

## Assessment and Applicability Analysis of Dynamic Landslide Hazard Using Matrix Approach

Ki Dae Kim<sup>#</sup>, Min Jeng Kang, Chang Woo Lee<sup>+</sup>, Choong Shik Woo, Jun Pyo Seo

Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, 57 Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea

### Abstract

The models to predict when and where a landslide occurs were constructed with different purposes and scopes, but tended to be complementary to each other. The objective of this study was to convert the static landslide hazard into the dynamic landslide hazard and combine a spatiotemporal hazard matrix to assess it, in order to enhance the usability of the early warning system for landslide and the landslide hazard map developed by the Korea Forest Service. We applied various matrix evaluation models to develop scenarios and assess the 2017 landslide occurred in Cheonan, Korea. The results of this study showed that a simple combination of matrices facilitated quantitative evaluation of the dynamic landslide hazard and its accuracy was higher than the static landslide hazard map. In addition, the dynamic landslide hazard can be assessed for the near future by integrating the 1-hour prediction data provided by the Korea Forest Service. The results of this study can help maximize the utilization of the existing national landslide forecast system and landslide hazard map, which should enhance the efficiency of managing landslide-prone zones during the rainy season.

**Key words:** landslide, hazard, landslide early warning, landslide susceptibility map, matrix approach

### 1. 서론

산사태는 수문·지질학적 원인 등을 기반으로 한 자연재해로써 최근 세계적인 기후변화로 인해 그 피해가 증가하고 있다. 우리나라의 경우 국토의 60% 이상이 산악지대이고, 일정기간 동안 집중되는 극한강우 현상으로 인해 산사태 피해가 도시화 및 대형화되고 있다. 그 대표적인 사례가 2011년 서울 우면산, 춘

천 마적산 산사태이며, 이러한 사례는 산사태 예방에 있어 비구조물 대책의 필요성을 환기시켰다. 특히 비구조물 대책은 크게 산사태의 정확한 발생시점과 지점을 예측하는 부분으로써 비구조물 대책의 개발은 향후 미래지향적인 관점에서 중요한 과제이다(Lee, *et al.*, 2009).

산사태 발생시점 및 지점의 예측은 크게 물리기반 모형과 통계적 모형을 통해 수행할 수 있다. 이때, 물

<sup>#</sup> The 1st author: Ki Dae Kim, Tel. +82-2-961-2907, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. kkd9212@korea.kr

<sup>+</sup> Corresponding author: Chang Woo Lee, Tel. +82-2-961-2688, Fax. +82-2-961-2699, e-mail. leecwfr@korea.kr

리기반 산사태 발생 예측모형(사면안정해석)은 산사태 발생시점과 지점을 동시에 예측할 수 있는 장점이 있다. 그러나 많은 매개변수와 복잡한 연산과정이 전제되어야 하고, 신뢰성 있는 결과를 산출하기 위해서는 보다 정확한 입력자료가 요구된다. 이를 위한 전국 단위의 대면적 매개변수 조사는 많은 예산과 인력이 소요되기 때문에 대부분의 연구들이 유역, 사면단위 등의 국지적인 공간범위를 대상으로 하고 있다. 따라서 광역적인 공간해상도에서 산사태 발생 예측은 대부분 통계적(경험적) 방법에 의해 수행되며, 산사태 발생시점과 지점 예측을 이원화하고 있다.

이에 산림청은 효율적인 산사태 예방·대응을 위해 정책적으로 산사태 발생에 기인하는 외적요인과 내적요인의 관리를 이원화하고 있으며, 국가 산사태 예보체계(토양함수지수)와 산사태위험지도로 구분할 수 있다. 국가 산사태 예보체계는 산사태 예·경보(발생시점)의 기초자료로써 외적요인인 강우를 고려하여 1시간 이후의 산사태 위험정보(시간적 위험도)를 제공한다. 산사태위험지도의 경우 산사태 위험지 관리의 기초자료로써 내적요인인 지형, 지질, 수문, 식생, 토양 등을 고려한 산사태 발생확률(공간적 위험도)을 제공한다. 이와 같이 산사태 발생시점 및 지점 예측은 서로 다른 목적과 범위로 구축되었지만 상호보완적인 역할을 한다.

기구축된 국가 산사태 예보체계와 산사태위험지도는 각각 시공간적 위험도를 제공하고 있으나, 이를 활용하는 실무적 측면에 있어 활용방안을 향상시킬 수 있는 개선적인 연구가 수행되어야 한다. 특히 시공간적 위험도를 결합한 동적 산사태위험지도는 기존의 정적인 산사태위험지도와 달리 변화하는 산사태위험도를 표출함으로써 실무자 및 일반 대중의 산사태 위험지 관리에 도움이 될 수 있다(Segoni, et. al., 2018). 하지만 기도출된 시공간적 위험도를 결합하기 위해 새로운 가중치를 부여하는 것에는 어려움이 있으며, 이를 위해 시나리오(Kirschbaum, et. al., 2012; Li, et. al., 2017), 의사결정나무(Kirschbaum, et. al., 2015;

Kirschbaum & Stanley, 2018), 매트릭스(Thiebes, et. al., 2017; Segoni, et. al., 2018; Pradhan, et. al., 2019) 등 다양한 결합 방안이 검토된 바 있다. 이 중 매트릭스 기법은 간단한 행렬 조합만으로도 시공간적 위험도를 결합할 수 있는 장점이 있어 시간적 위험도에 따른 산사태위험등급 변화를 반영하기에 효과적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 선행연구(Thiebes, et. al., 2017; Segoni, et. al., 2018; Pradhan, et. al., 2019)에서는 단일 매트릭스 결합 방안을 토대로 동적 산사태위험도를 평가·검증하였고, 산사태 발생 예측에 대한 정확도만을 고려함으로써 안전한 지역에 대한 분별력은 고려하지 못했다.

이 연구에서는 기구축된 국가 산사태 예보체계와 산사태위험지도의 결합을 통해 동적 산사태위험도를 평가하고자 매트릭스 기법을 활용한 다양한 평가모형의 적용성 검증을 목적으로 하였다. 이를 위해 2017년 산사태 발생지인 충청남도 천안시를 대상지로 선정하였으며, 시나리오 및 실제 산사태 발생시점의 동적 산사태위험도를 평가·비교하였다. 이를 통해 적정 매트릭스 결합 방안을 선정하고, 동적 산사태위험도 평가에 대한 발전방향을 제시하였다.

## II. 연구방법

### 1. 시공간적 위험도의 매트릭스 결합

#### 1) 시간적 위험도 평가

이 연구에서 시공간적 위험도 평가는 산림청에서 구축한 국가 산사태 예보체계와 산사태위험지도를 입력자료로 활용하였다. 먼저, 국가 산사태 예보체계는 산사태 예·경보(발생시점)의 기초자료로써 외적요인인 강우를 고려하여 1시간 이후의 산사태 위험정보를 제공한다. 이를 위해 탱크모형 기반의 토양함수지수 개념을 활용하고 있으며, 토양함수지수란 토양저류량, 즉 토양 내 물의 양으로 정의된다. 따라서 강우의 침투 및 유출에 의해 토양 내 저류량이 변화하고, 토양 저류량이 지속적으로 증가하여 임계치를 넘게 되면

산사태 발생위험이 높다고 가정할 수 있다.

탱크모형은 각 탱크 및 유출구의 배치와 수를 조절하여 물의 유입과 유출을 간단하게 표현할 수 있는 응답모형으로써 Lee, et. al.(2009)이 탱크모형을 활용하여 토양저류량을 산정하는 방법을 제안하였다. 이후 강우 및 지질특성 등의 공간적 변이를 반영하기 위해 전국을 11개 권역으로 구분하였고, 시행착오법을 통해 산출된 탱크모형 매개변수(유출구의 크기 및 높이) 중 표준편차가 가장 적은 매개변수를 채택하였다. 각 권역별 탱크모형은 기상청에 제공하는 실황(ODAM, Observation Data Analysis Module) 및 예측강우량 자료(MAPLE; McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation)를 활용하여 매시간 토양함수지수(5km 해상도)를 산정하며, 임계치의 80%이상일 경우 산사태 주의보, 100%일 경우 산사태 경보에 해당하는 예측정보를 각 지자체에 읍·면·동 단위로 제공한다(Lee, et. al., 2015).

2) 공간적 위험도 평가

산사태위험지도는 산사태 위험지 관리의 기초자료로서 내적요인인 지형·지질, 수문, 식생, 토양 등을 고려한 산사태 발생확률을 제공한다. 특히 통계기반 모형은 기존 산사태 발생지에서 나타난 여러 인자별 특성을 토대로 산사태 발생에 관여하는 인자를 선정,

가중치를 부여함으로써 적용 범위를 비교적 쉽게 확대할 수 있는 장점이 있으나, 주관적(경험적) 요소를 배제할 수 없다(Choi, 1986). 이에 Woo, et. al.(2014)은 항공영상에서 추출한 전국 1,912개 산사태 발생원의 지형, 지질, 수문, 토양, 식생 등 13개 인자를 토대로 로지스틱 회귀모형을 이용하여 분석 과정에서 발생하는 주관적 요소를 최소화하였다. 그 결과, 지형(사면경사, 사면곡률, 사면방위, 집수길이), 지질(모암), 수문(지형습윤지수), 토양(토심), 식생(임상, 경급) 등 9개 인자를 반영한 산사태 발생확률 예측식을 도출하였으며, 전국 산지의 산사태 발생확률을 5등급으로 구분한 산사태위험지도(10m 해상도)를 구축하였다.

3) 매트릭스를 이용한 시공간적 위험도 결합 방안

이 연구에서는 내적요인에 대한 위험도가 높을수록 산사태를 유발하는 임계강우기준은 낮다는(Segoni, et. al., 2018) 가정 하에 토양함수지수(저류비율)와 산사태위험등급의 매트릭스 결합을 수행하였으며, 기도출된 산사태위험등급은 시간적 위험도에 해당하는 토양함수지수의 변화에 따라 조정된다. 이때, 토양함수지수는 현행 산사태위험지도에 근거하여 5등급으로 구분하였으며, 매트릭스 결합의 산출물인 동적 산사태위험도의 공간해상도 또한 10m로 설정하였다.

이 연구에서는 매트릭스 결합 방안과 시간적 위험도

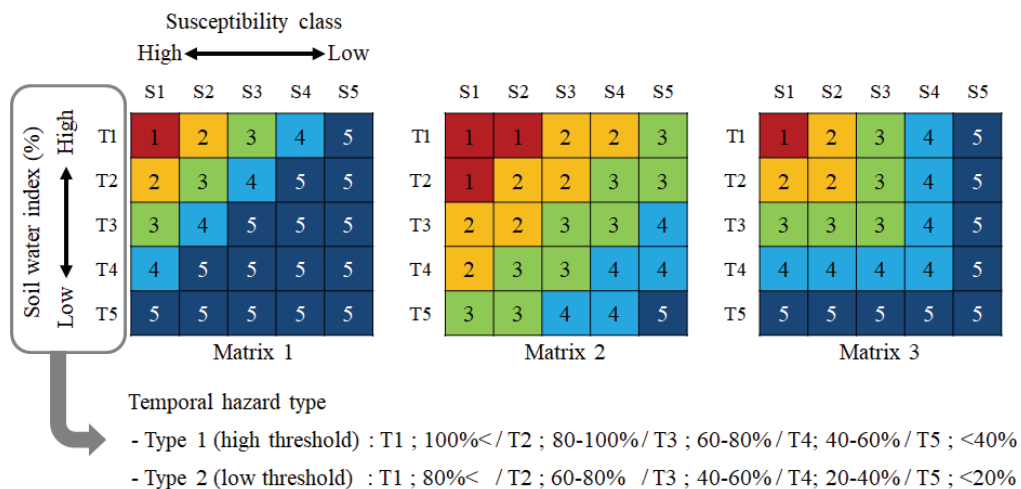


Figure 1. Matrix and temporal hazard type used for combining soil water index and susceptibility class

Table 1. Model used for combining soil water index and susceptibility class(reclassified by the <Figure 1>)

Matrix	Temporal hazard type	Model
Matrix 1	High	M1-H
Matrix 2		M2-H
Matrix 3		M3-H
Matrix 1	Low	M1-L
Matrix 2		M2-L
Matrix 3		M3-L

의 구분 기준을 조정한 다양한 평가모형을 활용하여 적용성을 검증하고자 하였다. 매트릭스 결합 방안은 단일 동적 산사태위험도의 시공간적 위험도 포함 범주에 의해 조정할 수 있는데, 이 연구에서는 시공간적 위험도 포함 범주 및 행렬 조합을 달리한 세 가지 매트릭스를 활용하였다(<Figure 1>). 시간적 위험도에 해당하는 토양함수지수(저류비율)의 경우 40%이상에서 20% 간격으로 구분하는 고임계기준과 0%이상에서 단순 20% 간격으로 구분하는 저임계기준으로써, 두 가지 방안으로 구분하였다(<Figure 1>). 즉, 이 연구에 활용된 평가모형은 세 가지 매트릭스와 두 가지 토양함수

지수 구분 기준을 조합한 총 6개로 <Table 1>과 같다.

2. 적용대상지 및 검증 방안

매트릭스 기법을 이용한 동적 산사태위험도 평가의 적용성을 검증하기 위한 공간적 범위로 2017년 산사태 피해지인 충청남도 천안시를 선정하였다(<Figure 2>). 천안시는 충청남도 동북부에 위치하고 있으며, 과거 30년(1981~2010) 동안의 연평균 기온은 약 11.8°C, 연평균강수량은 1,226.5mm로 강우의 약 70% 이상이 6월부터 9월까지 여름철 집중호우와 태풍에 의해 발생되었다(KMA, 2020).

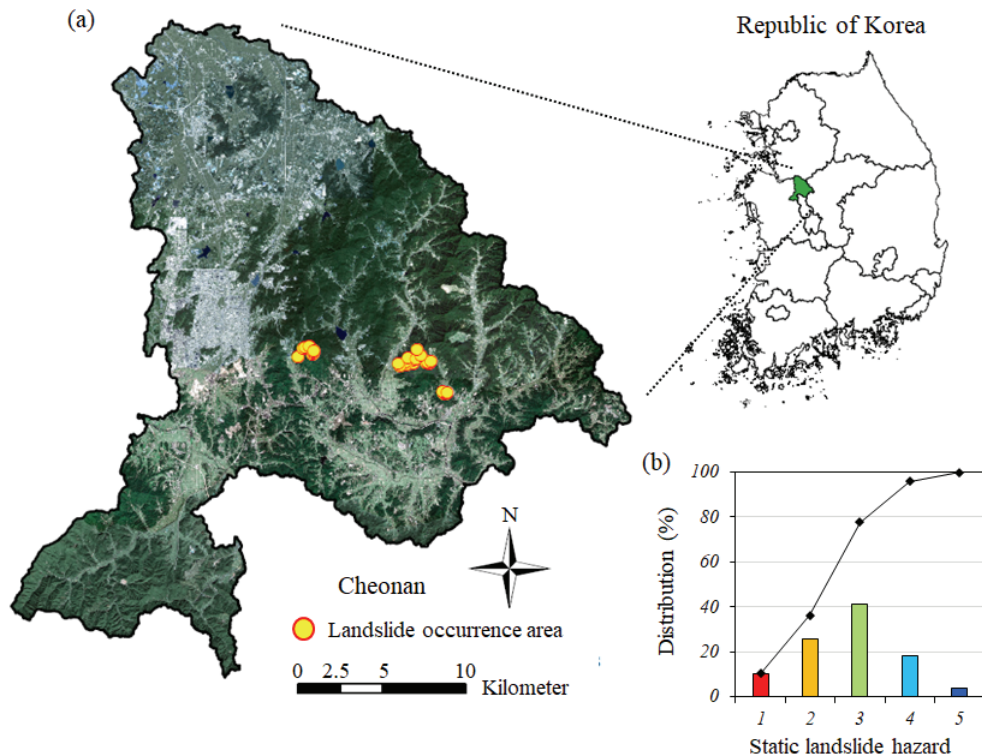


Figure 2. Location of the landslide occurred area(a) and distribution of static landslide hazard(b) in the study site

이 지역은 2017년 7월 14일부터 16일까지 이어진 집중호우로 산사태가 발생한 지역으로 7월 16일 오전 11시경 35개 발생원에서 동시다발적으로 발생하였다. 산사태 발생원은 II영급 리기다소나무가 우점하여 근계발달이 미흡할 뿐만 아니라, 경사 20° 이상의 옅은 사면(집수가 용이한 지형)으로 산사태 발생위험이 높은 지역이다. 더불어 산사태 발생지와 인접한 기상관측소(기상청 AWS 232)의 발생 전 3일간 누적강우량은 252.26mm로 나타났으며, 발생시점의 시강우량은 64.0mm/h로 나타나, 집중호우가 산사태 발생의 직접적인 원인으로 판단된다. 한편, 산사태위험지도는 전체 산사태 중 65.6%를 예측하였으며, 국가 산사태 예보체계에서 제공되는 예측정보는 해당 행정구역에 제공되어 모든 산사태를 적중하였다.

또한 매트릭스 기법을 이용한 동적 산사태위험도 평가의 적용성을 검증하기 위한 시간적 범위는 시나리오 및 실제 산사태 발생시점을 대상으로 하였다. 이때, 시나리오는 토양함수지수 구분 기준과 동일하게 5등급으로 구분하였고, 실제 산사태 발생시점의 토양함수지수는 실황 강우량을 반영한 저류비율을 이용하였다. 이후 평가모형의 적용성을 검증하기 위해서 SR (Success Rate) 지수와 MSR(Modified Success Rate) 지수를 이용하였다. SR 지수는 실제로 발생한 산사태 중 평가모델에 의해 정확하게 평가된 비율로써, 식(1)에 의해 계산할 수 있다. MSR 지수는 SR 지수와 산사태 위험도가 낮은 안전한 지역에 대한 분별력을 함께 고려한 것으로써, 식(2)에 의해 계산할 수 있다(Huang & Kao, 2006).

$$SR = \frac{CPP}{NMP} \quad (1)$$

$$MSR = 0.5 \times SR + 0.5 \times \frac{PSC}{NSC} \quad (2)$$

여기서, NMP=실제로 발생한 산사태 건수, CPP=정확하게 예측된 산사태 건수, NSC=안전한 격자 개수, PSC=정확하게 예측된 안전한 격자 개수이다. SR 지수

산정 시 산사태 발생원 내 가장 위험도가 높은 격자의 토층이 붕괴하면서 산사태가 유발되었으며, 동적 산사태위험 1~2등급지를 산사태 발생 위험지역으로 규정하였다. 따라서 산사태 발생원 내 동적 산사태위험 1~2등급지가 포함될 경우 정확히 평가되었으며, 반대의 경우 평가가 제대로 이루어지지 않았다고 할 수 있다.

### III. 연구결과

#### 1. 동적 산사태위험도 평가

##### 1) 시나리오별 적용 및 검증

시나리오별 동적 산사태위험도 평가에서는 토양함수지수 구분 기준을 고려하지 못한다. 따라서 토양함수지수 등급 구분의 영향을 배제한 매트릭스의 시공간적 위험도 포함 범주에 따른 적중률을 평가하게 된다.

SR 지수를 이용하여 매트릭스 결합 방안별 적중률을 평가한 결과, 매트릭스 2는 전체 산사태 중 평균 58.1%를 적중하여 가장 높은 적중률을 보였다. 그에 비해 매트릭스 1과 3은 각각 전체 산사태 중 평균 18.7%, 26.2%를 적중하였으며, 시간적 위험도가 높은 시나리오(T1-T2)에서도 적중률이 저조하여 미예측율이 높은 모형이었다. 이러한 결과는 단일 동적 산사태 위험등급의 시공간적 위험도 포함 범주와 밀접한 관계를 나타내는 것으로, 매트릭스 2와 같이 고위험등급의 포함 범주가 넓은 매트릭스의 정확도가 상대적으로 높았다. 하지만 이는 역설적으로 동적 산사태위험도의 과대평가로 모형의 정밀도를 감소시킬 수 있기 때문에 적중률(SR)과 정밀도(MSR)가 함께 고려된 매트릭스를 선정할 필요가 있다.

이를 위해 MSR 지수를 이용하여 매트릭스 결합 방안별 적중률을 평가한 결과 또한 매트릭스 2가 평균 59.1%로 가장 높게 산정되어 비교적 좋은 정확도를 나타내었다. 그에 비해 매트릭스 1과 3은 각각 평균 54.7%, 55.8%로 산정되어 매트릭스 2안에 비해 정확도가 낮은 평가모형이었다(<Figure 3>).

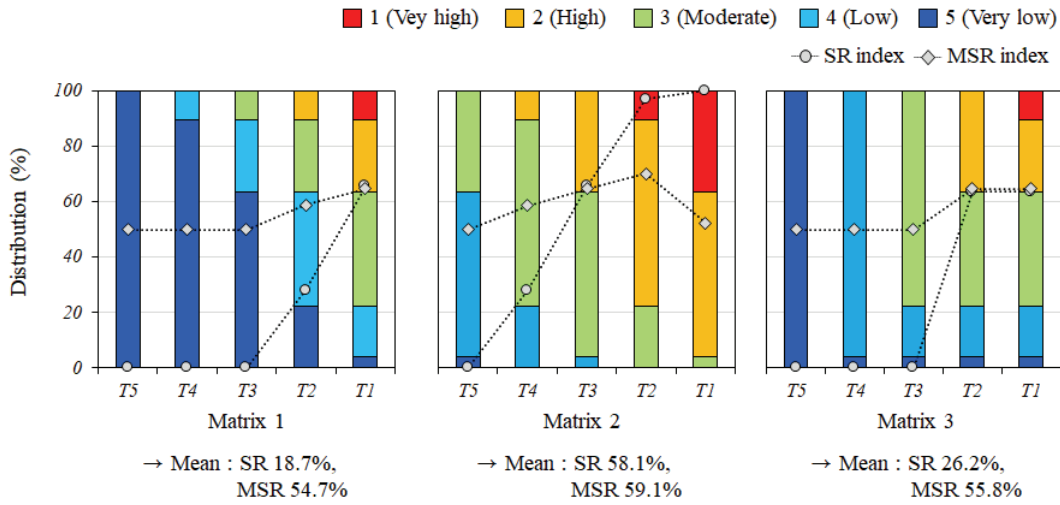


Figure 3. SR and MSR used three matrix model by different temporal scenario (T1; very high, T2; high, T3; moderate, T4; low, T5; very low)

2) 실제 산사태 발생시점의 적용 및 검증

SR 지수를 이용하여 실제 산사태 발생시점의 평가 모형별 적중률을 검증한 결과, 평가모형 M2-L이 모든 산사태(100.0%)를 적중하였다. 이는 전술한 바와 같이 고위험등급의 포함 범주가 넓은 매트릭스와 더불어 토양함수지수 구분 기준 중 저임계기준을 활용함으로써 타 평가모형에 비해 동적 산사태위험도 임계기준이 낮아지기 때문이다. 이외에 평가모형 M2-H(84.4%), M3-L(65.6%), M1-L(53.1%), M3-H(40.6%), M1-H(25.0%) 순의 적중률을 보였고, 시나리오별 동적 산사태위험도 적용 결과와 동일하게 매트릭스 2안을 활용한 평가모형이 상대적으로 높은 적중률을 보였다(<Table 2>).

MSR 지수를 이용하여 평가모형별 적중률을 검증한 결과, 대부분의 평가모형이 약 60~75%의 유사한 적중률을 나타내었다(<Table 2>). 이 중 평가모형

M1-H은 산사태 발생원을 안정하다고 평가함으로써 미예측률이 높고, 반대로 평가모형 M2-L은 산사태 발생원과 안정한 지역을 모두 위험한 것으로 평가하여 오보율이 높은 평가모형이라 할 수 있다. 이러한 경우 산사태 발생 예측에 대한 적중률과 안정한 지역에 대한 분별력을 모두 고려할 수 있는 평가모형을 선정할 필요가 있다. 따라서 단순 적중률뿐만 아니라 안정한 지역에 대한 분별력을 고려할 경우 평가모형 M2-H 또는 M3-L의 정확도가 가장 뛰어나다고 할 수 있다(<Figure 4>). 특히 자연재해의 발생은 불확실성이 크지만, 한 번의 발생으로 막대한 사상자와 재산피해를 발생시키기 때문에 국민의 안전을 우선적으로 고려해야한다. 이에 평가모형 M2-H는 적중률이 높을 뿐만 아니라 미예측율과 오보율을 최소화할 수 있는 합리적인 방안으로 판단된다.

이처럼 매트릭스 결합 방안은 간단한 행렬 조합으

Table 2. SR and MSR used six matrix model at the landslide occurred time

Model	0.5(CCP/NMP)	0.5(PSC/NSC)	MSR
M1-H	0.125	0.470	0.595
M2-H	0.422	0.319	0.741
M3-H	0.203	0.459	0.662
M1-L	0.266	0.439	0.704
M2-L	0.500	0.176	0.676
M3-L	0.328	0.388	0.716

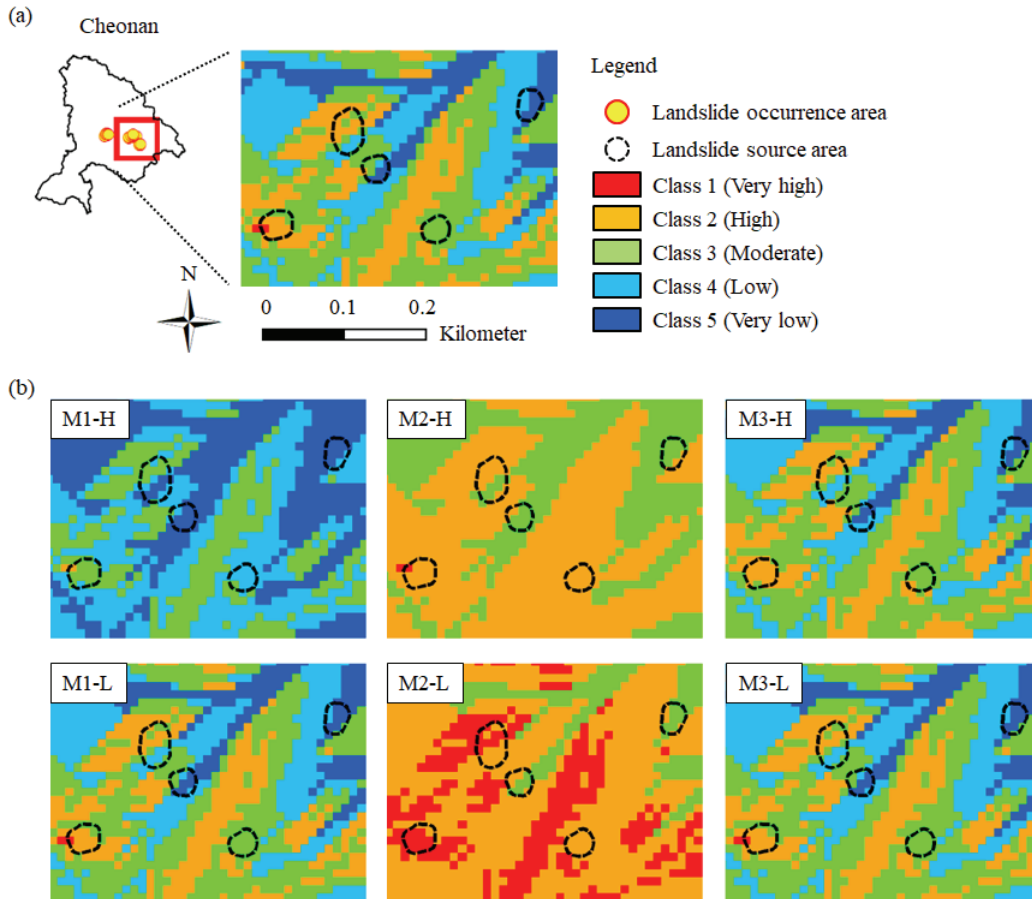


Figure 4. Example of static landslide hazard(a) and dynamic landslide hazard(b) used six model at the landslide occurred time

로 동적 산사태위험도를 평가할 수 있으므로 광역적으로 물리모형을 적용하기 어려운 경우 대체 평가모형으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 더불어 이 연구에서는 선행연구에서 고려되지 않았던 안정한 지역에 대한 분별력을 고려함으로써 동적 산사태위험도 평가의 실효성을 향상시켰다는 점에 의의가 있다.

## 2. 동적 산사태위험도 평가를 위한 제언

현행 국가 산사태 예보체계는 현시점에서 1시간 후의 위험도를 예측한다. 따라서 1시간 후의 예측정보와 산사태위험지도의 결합을 통해 단기적인 미래의 동적 산사태위험도를 평가할 수 있다. 이에 동적 산사태위험도의 예측 정확도를 향상시키기 위해서는 보다 정확한 예측정보를 기반으로 해야 한다. 현행 국가 산사태 예보체계에서는 레이더관측자료 기반의 MAPLE

자료를 이용하고 있으나, 추후에도 예측정보의 정확도 향상을 위해서는 신뢰성이 높은 강우자료를 확보해야한다고 지적된 바 있다(Lee, *et. al.*, 2015). 이에 산사태 예보에 있어 레이더 강우자료 및 수치예보모델의 적용성에 대한 연구가 수행되기도 했다(Choi, *et. al.*, 2013; Kim & Shon, 2014). 장기적으로는 산사태가 발생하는 산지의 정밀한 강우량을 반영하기 위해서 산악지역의 관측자료를 활용하는 것이 예측정보의 정확성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다(Lee, *et. al.*, 2015).

더불어 동적 산사태위험도의 활용성을 향상시키기 위해서는 공간해상도를 확장시킬 필요가 있다. 즉, 사면, 유역 또는 행정구역별 동적 산사태위험도에 대한 표출을 차별화할 필요가 있다. 실제로 격자 단위 매트릭스 결합에 그쳤던 동적 산사태위험도 평가 연구

(Thiebes, *et. al.*, 2017; Segoni, *et. al.*, 2018; Pradhan, *et. al.*, 2019)는 유역 및 행정구역(Berengure, *et. al.*, 2015; Segoni, *et. al.*, 2015) 등 다양한 공간해상도에 따라서 수행되기도 하였다. 그 대표적인 예로 슬로베니아에서는 임계강우기준과 산사태위험지도의 결합을 통해 공간해상도별 동적 산사태위험도를 예측하는 ‘Masprem’이라는 국가 산사태 예보체계를 구축하고 있다(Auflič, *et. al.*, 2016). 이처럼 공간해상도에 따라서 동적 산사태위험도 표출을 차별화한다면 현행 국가 산사태 예보체계와의 연계성을 고려해야 한다.

현행 국가 산사태 예보체계에서는 1시간 이후의 토양함수지수를 토대로 주의보·경보에 해당하는 산사태 예측정보를 읍·면·동 단위로 제공한다. 이후 해당 행정구역의 산사태 예측정보 및 기상상황을 종합적으로 고려하여 시·군·구청장의 권한으로 산사태 위험예보를 발령한다(Lee, *et. al.*, 2015). 이때, 실무에서는 서로 다른 행정구역에서 동일한 시간적 위험 수준일지라도 위험지역의 거주민 대피 및 산사태 현장 예방단 배치를 위해서 어떠한 행정구역이 상대적으로 더 위험한지에 대한 의사결정이 필요하다. 이에 행정구역별로 동적 산사태위험도를 표출한다면 직관성뿐만 아니라 실무자 및 비전문가의 산사태위험지 관리 효율성을 향상시킬 수 있을 것이다. 추후 행정구역별로 동적 산사태위험도를 표출하게 된다면 새로운 위험등급 구분이 필요하며, 11개 권역으로 구분된 현행 국가 산사태 예보체계에 최적의 평가모형을 적용하기 위해서는 보다 많은 지역을 대상으로 검증이 필요할 것이다.

#### IV. 결론

산림청은 효율적인 산사태 예방·대응을 위해 정책적으로 시공간적 위험도의 관리를 이원화하고 있다. 이에 따라 기구축된 국가 산사태 예보체계와 산사태위험지도는 서로 상이한 목적과 범위를 대상으로

구축되었지만 상호보완적인 역할을 수행한다. 이 연구에서는 국가 산사태 예보체계 및 산사태위험지 관리의 기초자료로 활용되는 토양함수지수와 산사태위험지도의 활용성을 증진시키고자 시공간적 위험도의 결합 방안을 검토하고, 향후 동적 산사태위험도 평가에 대한 발전방향을 제시하였다.

토양함수지수와 산사태위험지도를 결합하기 위해 매트릭스 기법을 적용한 결과, 간단한 행렬 조합만으로 동적 산사태위험도의 정량적 평가를 가능케하였고 기존의 산사태위험지도에 비해 비교적 높은 정확도를 나타내었다. 이를 통해 매트릭스 기법을 활용한 시공간적 위험도의 결합은 동적 산사태위험도 평가에 있어 보다 개선적이고 효과적인 방법임을 입증하였다. 따라서 산사태 예보체계 및 산사태위험지도가 구축되어있는 지역을 대상으로 공간해상도를 보다 쉽게 확장할 수 있다는 장점이 있으며, 광역적으로 물리모형을 적용하기 어려운 경우 대체 평가모형으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 기도출된 토양함수지수와 산사태위험지도는 통계모형에 의해 수행되었기 때문에 시공간적 위험도의 매트릭스 결합에 있어 토양의 물리성과 같은 토양 내부의 특성뿐만 아니라 강우의 차단 및 증발산과 같은 물리적 접근이 고려되지 않았다. 또한 임계강우기준과 산사태위험지도는 평가대상지 또는 연구자마다 상이하므로 단일 매트릭스 결합 방안에 의해 표준화하는 것은 어렵다.

그럼에도 이 연구결과는 물리기반 산사태 발생 예측모형이 아닌 매트릭스 기법을 활용해 시공간적 위험도의 결합 및 동적 산사태위험도 평가를 시도했다는 점, 그리고 기구축된 국가 산사태 예보체계와 산사태위험지도의 활용성을 극대화할 수 있는 점에 의의가 있다. 향후 이 연구결과가 국가 산사태 예보체계 및 산사태위험지도 활용에 있어 실무자 및 비전문가의 직관성과 활용도를 향상시킴으로써 위기 시의 산사태위험지 관리 효율성 제고에 기여할 수 있을 것이다.

## References

- Aufličič, M., J. Šinigoj, M. Krivic, M. Podboj, T. Peternel, and M. Komac. 2016. Landslide Prediction System for Rainfall Induced Landslides in Slovenia(Masprem). *Geologija*. 59(2): 259-271.
- Berengurer, M., D. Sempere-Torres, and M. Hürlimann. 2015. Debris-flow Forecasting at Regional Scale by Combining Susceptibility Mapping and Radar Rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 15(3): 587-602.
- Choi, Kyeng. 1986. Landslides Occurrence and Prediction in Korea. Ph.D. Dissertation. Kangwon National University.
- Choi, Yun Seok, Cheon Kyu Choi, Kyung Tak Kim, and Joo Hun Kim. 2013. Evaluation of the Application of Radar Data for Local Landslide Warning. *Journal of Wetlands Research*. 15(2): 191-201.
- Huang, J. C. and S. J. Kao. 2006. Optimal Estimator for Assessing Landslide Model Performance. *Hydrology and Earth System Science*. 10(6): 957-965.
- Kim, Sun Jun and Chul Shon. 2014. KLAPS, Composite Precipitation on the Korean Peninsula, Automatic Weather System Data for Landslide Risk Assessment. Proceeding of the Annual Conference of KOSHAM.
- Kirschbaum, Dalia Bach and Thomas Stanley. 2018. Satellite-based Assessment of Rainfall-triggered Landslide Hazard for Situational Awareness. *Earth's Future*. 6(3): 505-523.
- Kirschbaum, Dalia Bach, Robert Adler, Yang Hong, Sujay Kumar, Christa Peters-Lidard, and Arthur Lerner-Lam. 2011. Advances in Landslide Nowcasting: Evaluation of a Global and Regional Modeling Approach. *Environmental Earth Sciences*. 66(6): 1683-1696.
- Kirschbaum, Dalia Bach, Thomas Stanley, and J. Simmons. 2015. A Dynamic Landslide Hazard Assessment System for Central America and Hispaniola. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 15(10): 2257-2272.
- Korea Meteorological Administration(KMA). 2020. <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>.
- Lee, Chang Woo, Dong Yeon Kim, Choong Shik Woo, You Seung Kim, Jun Pyo Seo, and Hyun Jung Kwon. 2015. Construction and Operation of the National Landslide Forecast System Using Soil Water Index in Republic of Korea. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*. 15(6): 213-221.
- Lee, Chang Woo, Ho Jung Yoon, and Choong Shik Woo. 2009. Development and Verifying of Calculation Method of Standard Rainfall on Warning and Evacuation for Forest Soil Sediment Disaster in Mountainous Area by Using Tank Model. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 98(3): 272-278.
- Li, Wei Yue, Chun Liu, Marco Scaioni, Sun Wei Wei, Yu Chen, Dongjing Yao, Sheng Chen, Yang Hong, KiaHang Zhang, and GuoDong Cheng. 2017. Spatio-temporal Analysis and Simulation on Shallow Rainfall-induced Landslides in China Using Landslide Susceptibility Dynamics and Rainfall I-D Thresholds. *Science China Earth Sciences*. 60(4): 720-732.
- Pradhan, Ananta Man Singh, Seung Rae Kim, and Yun Tae Kim. 2019. A Shallow Slide Prediction Model Combining Rainfall Threshold Warnings and Shallow Slide Susceptibility in Busan, Korea. *Landslides*. 16(3): 647-659.
- Segoni, Samuele, Daniela Lagomarsino, Riccardo Fanti, Sandro Moretti, and Nicola Casagli. 2015. Integration of Rainfall Thresholds and Susceptibility Maps in the Emilia Romagna (Italy) Regional-scale Landslide Warning System. *Landslides*. 12(4): 773-785.
- Segoni, Samuele, Veronica Tofani, Ascanio Rosi, Filippo Catani, and Nicola Casagli. 2018. Combination of Rainfall Thresholds and Susceptibility Maps for Dynamic Landslide Hazard Assessment at Regional Scale. *Frontiers in Earth Science*. 6(85): 1-11.
- Thiebes, Benni, Shibiao Bai, Yanan Xi, Thomas Glade, and Rainer Bell. 2017. Combining Landslide Susceptibility Maps and Rainfall Thresholds Using a Matrix Approach. *Revista de Geomorfologie*. 19(1): 58-74.
- Woo, Choong Shik, Hyeon Jung Kwon, Chang Woo Lee, and Kyeong Ha Kim. 2014. Landslide Hazard Prediction Map Based on Logistic Regression Model for Applying in the Whole Country of South Korea. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*. 14(6): 117-123.

*Korean References Translated from the English*

기상청(KMA). 2020. <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>.

김선준, 손철. 2014. 산사태 위험도 평가와 KLAPS, 한반도강수 합성장, 기상관측자료의 이용. 한국방재학회 학술발표대회 논문집.

우충식, 권현정, 이창우, 김경하. 2014. 로지스틱 회귀모형을 이용한 전국 산사태 발생위험 예측지도 개발. 한국방재학회 논문집. 14(6): 117-123.

이창우, 김동엽, 우충식, 김유승, 서준표, 권현정. 2015. 토양함수 지수를 이용한 국가 산사태 예보체계 구축 및 운영. 한국방

재학회논문집. 15(6): 213-221.

이창우, 윤호중, 우충식. 2009. Tank Model을 이용한 산지토사재해 경계피난 기준수량 산정법 개발 및 검토. 한국산림과학회지. 98(3): 272-278.

최경. 1986. 한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구. 박사학위논문. 강원대학교.

최윤석, 최천규, 김경탁, 김주훈. 2013. 국지적 산사태 발생예보를 위한 레이더 자료의 활용성 평가. 한국습지학회지. 15(2): 191-201.

---

Received: Sep. 3, 2020 / Revised: Sep. 14, 2020 / Accepted: Sep. 14, 2020

## 매트릭스 기법을 활용한 동적 산사태위험도 평가기법 개발 및 적용성 분석

**국문초록** 산사태 발생시점 및 지점을 예측하기 위한 연구는 서로 다른 목적과 범위로 구축되었지만 상호보완적인 역할을 한다. 따라서 이 연구에서는 산림청에서 구축한 산사태 예보체계와 산사태위험지도의 활용성을 높이고자 정적 산사태위험도를 동적 산사태위험도로 변환하고, 이를 평가하기 위해 시공간적 위험도의 매트릭스 결합을 수행하였다. 2017년 산사태 발생지인 충청남도 천안시의 시나리오 및 실제 산사태 발생시점을 대상으로 다양한 매트릭스 평가모형을 적용한 결과, 간단한 행렬 조합으로 동적 산사태위험도의 정량적 평가를 가능케 하였으며, 정확도 또한 기존의 산사태위험지도에 비해 높게 나타났다. 또한 산림청에서 제공하는 1시간 이후의 산사태 예측정보와 결합을 통해 단기적인 미래의 동적 산사태위험도를 평가할 수 있는 점에 의의가 있다. 이 연구결과는 기구축된 국가 산사태 예보체계와 산사태위험지도의 활용성을 극대화함과 동시에 위기 시의 산사태위험지 관리 효율성 향상에 기여할 수 있을 것이다.

**주제어** : 산사태, 위험도, 산사태 조기경보, 산사태위험지도, 매트릭스 기법

- Profiles**
- Ki Dae Kim** : He received his master's degree in agriculture from Gyeongnam National University of Science and Technology in February 2017 with his master's paper titled "Studies of Runoff and Nutrient Characteristics on Pinus densiflora Stand at Mt. Wora in Jinju". He is currently working as a assistant researcher to the Forest Disaster Management Division in the National Institute of Forest Science. His current research interest includes landslide prediction and forecast(kkd9212@korea.kr).
- Min Jeng Kang** : She received her master's degree in agriculture from Gyeongnam National University of Science and Technology in February 2016 with her master's paper titled "Study of Degradation Status on the Forest Trails focused Urban Forest Parks". She is currently working as a assistant researcher to the Forest Disaster Management Division in the National Institute of Forest Science. Her current research interest includes slow-moving landslide(k0711@korea.kr).
- Chang Woo Lee** : He received his Ph.D. in agriculture from The University of Tokyo University in March 1998 with his Ph.D. paper titled "模擬根系の土質強度補強効果に関する研究: 土壤水分制御下における単純せん断試験による解析". He is currently working as a senior researcher for Forest Disaster Management Division in the National Institute of Forest Science. His current research interest includes soil and landslide mechanism(leecwfr@korea.kr).
- Choong Shik Woo** : He received his Ph.D. in engineering from Inha University in February 2011 with his Ph.D. paper titled "Development of the Restoration Method of Topography for Debris Flow Area using Airborne LiDAR Data". He is currently working as a researcher to the Forest Disaster Management Division in the National Institute of Forest Science. His current research interest includes forest disaster management using UAV and GIS technique(woocs@korea.kr).
- Jun Pyo Seo** : He received his Ph.D. in agriculture from Yeongnam University in February 2019. with his Ph.D. paper titled "Analysis on the Characteristics of Sediment Discharge in Forested Watersheds using the Acoustic Sensor and Pit Sampler". He is currently working as a researcher to the Forest Disaster Management Division in the National Institute of Forest Science. His current research interest includes sediment discharge and soil erosion control(seojunpyo@korea.kr).