

## 충남 부여군 문화재의 산사태 민감성 평가

김준우<sup>1)</sup> · 김호걸<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 청주대학교 대학원 환경조경학과 학생 · <sup>2)</sup> 청주대학교 휴먼환경디자인학부 조경도시계획전공 교수

### Assessing the Landslide Susceptibility of Cultural Heritages of Buyeo-gun, Chungcheongnam-do

Kim, Jun-Woo<sup>1)</sup> Kim, Ho Gul<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Major in Landscape Architecture, Cheongju University, Student,

<sup>2)</sup> Dept. of Human Environment Design, Major in Landscape Urban Planning, Cheongju University, Professor.

#### ABSTRACT

The damages caused by landslides are increasing worldwide due to climate change. In Korea, damages from landslides occur frequently, making it necessary to develop the effective response strategies. In particular, there is a lack of countermeasures against landslides in cultural heritage areas. The purpose of this study was to spatially analyze the relationship between Buyeo-gun's cultural heritage and landslide susceptible areas in Buyeo-gun, Chungcheongnam-do, which has a long history. Nine spatial distribution models were used to evaluate the landslide susceptibility, and the ensemble method was applied to reduce the uncertainty of individual model. There were 17 cultural heritages belonging to the landslide susceptible area. As a result of calculating the area ratio of the landslide susceptible area for cultural heritages, the cultural heritages with 100% of the area included in the landslide susceptible area were "Standing statue of Maae in Hongsan Sangcheon-ri" and "Statue of King Seonjo." More than 35% of "Jeungsanseong", "Garimseong", and "Standing stone statue of Maitreya Bodhisattva in Daejosa Temple" belonged to landslide susceptible areas. In order to effectively prevent landslide damage, the application of landslide prevention measures should be

\* 본 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2019002770001). 김준우가 2022년에 작성한 청주대학교 석사학위 논문의 일부를 인용하였음을 밝힙니다.

**First author** : Kim, Jun Woo, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Studies, Cheongju University, Student,  
Tel: +82-43-220-1170, Email: junu7184i@gmail.com

**Corresponding author** : Kim, Ho Gul, Dept. of Human Environment Design, Major in Landscape Urban Planning,  
Cheongju University, Professor,  
Tel: +82-43-229-8509, Email: khgghk@cju.ac.kr

**Received** : 20 May, 2022. **Revised** : 25 October, 2022. **Accepted** : 18 October, 2022.

prioritized according to the proportion belonging to the landslide susceptible area. Since it is very difficult to restore cultural properties once destroyed, preventive measures are required before landslide damage occurs. The approach and results of this study provide basic data and guidelines for disaster response plans to prevent landslides in Buyeo-gun.

**Key Words :** *Landslide hazard area, Machine learning model, Ensemble model, Disaster prevention*

## I. 서 론

최근 산사태의 주요 원인이 되는 집중호우 및 태풍은 기후변화로 인해 전 세계적으로 증가하고 있다. 우리나라는 여름철 집중호우와 태풍으로 인한 산사태로 고통을 받고 있으며, 산사태가 발생하면 주변 지역에 심각한 인명피해 및 경제적 손실이 발생한다(Napoli et al., 2021). 산사태 발생으로 인명피해와 재산 피해는 물론 도로와 주요 시설물에 직간접적인 피해를 준다. 따라서 산사태는 각종 재난 유형 중 피해 정도가 심각한 자연재해로 분류하고 있다(Yang et al., 2006).

산지가 국토의 62.6% 이상을 차지하는 우리나라는 문화재가 산지에 위치하는 경우가 많아 산사태 발생 시 큰 피해를 본다(NSDI, 2021). 문화재청의 통계를 보면 2011년부터 2020년까지 산사태의 주요 원인이 되는 집중호우, 태풍 등 풍수해로 인해 훼손된 국가지정문화재는 325개이며, 부여군에서는 풍수해에 따른 7건의 문화재 피해가 있었다. 또한, 문화재 보존과 방재 시스템 구축에 매년 6천억 원 이상을 지출하고 있지만 2020년 문화재 피해 규모는 2017년의 4배 수준으로 증가했다. 기후변화로 인해 집중호우와 태풍이 증가하면 산사태로 인한 문화재 훼손이 늘어날 것으로 예상된다. 문화재는 역사와 문화 활동의 요약본 역할을 하는 중요한 자산으로 산사태로 인한 피해를 막기 위한 시급한 노력이 필요하다.

산사태 피해 및 인명피해를 방지하기 위해 산사태 민감 지역과 산사태 발생 및 대응 전략 수립을 위한 연구가 진행 중이다(Poudel et al.,

2020). 산사태가 발생하기 전에 확인하고 관리하는 것은 산사태로 인한 피해를 최소화하는 데 도움이 된다. 최근 산사태 민감성에 관한 연구들은 로지스틱 회귀 분석(Logistic Regression Analysis), ANN(Artificial Neural Network) 및 RF(Random Forest)를 결합하여 새로운 산사태 민감성 분석 방법론을 개발하기 위한 연구가 수행되고 있으며(Sevgen et al., 2019), Maximum Entropy 모형을 이용한 산사태 민감성 평가 연구(Kornejady et al., 2017; Kerekes et al., 2018; Lombardo et al., 2016), 학습 기법을 이용한 산사태 민감성 평가 GIS 기반 기계 연구(Napoli et al., 2021; Chen et al., 2018), 기계 학습 및 SAR(Synthetic Aperture Radar) 기법을 이용한 산사태 민감성 연구도 수행되고 있다(Novellino et al., 2021).

세계 문화유산을 가장 많이 보유하고 있는 이탈리아는 산사태의 영향을 많이 받아 인명 피해와 사회 기반 시설 및 문화유산 피해가 있었으며 산사태 민감성 및 위험 평가하기 위한 산사태 지도 제작에 대한 많은 연구가 진행이 되었다(Lazzari et al., 2018). 전 세계적으로 문화유산과 산사태에 관련된 현상을 연구하고 영향을 평가하려고 시도하고 있다(Ullo et al., 2021). 중국의 리산 시안, 페루의 마추픽추, 일본의 운젠 화산 3개 주요 문화유산의 산사태 위험도 평가를 위한 활동이 보고되었다(Lollino et al., 2014). 반면, 국내의 산사태 민감 지역에 관한 기존 연구는 산림의 내부 피해 또는 산사태가 인명 및 기반 시설에 피해를 주는 산림 인접 지역에 초점을 맞추었으며, 문화재의 산사태 피해

가능성에 관한 연구가 부족하다(Lee et al., 2004; Sabbioni et al., 2008). 특히 최근 자연재해 발생 건수가 증가하고 있고 국내 문화재 상당수가 산림에 있다는 점을 고려하면 산사태에 대한 민감성 평가가 시급하다.

따라서 이 연구는 백제의 옛 도읍지로서 귀중한 문화재들이 많이 보존된 지역이며 풍부한 문화 역사가 있는 부여군의 문화재와 산사태 민감 지역의 공간적 관계를 분석하고자 한다. 부여군은 2018년 기준으로 144개소의 산사태 취약지역을 지정하여 관리하고 있으며, 문화재에 대한 산사태 피해가 발생할 가능성이 다른 지자체에 비해 높다. 이에 부여군은 부여 전통 건조물 조사보고서를 제작하는 등 문화재에 대한 보존·관리를 위한 준비를 하고 있으나, 실제 산사태 피해에 관한 연구는 미흡한 실정이다(Baekje Cultural Foundation, 2018).

본 연구의 목적은 다음과 같다. 부여군에 위치한 문화재에 대한 산사태 피해를 예방하거나 줄이기 위해 문화재의 산사태 민감성을 분석하는 것이다. 이를 위해 문화재와 산사태 민감 지역의 면적 비율을 분석하여 산사태 사전 예방과 대응의 우선순위를 파악하였다. 본 연구의 결과는 산사태 대응 전략이 시급한 문화재와 위치에 대한 정보를 의사결정자에게 제공함으로써 산사태 피해를 예방하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

## II. 연구 재료 및 범위

### 1. 연구범위 및 재료

#### 1) 연구의 범위

본 공간적 범위는 충청남도 부여군이다. 부여군은 선행연구를 통해 충청 지역 내에서 문화재에 대한 산사태 민감성이 가장 높은 지역으로 분석되었다(Kim et al., 2021). 부여군은 동경 126° 44~127° 03, 북위 36° 04~36° 23에 위치하며, 약 624km<sup>2</sup>의 면적을 가졌다. 부여군에는 국가 및 시도 지정문화재 156개가 있다. 산사태

민감성 분석을 위해 정확한 좌표 정보를 가지고 있는 111개의 문화재를 대상으로 선정하였다.

본 연구의 시간적 범위는 2009년~2021년의 산사태 발생지점 자료를 검토하여 최종적으로 2018년으로 선정하였다. 부여군의 산사태의 발생연도와 횟수는 2010년 4회, 2011년 8회, 2018년 36회로 확인되었다. 2010년과 2011년의 산사태 발생 횟수는 2018년에 비해 적었으며 산사태에 대한 모형 구축 시 기상자료의 시간적 불일치로 인해 신뢰도가 떨어질 것을 고려하여 2018년으로 선정하였다.

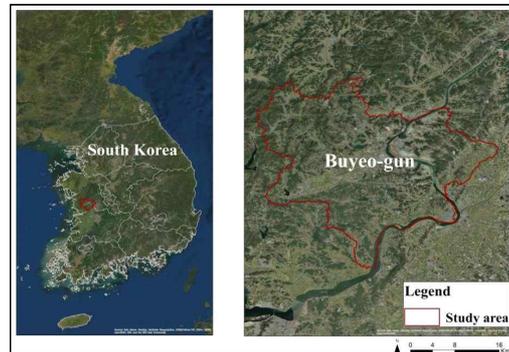


Figure 1. Study area(Buyeo-gun)

#### 2) 산사태 발생지점 자료

연구의 목표 연도인 2018년에 산사태가 발생하는 지점은 36개로 Figure 2와 같다. 산사태 발생지점 자료는 산림청의 정보공개시스템을 통해 수집되었다. 산림청의 산사태 발생 위치 자료는 두 가지 방식으로 구축되고 있다. 첫째, 산사태 발생 직후 실시하는 지방자치단체의 현장 조사를 통해 구축된다. 그러나 모든 산사태 지역에 대한 현장 조사는 불가능하여서 주로 인명 및 재산 피해가 발생한 지역을 중심으로 조사가 이루어진다는 점을 고려해야 한다. 둘째, 매년 위성영상자료를 활용하여 산사태의 위치를 추정하고 데이터베이스를 구축한다(Kim et al., 2021a). 본 연구에서는 산림청의 산사태 발생지점 주소 데이터를 바탕으로 지오코딩(Geocoding)을 통해서 하나의 지리 좌표(위도/경

도)로 변환하였다. ESRI사의 ArcGIS 10.8에서 임상도의 산림 내에 위치하지 않은 산사태 발생지점 주소 데이터를 삭제하였고 27개의 산사태 발생지점을 이용하여 산사태 민감성 분석에 활용하였다.

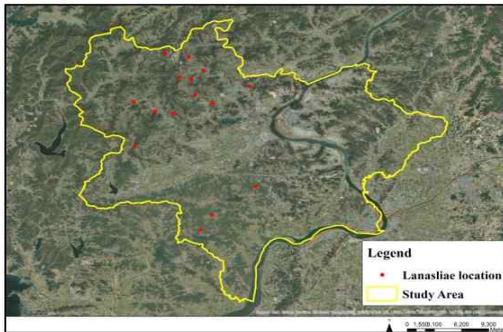


Figure 2. Landslide occurrence points.

### 3) 환경변수 자료

산사태 민감성 지도를 제작하기 위해서 선행 연구를 통해서 산사태와 밀접한 관계를 가진 환경변수를 파악하였다(Table 1). 선정된 환경변수는 특성에 따라 강우 인자, 지형 인자, 식생 인자, 토지이용 인자로 구분하였다. 상세한 산사태 민감성 분석하기 위해 환경변수는 5m×5m로 제작하였으며 ArcGIS 10.8에서 편집 작업을 거쳐서 제작되었다.

강우 인자에는 Annual average rainfall(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Taalab et al., 2018; Vorpahl et al., 2012), 강우량이 150mm 이상인 날의 횟수, 강우량이 80mm 이상인 날의 횟수, Daily maximum rainfall(Kim, 2018; Kim et al., 2021a), Hourly maximum rainfall(Dhakal et al., 2004; Kim et al., 2021a)을 포함하였으며, 강우 인자들은 경사면의 전단 강도에 영향을 미칠 수 있으므로 산사태를 일으키는 주요 요인이다. 지형 인자에서는 Elevation, Slope, Aspect, curvature, Profile curvature, Plan curvature, Topographic wetness index, Stream power index, Soil depth를 포함하였으며, Elevation은 다양한 환경 조건에 의해 직접적으로 영향을 미친다. Slope

는 수문학적 상태에서 산사태에 간접적으로 영향을 미친다. Aspect는 토양 수분과 경사 안정성에 영향을 미칠 수 있는 일사량의 정도를 결정한다(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Dai et al., 2002; Hamza et al., 2017; Kim et al., 2021a; Kornejady et al., 2017; Taalab et al., 2018; Tang et al., 2019; Vorpahl et al., 2012). Curvature는 지형의 형태를 나타낸다(3, 4, 5, 25). Profile curvature는 산사태 내에서 운동 방향의 추진 및 저항 응력에 영향을 준다. Plan curvature는 흐름의 수렴 및 산포에 영향을 미친다(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Kornejady et al., 2017; Sabbioni et al., 2008; Tang et al., 2019; Vorpahl et al., 2012). SPI는 표면 유출 침식 용량을 측정하고(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018b; Sabbioni et al., 2008; Vorpahl et al., 2012) TWI는 수문학적 상태의 토양 표면에 민감한 영역을 예측한다(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018b; Rossi et al., 2010; Tang et al., 2019). Soil Depth에 따라 하중이 달라지므로 산사태 발생에 영향을 미칠 수 있다(Tang et al., 2019; Wu et al., 2020). NDVI는 산사태 발생에 영향을 미칠 수 있는 식생 상태와 지하수 함량을 나타낸다(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Sabbioni et al., 2008; Vorpahl et al., 2012). River는 짧은수류, 강의 흐름이 물질을 침식하여 경사면을 훼손할 가능성이 크다. Road는 도로와 인접한 지역에서는 도로 공사가 지반 안정성을 해친다는 점을 고려하여 반영하였다(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Kornejady et al., 2017; Sabbioni et al., 2008; Tang et al., 2019; Vorpahl et al., 2012). Lithology는 지반을 이루는 어떤 종류의 암석들은 산사태를 일으킬 가능성이 더 크기에 산사태에 영향을 미친다(Chen et al., 2017; Chen et al., 2018a; Chen et al., 2018b; Dai et al., 2002; Hamza et al., 2017; Kim et al., 2016; Kornejady et al., 2017; Tang et al., 2019; Vorpahl et al., 2012).

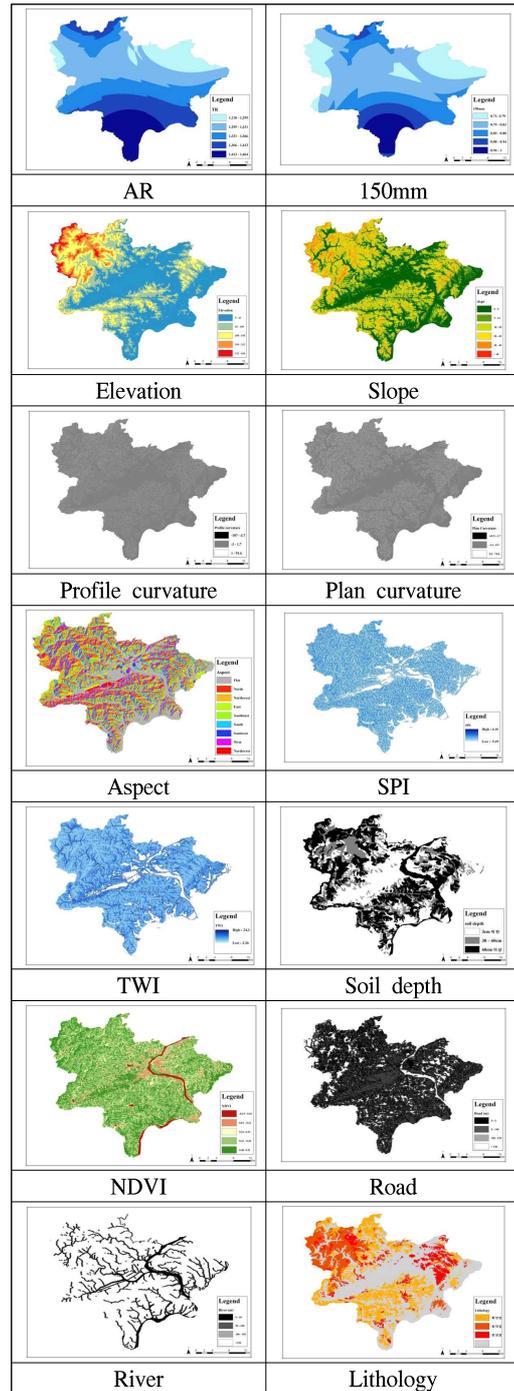
**Table 1.** List of environmental variables.

Class	Variable
Rainfall	Annual average rainfall(AR)
	Days with more than 150 mm/d(150mm)
	Days with more than 80 mm/d(80mm)
	maximum rainfall(DM)
	Hourly maximum rainfall(HM)
Topography	Elevation
	Slope
	Aspect
	Profile curvature
	Plan curvature
	Curvature
	Topographic wetness index(TWI)
	Stream power index(SPI)
	Soil depth
Vegetation	Normalized difference vegetation index(NDVI)
Land use	Distance to road(m)(Road)
	Distance to river(m)(Rrier)
	Lithology(3 types)

### III. 연구방법

#### 1. 연구의 체계

본 연구에서 사용된 연구의 체계는 다음과 같다(Figure 4). 대상지의 연강우량은 1326.6mm이며, 서북쪽은 산지를 이루며 남동쪽은 차차 높이가 낮아져 평야가 발달하였고 고도는 5~626m로 이루어져 있다. 환경변수를 구축하기 위하여 산사태 민감성 평가에 대한 선행연구를 참고하여 산사태의 주요 원인으로 꼽히는 강우량, 지형, 식생, 토지이용 등을 기준으로 환경변수를 선정하였다. 산사태 발생지점에 대한 정보는 산림청이 제공한 정보를 활용하였다. 문화재청에서 제공하는 문화재 공간정보를 토대로 국가 및 시도 지정문화재의 위치 및 면적 정보를 수집하였다. 18개의 산사태 발생 시기와 일치하는 강우, 지형, 식생, 토지이용 변수를 구축하였고, 환경변수 간의 상관관계가 강한 환경변수는 제외하였다(Figure 3).

**Figure 3.** Environmental variables.

정확한 산사태 민감성 모형을 얻으려면 산사태 발생 요인의 예측 능력을 평가해야 한다. 산

사태 민감성을 평가하기 위해 선행연구에서 사용된 대표적인 모형에서 9개의 공간분포 모형을 선택했다. R의 통계 패키지인 **Biomod2**를 사용하여 9개의 공간분포 모형을 구동하고, 앙상블 모형을 이용하여 최종 산사태 민감 지도를 제작하였다.

모형의 신뢰도는 각 모형의 결과와 AUC(Area Under the Curve)값 아래의 면적에 대한 ROC(Receiver Operating Characteristic) curve 분석에 기초하여 평가되었다. 또한, 모형에 적용되는 각 환경변수의 기여도를 계산하였고, 이 계산에 기초하여 환경변수와 산사태 발생지점 간의 관계를 결정했다.

문화재 내 산사태 민감 지역은 산사태 민감성 지도와 문화재 위치를 중첩하여 분석했다. 부여군 내에 있는 문화재에 대한 산사태 민감 지역 면적 비율을 분석하여 관리 및 대책이 시급한 문화재를 도출하였다.

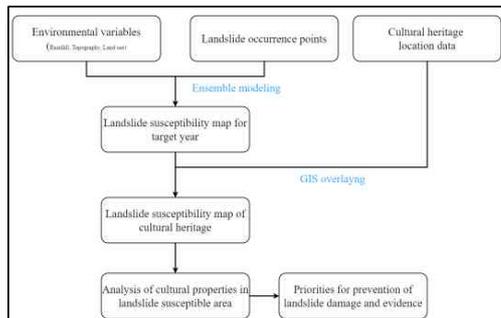


Figure 4. Flowchart of the study.

## 2. 환경변수 선정

본 연구에서 산사태와 밀접한 관련이 있는 환경변수들은 선행연구를 통해서 파악하였다. 18개의 환경변수는 특성에 따라 강우, 지형, 식생, 토지이용으로 분류하였다. 강우 인자는 정확한 강우 데이터를 수집하기 위해 기상청의 방재기상관측(AWS, Automatic Weather System)의 강우량에 대한 데이터들을 GIS 보간법을 사용하여 제작했다. 지형 인자의 Elevation, Slope,

Aspect, Curvature, Profile curvature, Plan curvature, TWI 및 SPI는 국토지리정보원이 제공하는 1:5000 수치지형도를 이용하여 DEM을 제작하여 도출되었다. Soil depth는 국가수자원관리종합시스템(WAMIS)에서 제공하는 GIS 데이터베이스를 이용하여 제작되었다. 식생 인자의 NDVI는 United States Geological Survey(USGS)에서 제공하는 Landsat 8의 데이터를 가지고 GIS에서 NDVI의 방정식을 사용하여 제작되었다. 토지 이용인자의 Road 및 River는 국토지리정보원에서 제공하는 연속 수치지형도의 도로와 하천 데이터를 이용하여 제작하였고, 산림청에서 제공하는 1:25,000 산림입지도양도를 이용하여 Lithology를 제작하였다.

본 연구의 대상지를 포함하는 충청 지역에 대한 산사태 민감성을 분석한 선행연구를 참조하여, 18개의 환경변수를 후보로 도출하였다(Kim et al., 2021b). 환경변수들 사이의 강한 상관관계는 다중공선성으로 인한 모형 성능에 좋지 않다(Wu et al., 2020). 18개 환경변수에 대한 Spearman 상관관계를 분석한 결과  $\pm 0.6$  이상의 상관관계를 가진 변수들은 “Curvature와 Profile curvature, Plan curvature, River, Road”, “150mm와 80mm, DM”, “Plan curvature와 HM”, “Elevation과 Slope”로 나타났다. 그러나 Elevation과 Slope는 산사태 발생의 필수 요인으로 일반적으로 인식된다. Elevation은 산사태의 밀도와 공간적 범위를 제한하는 중요한 요소이며, Slope는 산사태의 가장 실질적인 원인이기 때문이다(Ayalew et al, 2005). 또한, 산사태 민감성 모형에서 변수 기여도가 높으므로 배제되지 않았다. 최종적으로 18개의 환경변수 중 Curvature, 80mm, HM, DM을 제외하여 14개의 환경변수가 최종 산사태 민감 모형에 반영되었다(Table 2).

## 3. 공간분포 모형

공간분포 모형의 유형은 통계 및 기계학습 기반이 있으며, 본 연구에서는 산사태 연구에 자주 사

**Table 2.** Selected environmental variables.

Class	Abbreviation	Type
Rainfall	AR	continuous
	150mm	continuous
Topography	Elevation	continuous
	Slope	continuous
	Profile curvature	continuous
	Plan curvature	continuous
	Aspect	continuous
	SPI	continuous
	TWI	continuous
	Soil depth	continuous
Vegetation	NDVI	continuous
Land use	Road	continuous
	River	continuous
	Lithology	categorical

용되는 공간분포 모형을 채택하였다. 선정된 공간분포 모형은 기계 학습 모형으로 Generalized Boosting Model(GBM), Artificial Neural Network(ANN), Surface Range Envelop(SRE), Classification Tree Analysis(CTA), Flexible Discriminant Analysis(FDA), Random Forest(RF), Maximum Entropy(MAXENT)와 통계 기반 모형으로 Generalized Linear Model(GLM), Generalized Linear Model(GAM)을 선정하였다.

GLM은 연결 함수, 즉 반응 분포를 사용하여 정규 분포를 따르는 반응 변수를 사용하는 다중 회귀 모형이다(Myers et al., 1997). GAM은 비선형 반응 함수를 탐지하고 설명하기 위한 방법론으로 제안된다(Swartzman et al., 1995). GBM은 환경변수에 같은 확률을 적용하지 않지만, 중요도에 따라 다른 변수보다 높은 선택 확률을 적용하는 가중 변수와 유사하다(Ridgeway et al., 2007). ANN은 2단계 분류 또는 회귀 모형으로 설명될 수 있다. ANN의 숨은 레이어는 입력 변수의 선형 조합인 형상으로 구성된다. 출력 변수는 숨겨진 레이어의 가중치 조합이다(Agatonovic Kustrin et al., 2000). SRE는 모든 종속 변수의 값에 의해 제한되는 다차원 환경

공간을 사용하여 종속 변수의 잠재적 분포를 평가한다(Busby et al., 1991). CTA는 Optimal Discriminant Analysis(ODA) 모형이다. ODA 모형은 둘 이상의 클래스를 구별하여 정렬된 변수들의 Cutpoint들을 찾는 기계 학습 모형이다(Yarnold et al., 1991). FDA는 분류를 시도하기 전에 먼저 Multivariate Adaptive Regression Splines(MARS) 모형과 정렬한 다음 치수 축소를 수행한다. RF는 관련 없는 트리를 생성하고 트리를 평균화하는 부트스트랩 집계 방법이다. RF는 입력 데이터의 부분 집합으로 구성된다. 또한, 트리 모형의 각 분할은 입력 변수의 임의 부분 집합으로 구성된다(Breiman et al., 2001). MAXENT는 통계 역학과 정보 이론에 기초하며, 알려지지 않은 분포에 대한 최상의 근사치는 최대 엔트로피 방법을 사용하여 분석할 수 있다(Phillips et al., 2004).

개별 모형은 5회 반복 구동하여 단일 횟수로 구동했을 때 발생할 수 있는 불확실성을 줄이고자 하였다. 모형의 신뢰도는 각 모형의 결과와 AUC값 아래의 면적에 대한 ROC curve 분석에 기초하여 평가되었다. 또한, 모형에 적용되는 각 환경변수의 기여도를 계산하였으며, 환경변수와 산사태 발생 지점 간의 관계는 이 계산에 기초하여 결정되었다.

#### 4. 앙상블 모형

앙상블 모형은 개별 공간분포 모형을 결합하여 모형이 갖는 과소 추정, 과대 추정 등의 불확실성을 줄이고 산사태 발생 예측의 신뢰성을 높이는 데 도움을 준다(Rossi et al., 2010). 따라서 본 연구에서는 산사태 민감성 분석에 사용된 9개의 공간분포 모형을 5회 반복 구동한 결과에 5개의 앙상블 모형을 적용하여 산사태 민감 지도를 제작하였다.

사용된 앙상블 모형 PM(Mean of probabilities)은 선택된 모형들의 산사태 발생 확률의 평균값을 계산한다. PCI(Confidence interval)는 평균

산사태 발생 확률에 대한 신뢰 구간을 반영하며, 단순 평균의 한계를 보완한다. PME(Median of probability)는 선택된 모형들의 산사태 발생 확률 증위값을 이용하며, 특이값의 영향을 평가하는데 증위값이 평균보다 우수하다는 점을 고려한다. CA(Committee Averaging)는 각 모델의 임계값을 사용하여 선택한 모델의 확률을 이항값(0과1)으로 변환 후 평균을 계산한다. PMW (Weighted mean of probability)은 개별 모형의 신뢰도 평가 점수의 비율을 바탕으로 평균값 계산 시에 가중치를 적용함으로써 모형의 상대적 중요성을 계산한다(Kim et al., 2018).

#### IV. 결 과

##### 1. 산사태 민감성 모형의 신뢰도

부여군에 대한 산사태 민감성 평가 모형의 환경변수 기여도는 다음과 같다(Table 3). 목표 연도에 대해 45개의 산사태 민감성 지도가 제작되었으며 앙상블 모형을 이용하여 종합하였다. 부여군의 2018년도 산사태 민감성 모형은 Slope가 가장 높은 기여도를 보였고, 다음으로 150mm와 Aspect가 높은 기여도를 보였다.

**Table 3.** Variable contribution of environmental variables.

	Variable	Percent contribution
Variables and contribution	Slope	49.6%
	150mm	27.9%
	Aspect	25.4%
	Road	24.2%
	Elevation	18.0%
	NDVI	15.7%
	AR	8.9%
	Profile curvature	7.2%
	River	6.8%
	SPI	6.4%
	Lithology	5.6%
	TWI	5.3%
	Soil depth	4.5%
	Plan curvature	4.3%
	AUC value	0.992

앙상블 모형의 신뢰도는 AUC 값으로 나타냈다. AUC 값은 ROC curve의 아래 영역을 의미하는 지표이며 1에 가까울수록 완벽히 분류된 것으로 판단할 수 있다. 앙상블 모형의 신뢰성 평가 결과, 산사태 민감성 모형의 AUC 값은 0.992로 매우 높은 신뢰성을 보여주었다.

##### 2. 문화재의 산사태 민감성 평가

공간분포 모형의 구동을 통해 강우량, 지형, 토지이용 인자의 관계가 분석되어 산사태에 민감성이 높은 지역이 도출되었다. 먼저, 공간분포 모형의 산사태 민감성 결과가 도출되었다(Fig. 5). 개별 모형의 AUC 값은 SRE, MAXENT는 다른 모형과 비교해 0.8 이하의 상대적으로 낮은 AUC 값으로 나타나며, 나머지 모형들은 0.84-0.97로 높은 AUC 값으로 나타났다(Table 4). 개별 모형에 따라서 산사태 민감 지역 분포가 공통점을 보이는 경우도 있었으나, 일부 모형은 차이점을 나타내었다. GBM, CTA, RF 모형은 타 모형들에 보다 산사태 민감 지역의 면적이 작게 추정하는 동시에 유사한 분포를 나타냈다. ANN, FDA, MAXENT, GLM, GAM 모형은 앞서 모형들에 보다 더 넓은 민감 지역이 도출되었으며, 서로 유사한 분포를 나타냈다. 한편, SRE 모형은 가장 좁은 산사태 민감 지역을 추정하였으며, 상대적으로 과소 추정하는 경향이 나타났다.

**Table 4.** The AUC value of each model.

Category	Model	AUC value	
Statistical model	GBM	0.97	
	ANN	0.92	
	SRE	0.72	
	CTA	0.89	
	FDA	0.92	
	RF	0.97	
	MAXENT	0.75	
	Machine-learning-based model	GLM	0.84
		GAM	0.91

Figure 6는 앙상블 모형을 이용하여 9개 모형

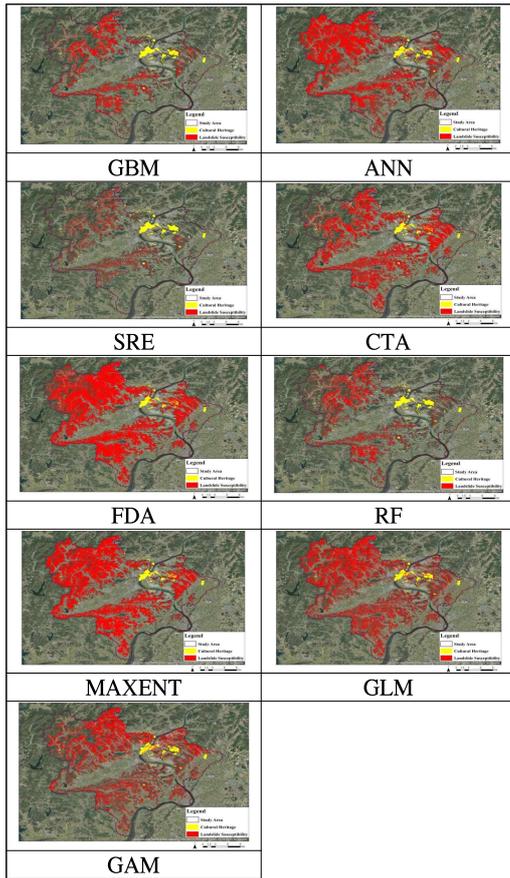


Figure 5. Landslide susceptible areas of each model and cultural heritages.

의 분석 결과를 종합한 결과이며, 이를 통해 개별 모형의 결과가 갖는 과대 및 과소 추정으로 인한 불확실성을 보완하였다. 최종적인 산사태 민감성 지도 제작에 사용된 앙상블 모형은 5개의 앙상블 모형 중 AUC 값이 가장 크게 나타난 PME의 결과를 활용하였다. 앙상블 모형을 통해 종합된 산사태 민감 지도를 살펴보면, 산지가 많은 북부지역의 온산면과 내산면 남부지역의 장암면과 충화면에 산사태 민감성이 높은 것으로 파악되었다.

부여군 문화재의 산사태 민감성 분석 결과, 산사태 민감 지역 내에 속하는 문화재는 17개로 도출되었다. 17개의 문화재에 대해 산사태 민감 지역의 면적 비율을 계산해 본 결과, 산사태 민감 지역에 포함되는 면적의 비율이 100%인 문화재는 “홍

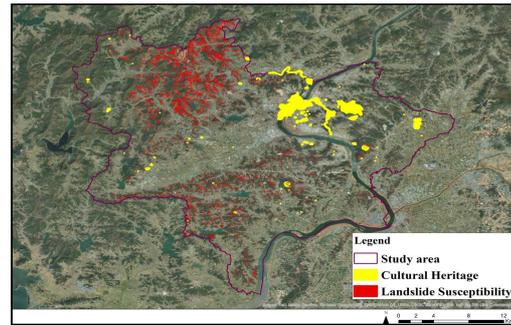


Figure 6. Landslide susceptible areas of ensemble model (PME) and cultural heritages.

산 상천리마애불입상(A)”, “선조대왕태실비(B)”로 확인되었다. “증산성(C)”, “가림성(D)”, “대조사석조미륵보살입상(E)”는 전체 면적의 35% 이상, “저동리쌀바위(F)”는 17.7%가 산사태 민감 지역에 속하였다. 나머지 11개의 문화재에 속하는 “석성산성(G)”, “태봉산성(H)”, “홍산향교(I)”, “보광사지(J)”, “낙화암(K)”, “은산당산성(L)”, “홍산현관아(M)”, “미호종개 서식지(N)”, “나성(O)”, “부소산성(P)”, “구드레 일원(Q)”은 10% 이하의 면적이 산사태 민감 지역에 속하는 것으로 확인되었다(Table 5).

Table 5. Area ratio of landslide susceptible area and cultural property.

No.	Cultural heritage code	Proportion of area covered by landslide susceptible area
1	A	100%
2	B	100%
3	C	37.8%
4	D	36.7%
5	E	35.0%
6	F	17.7%
7	G	9.3%
8	H	8.6%
9	I	8.0%
10	J	5.8%
11	K	3.8%
12	L	1.4%
13	M	0.4%
14	N	0.1%
15	O	0.02%
16	P	0.008%
17	Q	0.004%

## V. 고찰

본 연구의 산사태 민감성 모형은 강우 인자와 지형 인자가 높은 기여도를 보였다. 대부분의 산사태는 여름철 집중호우 및 태풍으로 인해서 발생하였다. 부여군의 산사태 민감성 모형은 slope(49.6)와 AR(27.9%)의 환경변수가 가장 높은 기여도를 보였다. Lithology(5.6%)와 Soil depth(4.5%)는 대상지의 면적과 제공되는 자료의 한계로 인해 낮은 기여도로 보였다. 부여군의 산사태 민감 지역은 경사지와 강우량 패턴에 따라 분포가 되었으며, 특히 경사각이 20° 이상인 지역에서 산사태 민감 지역이 많이 분포된 것을 확인하였다.

부여군 내에 위치하고 있는 문화재 중 산사태 민감 지역에 포함되는 면적의 비율이 100%로 도출된 “홍산상천리마애불입상”과 “선조대왕태실비”는 산사태 피해 예방을 위해 우선적인 대책 마련이 필요하다고 판단된다. 실제 “홍산상천리마애불입상”, “선조대왕태실비”의 위치 사진과 해당 문화재 지점의 인근 환경변수의 값을 살펴보면, 2개 문화재 모두 인접 지역에 높은 경사가 있는 산지에 위치한다는 점, 낮은 식생활력지수를 보인다는 점, 도로와 가까운 곳에 위치한다는 점, 지형습윤지수가 상대적으로 높다는 점이 공통적으로 나타났다. 이러한 조건들로 산사태로 인한 피해 가능성이 높을 것으로 사료된다(Figure 7).



**Figure 7.** Photos of cultural heritages with 100% area belonging to landslide susceptible area (National Heritage Portal, 1992; National Heritage Portal, 1984).

그 외의 문화재에 대해서도 일부 영역에서 산사태가 발생할 시에 전체 문화재의 유실로 이어질 가능성이 있으므로, 사면 안전성 검사 등 보다 면밀한 조사를 통해 예방대책 마련이 필요하다고 판단된다. 문화재청은 이러한 문화재에 대한 우선적 피해방지대책을 수립하기 위한 예산을 편성해야 한다.

앞으로 기후변화에 따른 집중호우의 증가로 산사태의 가능성이 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 문화재에 대한 산사태 피해도 더 커질 것으로 예상하며, 이를 예방하기 위한 노력이 필요하다. 현행 문화재청 방침에 따라 지진·화재·산불 등에 대한 대응 방안을 마련하였으나, 이 매뉴얼은 재해 대응과 복구에만 중점을 두고 있다. 산사태와 같은 특정 유형의 재난에 대처하는 방법이나 그것들을 예방하는 방법에 대한 설명은 없다. 따라서 산사태 피해 예방과 문화재 피해 복구를 위한 구체적인 가이드라인을 제시할 필요가 있다.

산사태 민감성은 기존 문화재에 대해서도 중요하지만, 급경사에서 새롭게 발굴된 문화재에 대해서도 고려해야 할 부분이 있다. 새로 발굴된 문화재에 대한 현장 조사를 통해 산사태가 예상되는 지역에 산사태 방지 절차를 도입할 필요가 있다. 산사태 민감성이 높다고 판단되는 지역은 발굴 전에 사면 안정성을 검토하고, 위험도가 높은 지역에 산사태 방지를 위한 배수시설을 설치하고 사면을 복원하여 산사태 가능성을 줄여야 한다. 인명 피해를 방지하기 위해 산사태가 자주 발생하지 않는 조사 기간을 설정할 필요가 있다. 사면 복원과 사방댐 굴착 설치를 통한 산사태 방지도 고려해야 한다. 본 연구에서 도출된 산사태 민감성 분석 결과는 이러한 과정에 유용할 수 있는 객관적인 증거자료로 활용될 수 있다.

## VI. 결론

본 연구에서는 부여군의 역사적, 문화적 가치

를 지닌 문화재를 대상으로 산사태 민감성을 분석하였다. 9개의 공간분포 모형을 앙상블 모형을 사용하여 신뢰할 수 있는 산사태 민감 분석 결과를 얻었다. 산사태 대응의 우선순위를 결정하기 위해 산사태 민감 지역과 문화재와의 관계를 분석하였다. 문화재에 대한 산사태 피해 가능성에 비추어 문화재와 산사태 민감 지역의 관계에 관한 연구는 미비한 실정이므로, 향후 다양한 분야에서 문화재의 산사태 민감성에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다. 이번 연구의 접근과 결과는 부여군의 문화재의 산사태 피해 예방하기 위한 재난 대응 계획의 기초자료와 가이드라인을 제공하고 있다.

본 연구는 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫째, 본 연구에서 활용된 기상 관련 지표는 인접 지역 기상관측지점이 부족한 점, 목표연도가 2018년 단일 연도로 한정된 점으로 인해 충분한 변화폭을 가지지 못했다는 한계를 가진다. 둘째, 식생 및 토지이용 자료의 해상도에 한계가 존재하여 모든 문화재를 대상으로 상세한 산사태 민감성 분석을 수행할 수 없었다. 향후 원격탐사 데이터를 사용함으로써 이러한 한계를 극복할 수 있을 것으로 예상된다. 셋째, 기후변화 시나리오를 고려하여 문화재에 대한 미래의 산사태 민감성을 예측하지 못했다. 향후 미래의 산사태 민감성을 평가하기 위한 연구를 수행하고, 문화재에 대한 중장기적인 산사태 방지 대책 수립을 지원하는 연구가 필요하다.

## References

- Arabameri A · Pradhan B · Rezaei K · Sohrabi M and Kalantari Z. 2019. GIS-based landslide susceptibility mapping using numerical risk factor bivariate model and its ensemble with linear multivariate regression and boosted regression tree algorithms. *Journal of Mountain Science* 16(3) : 595-618.
- Baekje Cultural Foundation. 2018. Buyeo Traditional Building Investigation Report
- Chen W · Peng J · Hong H · Shahabi H · Pradhan B · Liu J · Zhu AX · Pei X and Duan Z. 2018a. Landslide susceptibility modelling using GIS-based machine learning techniques for Chongren County Jiangxi Province China. *Science of the total environment* 626 : 1121-1135.
- Chen W · Xie X · Wang J · Pradhan B · Hong H · Bui DT · Duan Z and Ma J. 2017. A comparative study of logistic model tree random forest and classification and regression tree models for spatial prediction of landslide susceptibility. *Catena* 151 : 147-160.
- Chen W · Zhang S · Li R and Shahabi H. 2018b. Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree random forest and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modeling. *Science of the total environment* 644 : 1006-1018.
- Dai FC and Lee CF. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS Lantau Island Hong Kong. *Geomorphology* 42(3-4) : 213-228.
- Dhakal AS and Sidle RC. 2004. Distributed simulations of landslides for different rainfall conditions. *Hydrological Processes* 18(4) : 757-776.
- Di Napoli M · Di Martire D · Bausilio G · Calcaterra D · Confuorto P · Firpo M · Pepe G and Cevasco A. 2021. Rainfall-induced shallow landslide detachment transit and runoff susceptibility mapping by integrating machine learning techniques and GIS-based approaches. *Water* 13(4) : 488.

- Floris M and Bozzano F. 2008. Evaluation of landslide reactivation: a modified rainfall threshold model based on historical records of rainfall and landslides. *Geomorphology* 94(1-2) : 40-57.
- Hamza T and Raghuvanshi TK. 2017. GIS based landslide hazard evaluation and zonation—A case from Jeldu District Central Ethiopia. *Journal of King Saud University-Science* 29(2) : 151-165.
- Helen K. 2015. Tracing UNGEGN's evolving interest in geographical names as cultural heritage. *Geographical Names as Cultural Heritage Proceedings of the International Symposium on Toponymy Seoul Kyung Hee University Press.*
- KEREKES AH · POSZET SL and Andrea GÁL. 2018. Landslide susceptibility assessment using the maximum entropy model in a sector of the Cluj–Napoca Municipality Romania. *Revista de Geomorfologie* 20(1) : 130-146.
- Kim HG · Lee DK and Park C. 2018a. Assessing the cost of damage and effect of adaptation to landslides considering climate change. *Sustainability* 10(5) : 1628.
- Kim HG. 2018 Analysis of Potential Landslide Risk Areas to Support Local Government's Response to Climate Change Disaster: Targeting Chungcheong Area. *Urban Studies* (14) : 93-118.
- Kim HG and Park CY. 2021a. Landslide susceptibility analysis of photovoltaic power stations in Gangwon-do Republic of Korea. *Geomatics Natural Hazards and Risk* 12(1) : 2328-2351.
- Kim MS · Onda Y · Uchida T · and Kim JK. 2016. Effects of soil depth and subsurface flow along the subsurface topography on shallow landslide predictions at the site of a small granitic hillslope. *Geomorphology* 271 : 40-54.
- Kim JW and Kim HG. 2021b. Landslide Susceptibility Analysis by Type of Cultural Heritage Site Using Ensemble Model: Case Study of the Chungcheong Region of South Korea. *Sensors and Materials* 33(11) : 3819-3833.
- Kornejady A · Ownegh M and Bahremand A. 2017. Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *Catena* 152 : 144-162.
- Lazzari M · Gioia D · and Anzidei B. 2018. Landslide inventory of the Basilicata region (Southern Italy). *Journal of Maps* 14(2) : 348-356.
- Liberata Ullo S · Mohan A · Sebastianelli A · Ejaz Ahamed S · Kumar B · Dwivedi R and Sinha GR. 2020. A New Mask R-CNN Based Method for Improved Landslide Detection. *arXiv e-prints pp.arXiv-2010.*
- Lollino G · Giordan D · Crosta GB · Corominas J · Azzam R · Wasowski J and Sciarra N. eds. 2014. *Engineering geology for society and territory-Volume 2: Landslide processes (Vol. 2).* Springer.
- Lombardo L · Bachofer F · Cama M · Märker M and Rotigliano E. 2016. Exploiting Maximum Entropy method and ASTER data for assessing debris flow and debris slide susceptibility for the Giampileri catchment (north-eastern Sicily Italy). *Earth Surface Processes and Landforms* 41(12) : 1776-1789.
- National Heritage Portal. 1984. *Cultural Heritage Image.* Cultural Heritage Administration.

- <https://www.heritage.go.kr/main/?v=1666682807467/>. (accessed Dec. 2021)
- National Heritage Portal. 1992. Cultural Heritage Image. Cultural Heritage Administration. <https://www.heritage.go.kr/main/?v=1666682807467/>. (accessed Dec. 2021)
- NSDIP(National Spatial Data Infrastructure Portal). 2022. Forestry Statistical Yearbook . Korea fores service<https://www.data.go.kr/data/15087207/fileData.do/>.(accessed Jul. 2022)
- Poudel KR · Hamal R and Paudel N. 2020. Landslide susceptibility assessment: identification and hazard mapping of Gandaki Province Nepal. Prithvi Academic Journal 3 : 11-21.
- Ridgeway G. 2007. Generalized Boosted Models: A guide to the gbm package. Update 1(1)
- Rossi M · Guzzetti F · Reichenbach P · Mondini AC and Peruccacci S. 2010. Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts. Geomorphology 114(3) : 129-142.
- Sabbioni C · Cassar M · Brimblecombe P and Lefevre RA. 2008. Vulnerability of cultural heritage to climate change. European and Mediterranean Major Hazards Agreement : 1-24.
- Taalab K · Cheng T and Zhang Y. 2018. Mapping landslide susceptibility and types using Random Forest. Big Earth Data 2(2) : 159-178.
- Tang H · Wasowski J and Juang CH. 2019. Geohazards in the three Gorges Reservoir Area China—Lessons learned from decades of research. Engineering Geology 261 : 105267.
- Vorpahl P · Elsenbeer H · Märker M and Schröder B. 2012. How can statistical models help to determine driving factors of landslides?. Ecological Modelling 239 : 27-39.
- Wang Y · Fang Z and Hong H. 2019. Comparison of convolutional neural networks for landslide susceptibility mapping in Yanshan County China. Science of the total environment 666 : 975-993.
- Wu Y · Ke Y · Chen Z · Liang S · Zhao H and Hong H. 2020. Application of alternating decision tree with AdaBoost and bagging ensembles for landslide susceptibility mapping. Catena 187 : 104396.
- Yang IT · Chun KS and Park JH. 2006. The effect of landslide factor and determination of landslide vulnerable area using GIS and AHP. Journal of Korean Society for Geospatial Information Science 14(1) : 3-12.
- Yi Y · Zhang Z · Zhang W · Xu Q · Deng C and Li Q. 2019. GIS-based earthquake-triggered-landslide susceptibility mapping with an integrated weighted index model in Jiuzhaigou region of Sichuan Province China. Natural Hazards and Earth System Sciences 19(9) : 1973-1988.