사용하였다.

과거자료를 이용한 정확성 분석은 모형의 활용 및 장기간의 예측 정확성을 판별하기 위해서 매우 중요하다. 많은 연구분야에서, ROC(Receiver Operating Characteristic) 곡선을 이용한 분석과 이를 통한 AuROC(Area under Receiver Operating Characteristic)의 분석을 통해 정확성을 판별하는 기법을 이용하고 있다. ROC는 Confusion matrix를 이용한다. TP(True Positive)는 실제 예측결과와 발생지점이 동일한 부분, FP(False Positive)는 발생하지 않은 부분에서 발생한 지역, FN(False Negative)은 안정한 지역으로 분석된 지역에서 실제 발생한 경우, TN(True Negative)은 안정하게 계산된 지역 내에서 실제로 산사태가 발생하지 않은 경우를 각각 나타낸다. 자세한 ROC 곡선에 대한 기법 설명은 Fawcett(2006)에서 찾아볼 수 있다.

이를 통한 ROC 분석 후 곡선이 위치한 부분에 대한 면적을 계산한 AuROC는 수치에 따라 그 값의 분포가 비정보적( $AUC=0.5$ ), 보통( $0.5 < AUC \leq 0.7$ ), 정확( $0.7 < AUC \leq 0.9$ ), 매우 정확( $0.9 < AUC < 1$ ) 그리고 완벽( $AUC=1$ )로 분류하고 있으며, 다양한 분야에서 정확성 분석을 위해 이용하고 있다. 하지만, Cut-off value(검사치의 유용성과 관련된 기준치)에 의해 정확성에 많은 영향을 미치고 있기 때문에 이의 값에 대한 설정이 중요하며, 본 연구에서는  $F_s=1$ 을 기준으로 1 이하의 값을 갖는 유역 내 정보를 통해 이의 정확성을 분석하였다.

### 3.5. 현장 모니터링

연구지역 내 강우에 의한 유출량, 토양수분압, 그리고 함수율을 모니터링하기 위해 티핑버킷식 강우계와 도플러식 수위계, 전파식유속계, 공극수압계, 함수율계 등을 중산리 연구지역내에 설치하였다(Table 1). 유출구 지점의 강우와 수위는 10분 간격으로 측정되었으며, 본 연구에서는 2018년 10월부터 2020년 12월까지의 자료를 사용하였다. 측정된 강우는 일강우량으로 환산하였고, 측정된 수위는 유속과의 관계를 통해 일평균 유량으로 변환하여 수위-유량 관계곡선식을 만들었으며, 자료가 부족했던 유속 부분(태풍으로 인한 파손)은 Francis formula를 사용하여 수위자료와 기존 모니터링을 통해 계산한 수위-유량 관계곡선식과의 검증을 통해 일평균 유출량으로 환산하여 분석하였다.

### 3.6. RCP 기후변화 시나리오

RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오는 최근 전 세계적으로 문제가 되고 있는 온실가스 농도 변화양상을 반영한 자료로서, 복사강제력( $W/m^2$ )을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 그리고 8.5로 구분한다. 기상청에서 제공하는 RCP 시나리오는 다양한 GCM(General Circulation Model) 모델 중 HadGEM2-AO(Hadley Centre Global Environmental Model version2 - Atmosphere Ocean)을 기반으로 하고 있다. 이는 135 km 해상도의 전 지구 기후변화 시나리오이며, 이를 한반도에 적용하기 위

Table 1. List of monitoring parameter

Parameter	Device	Location
Rainfall	WDR-205 (Korea)	35°19'22.8"N, 127°45'18.0"E
Flow level	OTTRLS (Germany)	
Flow velocity	AA02RF (Japan)	
Matric suction	MPS 6 (USA)	35°18'21.6"N, 127°44'52.8"E
Water content	EC5 (USA)	



해 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 통해 파일로 제공하고 있다. 여기서, 가장 주목해야 할 시나리오는 RCP 4.5와 8.5로서 RCP 4.5는 온실가스 저감 정책을 고려하여 계획대로 상당히 실현되는 경우이며, RCP 8.5는 이와는 반대로 온실가스의 저감 없이 가스가 배출되는 경우로 보고하고 있다(KMA Climate information portal). 이 두 개의 시나리오에 대한 접근을 위해 최근의 연구동향을 살펴본 결과, Kim and Kim(2017)에 의하면, 미래기간별 연평균 강수량의 경우 RCP 4.5에서는 21세기 중반(2040s~2080s)에 현재보다 증가하는 추세를 보이나 총 평균값은 현재 실측값과 비교하여 변화가 거의 없는 것(0.1% 차이)으로 나타났으며, RCP 8.5에서는 계속적으로 증가하는 추세를 나타내어 현재대비 평균 13%(약 250 mm) 정도 증가하는 것으로 예측되는 것으로 보고하고 있고, 이들의 연구에서 RCP 8.5가 현재와 비슷한 차이를 보이고 있다고 보고하고 있다. 또한, Jang and Kim(2017)을 보면, 전반적으로 CO<sub>2</sub> 농도가 높은 RCP 8.5 시나리오에서 기온이 더 큰 변화를 보였으며, 먼 미래로 갈수록 강수량과 기온의 변화가 더 큰 경향을 나타낼 것으로 예측된다고 보고하고 있다. 그러므로 기후변화 가상 시나리오의 반영을 통한 예측연구에 있어, RCP 8.5가 더욱 합리적일 것으로 판단되어 기상청의 RCP 8.5 시나리오에 대한 강수량, 최고기온, 최저기온, 풍속 그리고 습도 자료(1979~2100년) 등을 이용하여 데이터를 구축하였다.

## 4. 결 과

### 4.1. SWAT 모델을 이용한 매개변수 추정과 산사태 입력 자료 선정

SWAT 모델의 안정성을 위해 초기 2010년부터 2011년 2년간은 모형의 안정화기간으로 제외시켰으며, 2012년부터 2020년 12월까지 모델링을 수행하였다. 이때 2019년부터 2020년도의 자료는 실측자료(강수량, 유량 등)가 존재하기 때문에 모형의 매개변수 추정을 위한 기간으로 설정하였으며 여기서 검보정된 매개변수를 기준으로 2012년부터 2020년까지 다시 재해석을 실시하였다. Table 2는 본 연구에서 이용된 매개변수의 리스트와 그 분포를 나타낸 것이다. SWAT-CUP으로 매개변수를 달리하여 1,000번 반복한 최적의 모의 결과는 Fig. 5와 같으며, 보정된 모의 유출량과 관측한 유출량 간의 정확성 평가를 수행한 결과  $R^2$ 는 0.80,  $NSE$ 는 0.79로 나타났다.

Fig. 6는 연구지역에서 2015년부터 관측하고 있는 토양 수분자료와 SWAT 모델을 이용하여 분석한 자료를 중첩시킨 그림이다. Fig. 5와 마찬가지로  $R^2$ 와  $NSE$ 를 기반으로 분석을 실시하였다. 여기서 중요한 점은 일반적으로 급격한 표토훼손을 발생시킬 수 있는 강우의 경우 선행 강우조건에 따라 차이가 발생 할 수 있지만 일반적으로 일단위로 환산하면 100 mm/day 이상으로 보고되고 있기 때문에 모델링과 실측값의 경우 100 mm/day 이상 부분만을

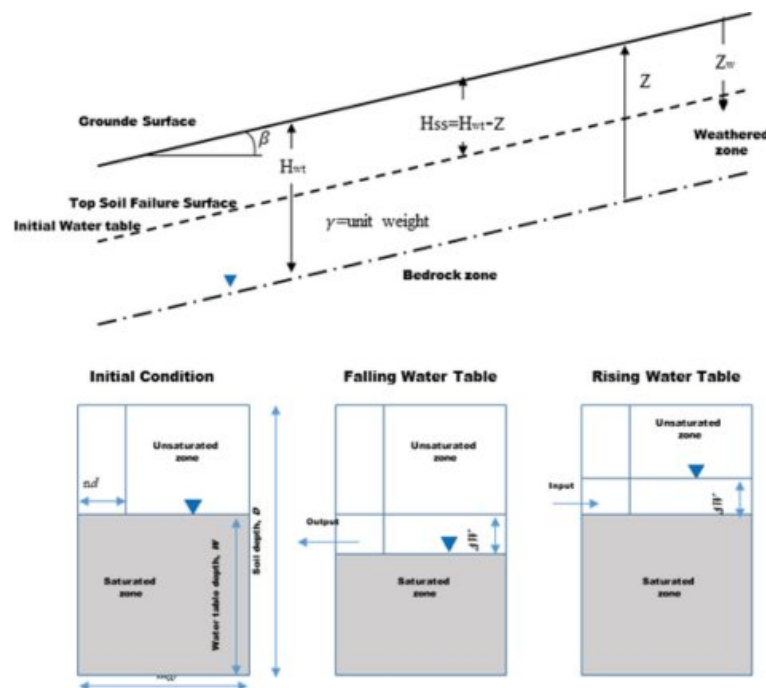
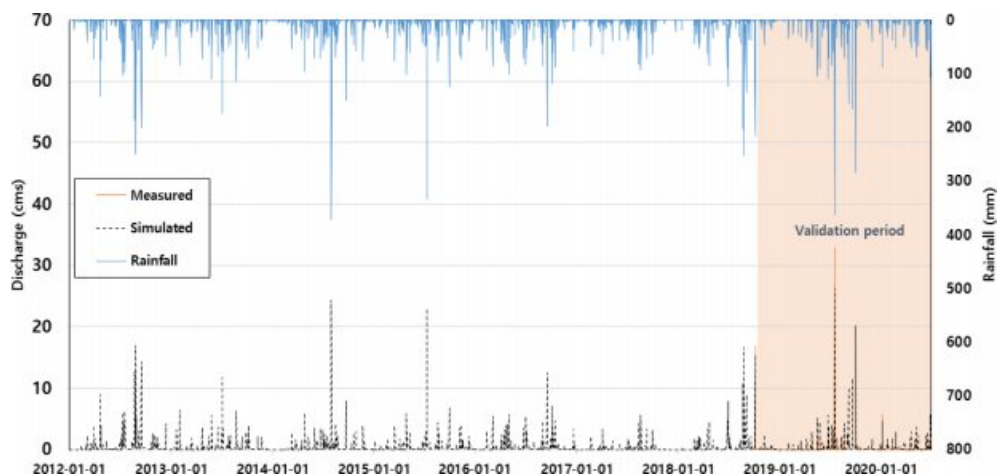


Fig. 4. Concept of infinite slope theory and subsurface flow (Das and Sobhan, 2013; Troch et al., 2002).

**Table 2.** Parameters of SWAT model and ranges of values

Parameter	Method	Description	Min	Max	t-Stat	P-Value	Rank
CH_K2.rte	replace	Main channel effective hydraulic conductivity	-0.01	500	30.88	0.00	1
CH_D.rte	relative	Main channel depth	-0.9	9	-10.82	0.00	2
CH_N2.rte	replace	Main channel manning's "n" value	-0.01	0.3	9.62	0.00	3
DEP_IMP.hru	replace	Depth to impervious layer in soil profile	0	6000	8.62	0.00	4
CH_W2.rte	relative	Main channel average width	-0.9	9	7.28	0.00	5
TRNSRCH.bsn	replace	Main channel transmission losses	0	1	7.04	0.00	6
ALPHA_BNK.rte	replace	Baseflow alpha factor	0	1	-5.31	0.00	7
SOL_K.sol	relative	Saturated hydraulic conductivity	-0.99	9	-3.36	0.00	8
GW_SPYLD.gw	replace	Specific yield of the shallow aquifer	0	0.4	2.66	0.01	9
RCHRG_DP.gw	replace	Deep aquifer percolation fraction	0	1	2.42	0.02	10
SURLAG.bsn	replace	Surface runoff lag coefficient	0.05	24	2.28	0.02	11
GW_REVAP.gw	replace	Groundwater revap coefficient	0.02	0.2	2.22	0.03	12
GW_DELAY.gw	replace	Groundwater delay time	0	500	-1.97	0.05	13
CNCOEF.bsn	replace	Plant ET curve number coefficient	0.5	2	1.80	0.07	14
CN2.mgt	relative	SCS runoff curve number	-0.5	0.5	-1.72	0.09	15
GWQMN.gw	replace	Threshold depth of water in the shallow aquifer	0	5000	1.30	0.19	16
ESCO.hru	replace	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.95	0.34	17
REVAPMN.gw	replace	Threshold depth of water in the shallow aquifer	0	500	0.74	0.46	18
TDRAIN.mgt	replace	Time to drain soil to field capacity	0	72	0.72	0.47	19
CH_N1.sub	replace	Tributary channels manning's n value	-0.01	0.3	0.69	0.49	20
MSK_CO2.bsn	replace	Reach storage calibration coefficient	0	10	0.61	0.54	21
EVRCH.bsn	replace	Reach evaporation adjustment factor	0.5	1	-0.54	0.59	22
GDRAIN.mgt	replace	Drain tile lag time	0	100	0.42	0.68	23
MSK_CO1.bsn	replace	Reach storage calibration coefficient	0	10	-0.39	0.70	24
ALPHA_BF.gw	replace	Baseflow alpha factor	0	1	-0.36	0.72	25
CANMX.hru	replace	Maximum canopy storage	0	100	0.31	0.76	26
ESCO.bsn	replace	Soil evaporation compensation factor	0	1	0.29	0.77	27
SOL_AWC.sol	relative	Soil layer available water capacity	-0.99	9	-0.29	0.77	28
MSK_X.bsn	replace	Reach storage weighting factor	0	0.3	-0.20	0.84	29
EPCO.bsn	replace	Plant uptake compensation factor	0	1	-0.17	0.86	30
DEPIMP_BSN.bsn	replace	Depth to impervious layer in soil profile	0	6000	-0.10	0.92	31
EPCO.hru	replace	Plant uptake compensation factor	0	1	0.09	0.93	32
OV_N.hru	replace	Overland flow manning's n value	0.01	1	-0.06	0.95	33

**Fig. 5.** Relationship between daily rainfall and discharge results using SWAT model.

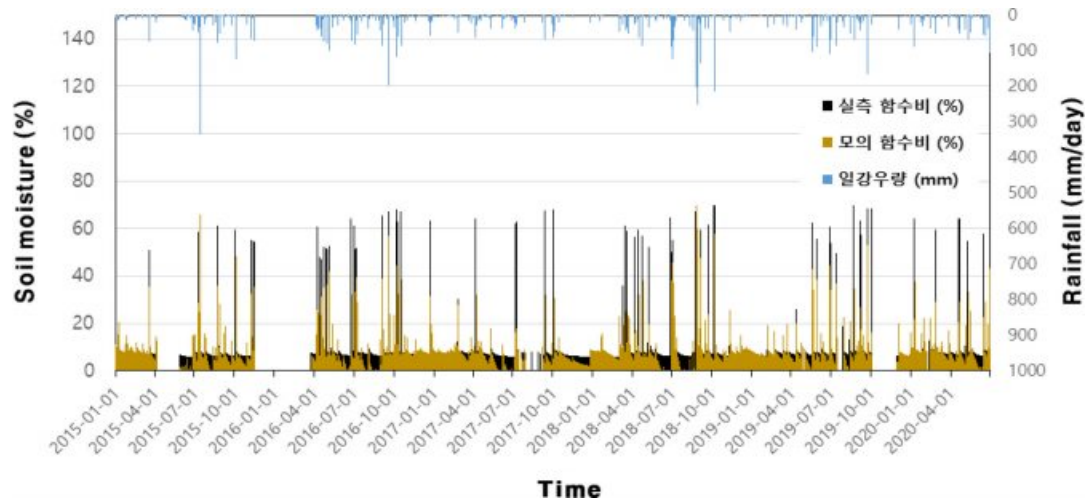


Fig. 6. Relationship between daily rainfall and soil moisture results using SWAT model.

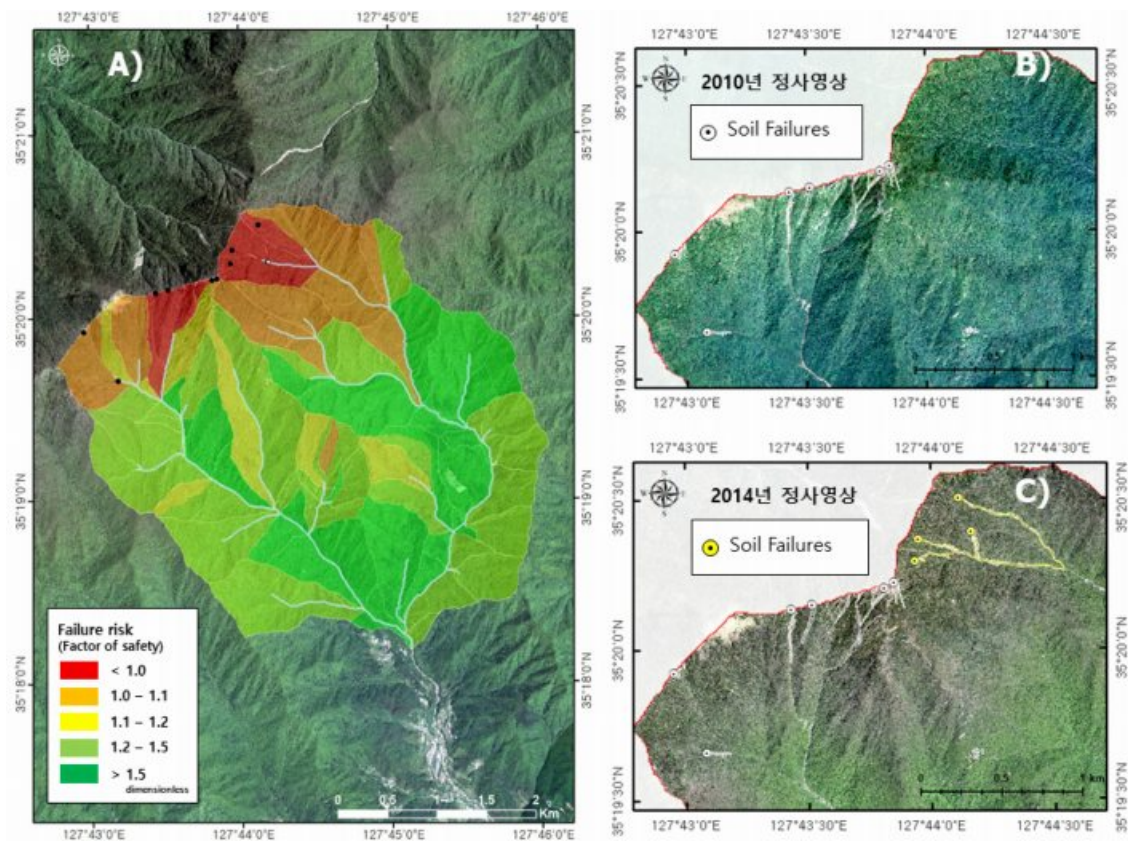


Fig. 7. Assessment of soil failure prediction result (A) Landslide prediction map B) airphoto imagery before landslide occurrence, C) Airphoto imagery after landslide occurrence).

고려하여  $R^2$ 과  $NSE$ 분석에 이용하였으며,  $R^2$ 의 경우 0.78,  $NSE$ 의 경우 0.72로 나타나 Moriassi et al.(2015)와 Chen et al.(2017) 등이 제안한 정확성 범위에 분포하고 있어 자료를 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4.2. 과거 산사태 발생 자료를 이용한 적용성 평가

Fig. 7은 식 (5)의 H에 SWAT 모델의 강우-함수량에 따른 변화를 반영하여 계산한 그림으로 연구지역의 유출구를 기준으로 한 유역과 산사태가 발생할 수 있는 FS 1



이하의 사면에 대한 분포를 나타낸 그림이다. 2010년과 2014년 항공사진은 과거 연구지역 내에서 발생한 산사태의 사진을 나타낸 것으로 무한사면안정성식 식 (5)에 입력하여 계산한 결과 실제 산사태가 발생한 시점과 일치하는 것으로 나타났다. 이의 정확성 평가를 위해 AuROC (Area under Receiver Operating Curve) 분석 결과, 유역

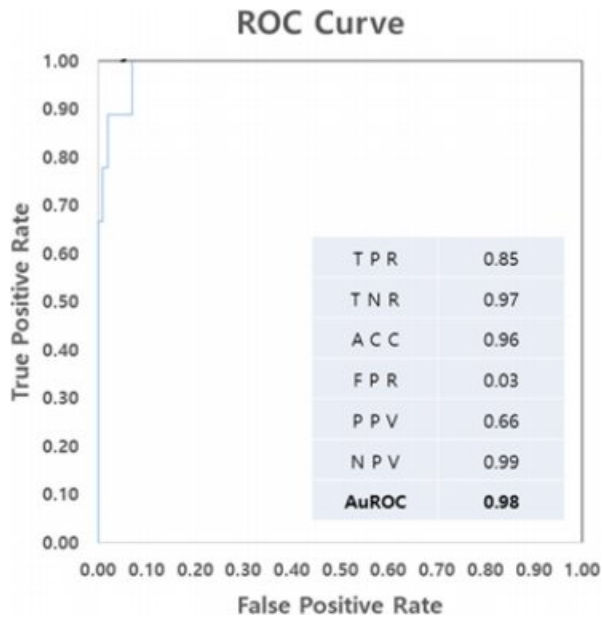


Fig. 8. Assessment of soil failure prediction result.

을 대표사면으로 분할하여 평가한 경우 약 0.98로 그 정확성이 계산되어 함수량과의 관계를 통해 산사태를 해석할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 8).

#### 4.3. RCP 8.5를 이용한 미래 산사태 발생의 적용성 평가

Fig. 9은 기후변화 시나리오를 이용하여 연구지역에서의 급변적 토양층 붕괴를 예측한 결과이다. 왼쪽의 항공사진은 유역과 각 사면의 번호를 보여주며, 오른쪽 위 그래프는 기후변화 자료와 SWAT model을 이용하여 2050년까지의 각 사면의 함수율 결과를 나타낸 그림이다. 그 아래의 그래프는 함수율을 반영하여 강우에 따른 토양 내 흐름 변화가 산사태를 발생 시킬 수 있는 가능성을 무한사면안정성식을 이용하여 사면안정계수로 계산한 결과이다. 기후변화 자료를 이용한 함수율의 경우 대략적으로 일강우 300 mm 이상이 발생했을 경우, 그 분포범위가 70%~80%로 나타났다. 이에 따라 산사태의 발생여부를 판별할 수 있는 임계치인  $F_s$  1 이하의 값을 통해 특히 지리산의 상부지역인 제석봉, 천왕봉 등이 위치한 유역에서 위험성이 높은 것으로 나타났다. 앞서 산사태 위험 사면으로 판단된 1-1, 1-2, 2-1, 12-1에서 향후 30여 년간 약 3~4번의 산사태가 더 발생할 수 있으며, 2-2, 3-2, 5-1, 5-2, 10-1, 10-2 사면에서도 산사태가 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

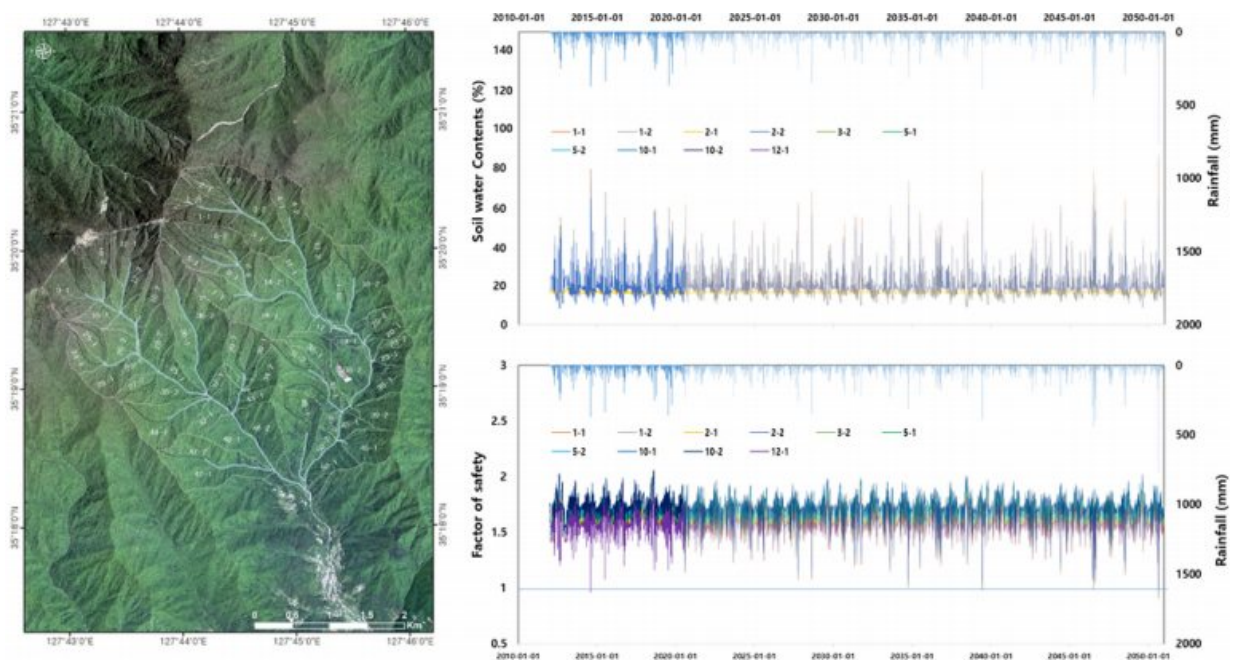


Fig. 9. Soil failure result by climate change scenario (RCP 8.5).

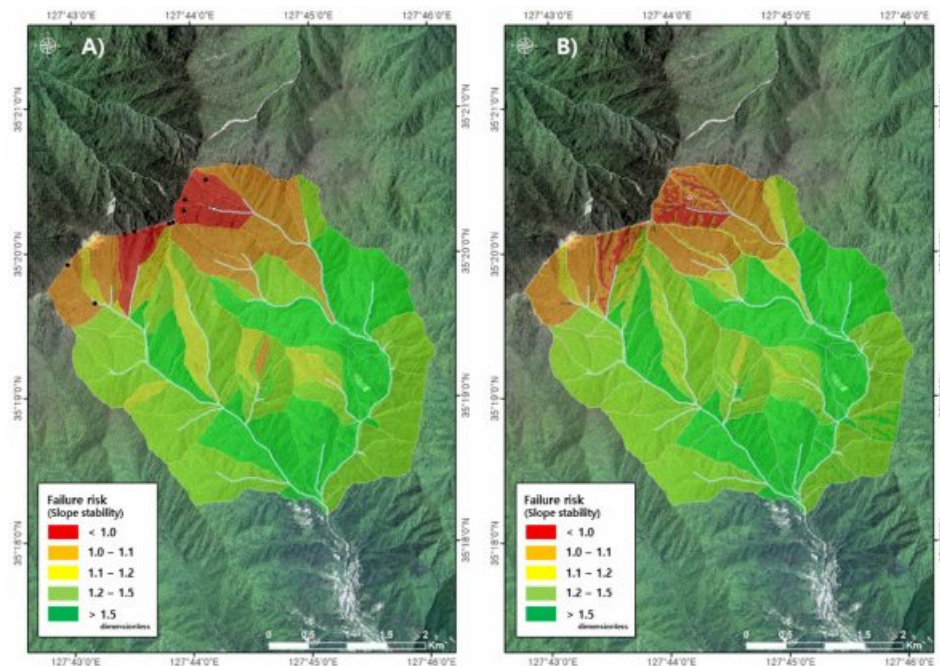


Fig. 10. Effect of Soil depth distribution (here, A) average, B) C-model).

## 5. 토 론

### 5.1. 토양심도와의 상관관계

Fig. 10은 급격한 산사태로 인한 표토훼손지의 예측에 있어 토양심도의 반영 전후의 결과를 나타낸 그림이다. 토양층의 두께는 토양의 생성물과 운반물 간의 결과로 Sapelite 혹은 기반암(bedrock)까지의 깊이, 즉 수문학적 특성에 있어 현저한 변화가 나타나는 깊이로 정의되며, 지표와 지표 아래의 수많은 물리적, 생태적 그리고 화학적 작용을 조절하는 요인으로 보고되고 있다(Catani et al., 2010). 예를 들어 토양층은 수문 및 생태 과학 분야에서 강우에 의한 물의 유출, 체류 및 이동 시간을 조절하고, 식물이 사용 가능한 물의 저장과 수원을 결정한다. 또한 최근 토양 내 탄소와 기타 원소의 축적 및 저장에 대한 중요한 매개체로서 인식되고 있다. 하지만, 이러한 중요성에도 불구하고, 공간적으로 분포된 토양의 두께를 예측하는 것은 어려우며, 특히, 유역 스케일에서 토양심도를 공간적으로 예측하는 것은 더 어려운 것으로 보고되고 있다. 본 연구에서도 마찬가지로 이에 대한 정확한 측정이 미비하여 지형학 기반의 토양심도에 대한 분포를 이용하여 분석한 결과 정확성이 상당히 증가됨을 알 수 있었다. 하지만, 이는 정확한 토양 심도의 분포를 구한 결과가 아니기 때문에 추후 연구지역에서 측정한 약 800여 개의 토양심

도 데이터를 기반으로 토양층의 깊이에 따라 발생할 수 있는 산사태의 양상을 예측할 필요가 있다.

### 5.2. 공간해상도의 영향과 추후 연구방향

일반적으로 모형을 이용한 연구에서 DEM이 모형의 예측 결과에 많은 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. FitzHugh and Mackay(2000)은 SWAT model 사용 시 유역의 분할 개수에 따른 소유역의 면적이 유출량에는 크게 영향을 미치지 않으나 총유사량의 경우는 면적이 줄어들었을 때 최대 44% 정도 감소함을 밝혀냈고 Luzio et al.(2005)는 DEM의 해상도에 따른 유출량과 유사량의 결과를 연구한 결과 낮은 해상도자료를 사용한 경우 소유역에서는 유출량이 감소하고 유사량 예측에도 많은 영향이 있는 것으로 보고하였다. 또한 Jang et al.(2002)은 해상도가 작아질수록 비유사량 값이 낮게 계산됨을 밝혀냈으며 이때, 유량에 의한 토양침식을 정량적으로 추정하기 위해 적절한 해상도를 사용해야함을 강조하였다. 여기서 한 가지 고려해야 할 점은 모형에서 유출량을 계산하는 식에 관련된 문제가 하나의 원인으로 보인다.

GIS를 이용한 분석법을 이용할 경우 흐름방향과 관련된 개념을 이용한 집수면적 개념을 이용하게 되는데 이는 많은 선행 연구(Moore et al., 1991; Wechsler, 2007)에서 언급한 것처럼 DEM의 해상도가 낮아짐에 따라 경사

가 감소하고 이는 소유역 분할과 하천의 구성에 영향을 미치기 때문에 경사 인자와 하천 지수 인자를 산정하여 흐름 값이 지형에 따라 과대추정 혹은 과소 추정이 발생할 수 있다(Sharma and Tiwari, 2014). Tarolli(2014)는 이를 위해 10m의 공간해상도가 수문현상을 해결하기에는 가장 합리적인 결과를 갖는다고 보고했지만, Milledge et al.(2012)의 타 연구에서는 고해상도의 DEM을 반영했을 경우 너무 세밀한 계산으로 인해 정확성이 낮아질 수 있음을 증명하였다. 그러므로 본 연구에서는 이에 대한 영향을 고려하지는 못하였지만, 이에 대한 정확한 평가가 이루어질 필요성이 있다. 더욱이 최근의 연구동향(Kim et al. 2021)에서 산사태의 발생에 있어 시간당 강우강도와 지속시간에 많은 영향을 미치며 시간단위로 해석하는 것이 중요하다고 보고하고 있다. 또한 Kim et al.(2021)에 의하면 일 단위 강우사상에 대해 모델링을 수행하여 비교를 수행한 결과 강우의 시간적 분포에 의해 그 결과가 많이 차이가 나는 것을 실제 모니터링자료와의 비교를 통해 수행하였다. 추후 연구에서 이를 고려하여, 시간 단위에 따른 해석을 기반으로 복합적인 연구가 진행되어야 할 필요성이 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 강우에 따른 토양층 내에서의 흐름 특성을 기반으로 산사태를 광역적으로 예측할 수 있는 기법을 개발하고, 기후변화에 의해 향후 발생할 수 있는 산사태의 대비 및 저감을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 연구지역에서 측정한 강우-유량-토양 내 함수량 자료를 이용하여 2015년부터 2020년 12월까지의 SWAT을 이용한 모델링을 통해 수분압의 변화를 산정하였고, 무한사면 안정성식의 흐름 조건에 입력자료로 이용하였다. 모니터링 자료와 SWAT 모형의 계산 결과 비교에서 유량-함수량의 관계가 합리적인 것으로 나타났으며( $R^2$ : 0.9,  $NSE$ : 0.91), 일 단위 함수를 변화 결과를 이용하여 산사태를 해석한 결과 높은 정확성( $auROC$ : 0.98)을 보였다. 이 자료를 이용하여 SWAT 모델과 RCP 8.5의 기후변화자료(2050년까지)를 이용하여 분석한 결과, 강우(일강우 200mm이상)에 따른 토양수분압이 70~80 %로 상승 시 대략적으로 4번 정도의 산사태가 발생할 수 있는 것으로 예측되었다. 본 연구는 최근 전 세계적인 기후변화에 대한 대비책을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되나, DEM 해상도 및 시간단위 강우특성에 따른 모니터링 기반 연구가 지속적으로 이루어질 필요성이 있다.

## 사 사

본 연구는 환경부 환경산업기술원의 표토보전관리기술 개발사업(과제번호: 2019220830003)과 산림청 한국임업진흥원 산림과학기술 연구개발사업(과제번호: 2021342B10-2123-CD01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

- Abbaspour, K.C., 2013, Swat-cup 2012 SWAT calibration and uncertainty program-A user manual, Zurich, 1-106.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R., 1998, Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **34**(1), 73-89.
- Catani, F., Segoni, S., and Falorni, G., 2010, An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale, *Water resources research*, **46**(5).
- Chen, H., Luo, Y., Potter, C., Moran, P.J., Grieneisen, M.L., and Zhang, M., 2017, Modeling pesticide diuron loading from the San Joaquin watershed into the Sacramento-San Joaquin Delta using SWAT, *Water res.*, **121**, 374-385.
- Das, B. M., and Sobhan, K., 2013, Principles of geotechnical engineering. Cengage learning.
- Di Luzio, M., Arnold, J.G., and Srinivasan, R., 2005, Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations, *Hydrological Processes: An International Journal*, **19**(3), 629-650.
- Fawcett, T., 2006, An introduction to ROC analysis, *Pattern Recognition Letters*, **27**(8), 861-874.
- FitzHugh, T.W. and Mackay, D.S., 2000, Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model, *Journal of hydrology*, **236**(1-2), 35-53.
- Hong, W.Y., Park, G.A., Jeong, I.K., and Kim, S.J., 2010, Development of a Grid-based Daily Watershed Runoff Model and the Evaluation of Its Applicability, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **30**(5B), 459-469.
- Hong, W.Y., Park, M.J., Park, J.Y., Ha, R., Park, G.A., and Kim, S.J., 2009, The Correlation Analysis Between SWAT Predicted Forest Soil Moisture and MODIS NDVI During Spring Season. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, **51**(2), 7-14.
- Jang, S.S. and Kim, S.J., 2017, Assessment of Climate Change Impact on Highland Agricultural Watershed Hydrologic Cycle and Water Quality under RCP Scenarios using SWAT, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, **59**(3), 41-50.

- Jeong, S.S., Choi, J.Y., and Lee, J.H., 2009, Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers C*, **29**(1), 1-9.
- Joh, H.K., Lee, J.W., SHIN, H.J., Park, G.A., and Kim, S.J., 2010, Evaluation of Evapotranspiration and Soil Moisture of SWAT Simulation for Mixed Forest in the Seolmacheon Catchment, *Korean J. Agric. For. Meteorol.*, **12**(4), 289-297.
- Kim, D.H. and Kim, S.M., 2017, Estimation of Inflow into Namgang Dam according to Climate Change using SWAT Model, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, **59**(6), 9-18.
- Kim, J.S, Kim, M.S., Kim, J.K., Oh, H.J., and Woo, C.S., 2021, Analysis of Rainfall-Runoff Characteristic at Mountainous Watershed Using GeoWEPP and SWAT Model, *Journal of The Korean Geomorphologic Association*, **28**(2), 31-44.
- Kim, S.W., Chun, K.W., Kim, M.S., Catani, F., Choi, B.G., and Seo, J.I., 2021, Effect of antecedent rainfall conditions and their variations on shallow landslide-triggering rainfall thresholds in South Korea, *Landslides*, **18**, 569-582.
- Kim, Y.J., Kim, W.Y., Yu, I.H., Lee, S.R., and Min, K.D., 1994, Analysis of Geological Risk and Excavation Index using GIS Technique, *J. Eng. Geol.*, **4**(1), 43-55.
- Korea Institute of Construction Technology, 2007, 21st Century Frontier R&D Program - Sustainable Water Resources Research Program: Development of Analysing System for Surface Water Hydrological Components.
- Milledge, D.G., Griffiths, D.V., Lane, S.N., and Warburton, J., 2012. Limits on the validity of infinite length assumptions for modelling shallow landslides, *Earth Surf. Process. Landf.*, **37**(11), 1158-1166.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., and Ladson, A.R., 1991, Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes*, **5**(1), 3-30.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P., 2015, Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria, *Transactions of the ASABE*, **58**(6), 1763-1785.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, **10**(3), 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R., 2011, Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009, Texas Water Resources Institute.
- Sharma, A. and Tiwari, K.N., 2014, A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level, *Journal of Hydrology*, **519**, 1394-1404.
- Tarolli, P., 2014, High-resolution topography for understanding earth surface processes: opportunities and challenges. *Geomorphology*, **216**, 295-312.
- Troch, P., Van Loon, E., and Hilberts, A., 2002, Analytical solutions to a hillslope-storage kinematic wave equation for subsurface flow. *Advances in Water Resources*, **25**(6), 637-649.
- Wechsler, S.P., 2007, Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review, *Hydrology and Earth System Sciences*, **11**(4), 1481-1500.
- Zizioli, D., Meisina, C., Valentino, R., and Montrasio, L., 2013, Comparison between different approaches to modeling shallow landslide susceptibility: a case history in Oltrepo Pavese. Northern Italy, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **13**(3), 559-573.
- Environmental Geographic Information, <https://egis.me.go.kr> [accessed 21.11.30]
- KMA Climate information portal, [http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents\\_new/Definition.html](http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_new/Definition.html) [accessed 21.11.30]
- KMA Weather Data Service, <https://data.kma.go.kr/stcs/grnd/grndTaList.do?pgmNo=70> [accessed 21.11.30]
- Korean Soil Information System, <https://soil.rda.go.kr> [accessed 21.11.30]
- Korean statistical information service, [https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1311](https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1311) [accessed 21.11.30]