

SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 예측

장현석 · 이상희 · 김재수*

충북대학교 산림학과

The Prediction of Landslide Potential Area Using SHALSTAB

Hyeon Seok Jang, Sang Hee Lee and Je Su Kim*

Department of Forest Science, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

요 약: 최근 우리나라에서는 집중호우로 인하여 산사태의 발생이 증가하며 인명 및 재산피해가 늘고 있다. 본 연구에서는 산사태 발생에 직접적으로 영향을 주는 강우강도에 따른 산사태 위험지를 예측하고자 SHALSTAB(Shallow Landsliding Stability Model)을 이용하였다. SHALSTAB의 매개변수인 투수량계수의 값은 19.58 m²/day, 내부마찰각은 36.3°, 포화단위중량은 2.03 t/m³로 결정되었다. 이러한 매개변수를 이용하여 구한 지형지수에 따라서 본 연구지역의 사면안정 상태를 무조건 안정, 안정, 불안정, 무조건 불안정의 4가지 형태로 구분하였다. SHALSTAB의 적용성을 평가하고자 기존에 발생하였던 263 mm 강우에서 사면이 불안정해지는 지역과 산사태 발생지에 대한 데이터베이스를 구축하여 이를 비교하였다. 정확도 검정 결과 85.1% 일치하였다. SHALSTAB을 이용하여 강우강도에 따른 산사태 발생 위험지역을 판별하는데 활용이 가능한 것으로 생각된다.

Abstract: Landslides, one of earth's natural disasters, increase every year due to heavy rainfall, and cause damage to human life and assets. This study used the SHALSTAB to predict places at risk of landslides, in accordance with the intensity of rainfall. The parameter value of transmissivity was 19.58 m²/day, the internal friction angle 36.3°, and the saturated unit weight 2.03 t/m³. The slope stability status was classified into four categories, namely: unconditionally stable, stable, unstable and unconditionally unstable. In order to evaluate the applicability of the SHALSTAB, actual landslide areas were checked, with the unstable area under 263 mm rainfall. 85.1% of them were consistent. And so we can identify the distribution of places at risk of landslides, on the basis of the intensity of rainfall by means of SHALSTAB.

Key words: shallow landslide, SHALSTAB, rainfall intensity

서 론

산사태는 산림지역에서 발생하는 대표적인 자연재해로 우리나라에서 해마다 6~9월에 많이 발생되고 있다. 특히, 여름 장마철 및 태풍, 기후변화로 인한 집중호우의 증가 등으로 인하여 산사태의 우려가 더욱 더 커지고 있다. 우리나라 산지에서 발생하는 산사태의 붕괴는 대부분 표층 붕괴로 깊이가 1 m 내외로 발생하는 곳이 가장 많으며(Woo et al., 1978; Choi, 1986; Kim, 2000; Ma et al., 2007), 산사태 발생 요인들 중에 강우가 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났다(Hong et al., 1990; Kim et al., 2006; Lee, 2005; Min, 2006; Yang et al., 2007). 최근

집중호우의 발생 빈도 증가로 산사태의 발생 또한 증가하고 있으며, 강우요인이 산사태 발생의 중요한 요인으로 인식되고 있다.

산림지역에서 발생하는 대부분의 산사태는 경사가 급한 지역에서 발생하고 있으며 2차적으로 토석류(debris flow)를 유발하여 하류에 많은 피해가 발생하고 있다. 또한, 토석류는 매년 우리나라에 적지 않은 인명과 재산에 피해를 입히고 있다(Lee, 2010). 산사태와 토석류로 인한 피해의 예로 2011년 7월 기습적인 집중호우로 서울 및 춘천지역에 많은 인명 및 재산피해가 발생하였다. 우리나라에서 지난 10년간 산사태가 발생한 산림면적은 7,790 ha이며, 이로 인해 112명이 사망하였으며, 1,552 km의 임도가 피해를 받았다.

산사태로 인한 인명과 재산피해를 예방하기 위한 산사태 위험지 해석에 대한 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있

본 연구는 충북대학교 2012 학술 연구비에 의하여 수행되었음.
*Corresponding author
E-mail: kimjesu@chungbuk.ac.kr

다. 첫째, 산사태 유발인자들과 산사태 발생빈도와의 상관관계에 대하여 발생가능성을 추정하여 산사태 취약성을 평가하는 통계적 기법과 둘째, 수문·역학에 기반을 둔 방법으로 지형, 토질, 강우 등의 산사태 유발인자들을 수문모델과 무한사면안정모델에 적용하여 산사태 위험성을 평가하는 방법인 결정론적 기법이다. 통계적 기법은 산사태 발생에 있어서 수문역학적인 고려 없이 요인간의 통계적인 분석만 수행한다. 이러한 이유로 기상이변으로 인한 예상외의 강한 집중호우에 의한 산사태 발생 시에는 위험의 예측 및 판별이 어렵다는 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 산사태 위험지 분석에 있어서 통계적 기법의 한계점을 보완하고자 결정론적 기법 중 하나인 SHALSTAB을 이용하여 산사태 발생에 직접적으로 영향을 주는 강우강도에 따른 산사태 위험지를 분석하고자 한다. 또한 SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석 결과와 산사태 발생지와의 정확도를 검증을 통하여 SHALSTAB의 적용성을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

본 연구에서는 월악산국립공원을 대상으로 산사태 위험지 분석을 수행하였다. 월악산국립공원은 충주, 제천, 단양, 문경 등 4개 시군에 걸쳐 있으며, 북으로는 소백산, 남으로는 속리산국립공원 사이에 위치하고 있으며 지질은 대부분 흑운모 화강암으로 구성되어 있다. 연구지역의 총면적은 259.7 km²로 암석지 및 비산림지역은 제외하였다.

월악산국립공원의 30년간의 연평균기온은 11.2°C이며 연평균강수량은 1,212.7 mm이다. 산림청 산사태 예보 기준에 따라 일강우량이 80 mm 이상인 경우에 산사태 주의보가 발생하며 150 mm 이상에서 산사태 경보가 발생한다. 30년간 80 mm 이상의 일강우량은 59건이 발생하였으며 150 mm 이상의 일강우량은 11건이 발생하였다.

2. 연구방법

1) 배경이론

본 연구에서는 Montgomery and Dietrich(1994, 1998)가 제안한 분포형 수문모델과 무한사면 안정모델을 결합한 모델을 이용하였다.

(1) 수문모델

정상상태의 천층지중수와 포화상태의 지표유출에 대하여 다음과 같이 주어진다.

$$qa - TMb = udb \tag{1}$$

여기서, q : 강우량(m/day)

a : 유역면적(m²)

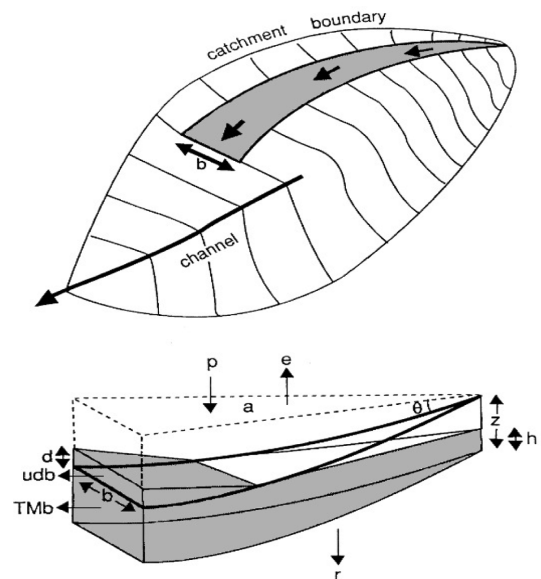


Figure 1. The geometry and routing of water of the landscape (Dietrich et al., 1998).

b : 등고선의 폭(m)

T : 투수량계수(m²/day)

M : 경사도(sin θ)

u : 유출속도(m/day)

d : soil depth(m)

식 1은 정상상태에서의 총 유출량과 포화된 상태의 지중수의 차가 지표수라는 단순한 식이다. 이런 상태를 유지하면 지표면의 어느 지점에서는 포화상태일 것이며 식 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{a}{b} \geq \frac{T}{q} M \tag{2}$$

Figure 1에서 지표 유출과 지하수 함양이 없고 기반암에서의 흐름도 없다고 가정을 하면 정상상태에서의 특정 격자의 너비(b)를 통과하여 발생하는 지중수는 유효강우량(q)과 상부유역면적(a)의 곱으로 나타낼 수 있다. 지중수를 기술하는 Darcy 법칙은 공극을 가지는 토양의 특성이 균일하고, 동질성을 가지며, 대수층 내에 모관수대가 존재하고 있다는 가정을 전제로 한다. 이것을 Darcy 법칙 적용하여 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$qa = K_s h c \cos \theta \sin \theta b \tag{3}$$

여기서, K_s : 포화된 토양의 수리전도도

(투수계수, m/day)

h : 포화대의 두께(m)

sin θ : 수두경사

Figure 1에서 보는 것과 같이 포화상태의 지표하유출(TMb)에서 투수계수(hydraulic conductivity)는 토심 전체

에 걸쳐 균등하다고 가정을 하면 투수량계수 로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TMb = k_s z \cos \theta \sin \theta b \tag{4}$$

여기서, z 는 전토심이다.

식 3과 식 4를 식 2에 대입한 결과 본 연구에서 사용되어 지는 수문 모델은 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h}{z} = \frac{q}{T} \frac{a}{b \sin \theta} = W \tag{5}$$

여기서, W 는 습윤지수이다.

(2) 무한사면안정모델

Mohr-Coulomb 파괴이론을 바탕으로 무한사면 안정모델은 식 6과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \phi \tag{6}$$

여기서, C : 점착력(N/m²)

σ : 수직응력(N/m²)

u : 수직 하중과 반대방향의 간극수압(N/m²)

ϕ : 파괴면에서의 내부마찰각(°)

전단강도와 수직응력, 간극수압 등은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u &= \gamma_w g h \cos^2 \theta \\ \tau &= \gamma_s g z \cos \theta \sin \theta \end{aligned} \tag{7}$$

$$\sigma = \gamma_s g z \cos^2 \theta$$

여기서, γ_w : 물의 단위중량(kg/m³)

γ_s : 포화단위중량(kg/m³)

g : 중력가속도(m/s²)

h : 지하수위(m)

z : 토심(m)

식 7을 식 6에 대입하여 사면이 불안정해져서 산사태가 발생하는 지하수위의 비인 에 대하여 정리하면 식 8과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{h}{z} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \tag{8}$$

(3) 사면안정분류

수문모델인 식 5와 식 8을 h/z 을 이용하여 결합하면 수문학적 비인 식 9와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{q}{T} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{b}{a} \sin \theta \tag{9}$$

식 9를 이용하여 사면 안정 여부를 Table 1과 같이 설정하였다.

무조건 안정한 지역은 h/z 가 1.0을 초과하여 토양이 포

Table 1. Slope stability classes in SHALSTAB.

STABILITY FIELD	Condition
Unconditionally stable	$\tan \theta \leq \tan \phi \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \right)$
Stable	$\frac{a}{b} < \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} \sin \theta$
Unstable	$\frac{a}{b} \geq \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} \sin \theta$
Unconditionally unstable	$\tan \theta > \tan \phi$

화되더라도 붕괴 없이 지표유출이 나타나는 지역이다. 무조건 불안정 지역은 주로 암석노출지역이나 토양이 거의 없는 지역에서 나타나며 어떤 지점에서 경사도가 내부마찰각보다 크거나 같은 지역으로 토양이 건조하더라도($h/z=0$) 불안정하게 된다. 안정한 지역과 불안정한 지역은 수문학적 비인 h/z 에 의해 결정된다. 연구지역에서 각각의 $\log(q/T)$ 값에 대하여 안정/불안정의 범위를 나타내는 것으로 각각의 안정/불안정의 경계는 Table 1에 의하여 결정된다. $\log(q/T)$ 의 범위에서 사면이 불안정해질 때의 a/b 와 경사도에 대한 관계를 나타낸 것이다. $\tan \theta$ 의 값이 무조건 불안정한 지역에 가까울수록 $\log(q/T)$ 에 따른 사면의 불안정해질 때의 a/b 의 값은 큰 차이가 없지만, $\tan \theta$ 이 작은 경우에는 $\log(q/T)$ 의 값이 작을수록 사면이 불안정한 지역에서의 a/b 의 값이 커지고 있음을 알 수 있다. SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석에서 잠재적인 사면 불안정 요소에 있어서 토양의 습윤지수(h/z)는 강우량의 증가에 따라 같이 증가할 것이며 사면 안정의 한계선까지 증가한다. 이후, 더 큰 강우량에서는 사면 불안정은 계속된다 (Table 3).

2) 매개변수의 확정

본 연구에서 산사태 위험지 분석을 위해 사용되는 SALSTAB의 매개변수는 정상상태의 유효강우량(q), 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s), 경사도(θ), 상부기여면적(a), 유출경계 길이(b) 등이 있다.

GIS프로그램인 STFM(산림계획지원프로그램)을 이용하여 경사도(θ), 상부기여면적(a), 유출경계 길이(b)에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 투수량계수(T)는 연구지역의 유역내의 Guelph Permeameter를 이용하여 현장 투수계수를 측정하여 산정하였으며, 투수계수 측정 지점의 시료를 채취하여 실내 실험을 통하여 건조단위중량을 산정하여 포화단위중량 값을 산정하였다. 내부마찰각은 이문세 등 (2009)이 흑운모화강암이 분포하는 지역을 대상으로 전단저항각 산정을 위해 개발한 선형회귀분석모델을 이용하여 내부마찰각을 산정하였다. 그리고 기상청 충주관측소

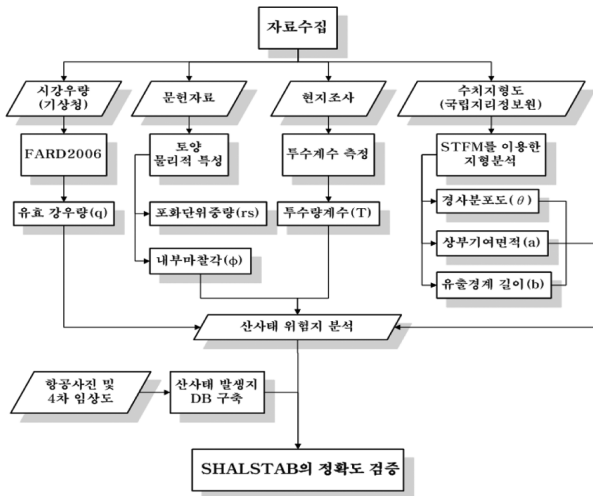


Figure 2. Flowchart of study.

의 일강우량 데이터와 국립방재연구원에서 배포하는 FARD2006을 이용하여 지속시간 24시간에 대한 연도별 확률강우강도를 계산하였다.

SHALSTAB의 매개변수인 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s), 경사도(θ), 상부기여면적(a), 유출경계 길이(b) 등을 입력하여 사면안정에 대하여 4가지로 구분하였으며 산림청 강우량에 따른 산사태 주의보 및 경보 지침 기준과 빈도별 확률강우강도를 이용하여 강우강도에 따른 산사태 위험지를 분석하였다. 그리고 항공사진과 산림청에서 제공하는 4차 입상도를 이용하여 산사태 발생지에 대한 데이터베이스를 구축하여 SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석 결과와 비교하여 SHALSTAB의 정확도를 검증하였다. Figure 2는 본 연구방법의 순서도이다.

(1) 빈도별 확률강우량

본 연구에서 FARD2006을 이용하여 빈도별 확률강우량을 산정하였으며 확률가중모멘트법에 의한 매개변수 추정을 하였으며 24시간 지속시간별 확률분포형은 Generalized Logistic을 이용하였다. 지속시간 24시간에 대한 빈도별 확률강우량 중에서 산림청의 산사태경보 기준인 150 mm 강우를 초과하는 5년, 30년 100년, 200년, 500년 빈도별 확률강우량을 이용하였으며 각각의 강우량은 150.8 mm, 242.2 mm, 330.2 mm, 395.4 mm, 509.1 mm로 산정되었다.

(2) 포화단위중량(γ_s) 및 내부마찰각(ϕ)

본 연구지역의 흙의 건조단위중량은 1.66 t/m³로 산정되었으며, 이를 이용하여 공극비를 계산한 결과 0.6으로 산정되었다. 포화단위중량(γ_s)은 다음과 같은 식 10을 이용하여 산정하였으며 포화단위의 중량은 2.03 t/m³으로 산정되었다.

$$\gamma_s = \frac{G_s + e}{1 + e} \gamma_w \quad (10)$$

내부마찰각은 이문세 등(2009)이 제안한 식 11을 이용하여 산정하였다. 본 연구지역의 내부마찰각은 36.3°이었다.

$$\phi = -4.813e + 6.451\gamma_d + 28.487 \quad (11)$$

(c) 투수량계수(transmissivity)

대수층의 투수량계수(transmissivity)는 투수계수(K)와 대수층의 두께(b)의 곱으로 나타내며 단위는 m²/day이다. 본 연구에서는 투수량계수 산정을 위하여 현지에서 투수계수를 산정하는 Guelph Permeameter를 이용하여 투수계수를 결정하고 대수층의 두께는 USGS에서 사면의 경사도에 따라 토심을 예측할 수 있는 식 12를 이용하여 산정하였다(Cha, 2004, Re-quote).

$$D_{soil} = 2.5 - 1.5 \frac{\tan\theta}{\tan 60^\circ} \quad (\text{if } \theta < 70^\circ) \quad (12)$$

투수계수는 9.94 m/day (414 mm/hr) 로 산정되었으며 대수층의 두께는 측정 지점의 경사도인 31.5°를 식 12에 대입하였으며, 대수층의 두께는 1.97 m로 결정하였다. 따라서 본 연구에서 사용할 투수량계수는 19.58 m²/day로 결정하였다.

(4) GIS을 이용한 데이터베이스 구축

GIS 데이터베이스를 구축하기 위하여 GIS 프로그램인 SFTM과 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 대축척 수치지형도를 이용하여 TIN(Triangulated Irregular Network)을 생성하고 5 × 5 m의 격자 크기로 데이터베이스를 구축하였다.

대상지역의 최고 경사는 78.8°이며 평균경사는 27.7°로 나타났으며 25°에서 35°까지의 경사가 전체면적의 약 40.9%가 분포하는 지역으로 경사가 급한 지역이다.

각각의 상부기여면적에 대한 분류에 따른 면적 비율은 Table 2와 같다. 연구지역의 전체 상부기여면적의 약 84.1%가 200 m² 이하에 분포하고 있다. 상부기여면적은 크게 나타나는 지역은 주로 계곡부이며 능선부에서는 25 m² 이하로 매우 작은 면적이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석 결과의 정확도 검증을 하기 위하여 항공사진을 이용한 산사태 발생지

Table 2. The ratio of area for upslope contribute area.

Range(m ²)	Area(km ²)	Ratio(%)
≤ 25	53.31	20.5
25 ~ 50	59.43	22.9
50 ~ 100	66.13	25.4
100 ~ 200	41.29	15.9
200 ~ 500	22.26	8.6
500 ~ 1000	6.68	2.6
1000 ~ 2000	3.56	1.4
2000 ~ 4000	2.25	0.9
4000 ≤	4.75	1.8
Total	259.66	100.0

에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 산사태 발생지 개소 수는 52개소로 발생면적은 12.59 ha로 나타났다. 산사태 발생지의 최대면적은 1.43 ha, 최소면적은 0.03 ha, 평균면적은 0.24 ha로 나타났다.

결과 및 고찰

본 연구에서는 월악산국립공원을 대상으로 수문-무한사면안정 결합 모델인 SHALSTAB의 매개변수의 값인 유효강우량(q), 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s) 등과 GIS 구축자료를 이용하여 광역적 산사태 위험 정도를 작성하고 위험지를 예측하였다. 산사태 위험지 분석을 위하여 사용되어지는 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s) 등의 매개변수는 지질, 토성, 사면위치 등에 따라 변화가 심하기 때문에 이를 유역 전반에 걸쳐 측정을 하는 것은 많은 시간이 필요하기 때문에 각 셀마다 매개변수를 측정을 하는 것은 실질적으로 어렵다. 따라서 본 연구에서는 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s) 등의 매개변수 값들이 산사태 위험지 분석 대상지인 월악산국립공원의 유역 내에서는 공간적으로 변화가 없이 일정하다고 가정하고 동일한 값을 적용하여 산사태 위험지를 분석하였다.

Figure 3은 SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석과 산사태 발생지가 중첩된 격자마다 a/b 와 경사도에 대한 관계를 점으로 나타낸 것으로 점선은 기상청 충주관측소의 일일 최대강우량인 263 mm/day을 식 9를 이용하여 나타낸 것으로 점선의 윗부분에 위치하는 것은 토층의 포화상태를 말한다.

Table 3, Figure 4는 본 연구에서 사면안정에 따른 분류를 분석한 결과, 첫째, 무조건 불안정한 지역은 전체면적의 약 20.6%인 53.4 이 분포한다. 둘째, 무조건 안정한 지역은 강우가 발생하여 토양이 포화 되더라도 안정한 지역으로 본 연구에서는 경사가 약 22.5° 미만인 지역이 무조건 안정한 지역으로 분석되었으며 전체면적의 약 16.2%

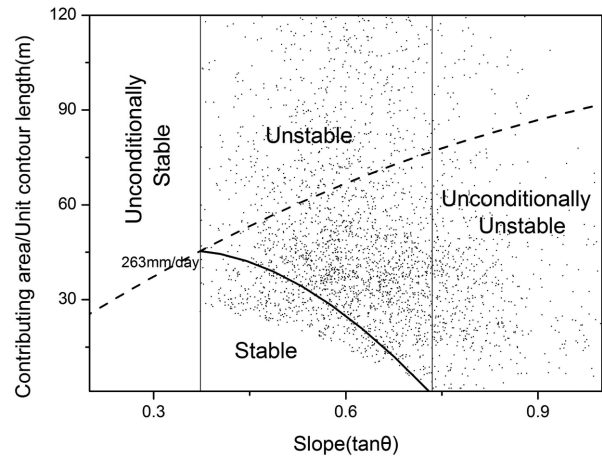


Figure 3. Plot of a/b versus slope for landslide occurrence overlay area.

인 42.1 km^2 가 분포한다. 셋째, 안정/불안정한 지역은 강우강도에 따라 안정한 지역과 불안정한 지역으로 분류되며, 전체면적의 약 63.2%인 164.2 km^2 가 분포한다.

확률강우량에 대하여 산사태 위험지 분석을 위하여 본 연구에서는 지속시간 24시간에 대한 빈도별 확률강우량 중에서 산림청의 산사태경보 기준인 150 mm 강우를 초과하는 5년, 30년 100년, 200년, 500년 빈도별 구간에 대한 값을 이용하였다. 또한 투수량계수(T)의 값은 항상 강우량(q)보다 더 큰 값을 가지기 때문에 \log 를 취하여 값을 결정하고 이 값을 이용하여 산사태 위험지를 분석하였다. $\log(q/T)$ 의 분류에 따른 산사태 위험지는 Figure 4와 같이 나타났으며 빈도별 확률강우량에 따른 사면이 불안정해지는 지역에 대한 면적과 비율은 Table 3과 같다.

SHALSTAB을 이용하여 분석한 산사태 위험지와 산사태 발생지의 중첩을 통하여 정확도를 검증하였다. 항공사진 분석 결과 월악산국립공원 내의 산사태 발생지역은 52개소로 총면적 12.6 ha로 나타났으며, 기상청 충주관측소에서 최대 강우량은 263 mm로 관측되었다. 따라서 본 연구에서는 SHALSTAB을 이용하여 산사태 위험지 분석

Table 3. The area ratio for stability in the study area according to rainfall intensity.

$\log(q/T)$	Critical Rainfall (mm/day)	Area (km^2)	Ratio (%)	Cumulative percent in each category (%)
Unconditionally unstable	-	53.4	20.6	20.6
≤ -2.11	150.8	49.6	19.1	39.7
$-2.11 < \& \leq -1.91$	242.2	21.9	8.4	48.1
$-1.91 < \& \leq -1.77$	330.2	17.3	6.7	54.8
$-1.77 < \& \leq -1.69$	395.4	9.9	3.8	58.6
$-1.69 < \& \leq -1.59$	503.1	11.8	4.5	63.1
> -1.59	> 503.1	53.7	20.7	83.8
Unconditionally stable	-	42.1	16.2	100.0
Total	-	259.7	100.0	100.0

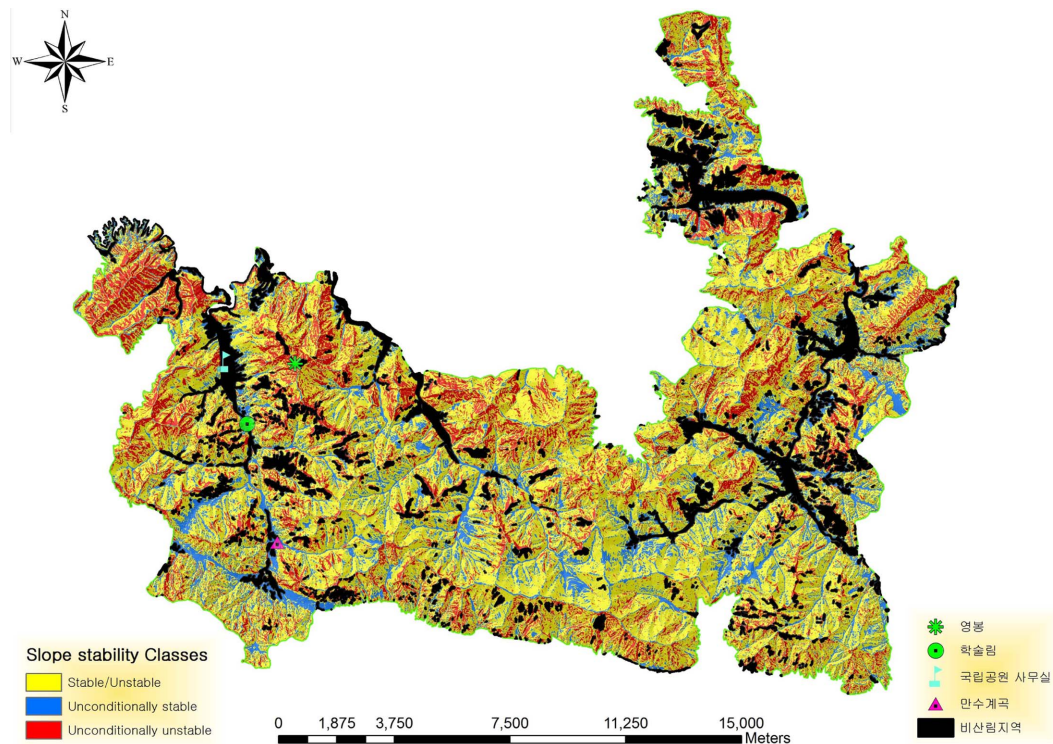


Figure 4. The distribution map for slope stability classes.

Table 4. The accuracy for landslide occurrence overlay analysis.

Result Data	Landslide occurrence area							
	Danseong -myeon	Deoksan -myeon	Mungyeong -eup	Salmi -myeon	Susan -myeon	Jeokseong -myeon	Hansu -myeon	User's accuracy (%)
Unconditionally Unstable	281	215	69	16	9	53	349	85.1
Unstable under 263 mm/day	992	946	266	18	327	356	302	
Unstable upper 263 mm/day	214	59	31	22	11	112	18	14.9
Unconditionally Stable	162	71	2	0	17	12	2	
SUM	1,649	1,291	368	56	364	533	671	4,932

지 중에서 263 mm이하의 강우에서 사면이 불안정해지는 지역과 무조건 불안정한 지역을 대상으로 산사태 발생지와 중첩하였다. 산사태 발생지와 중첩 시 보다 정확한 중첩률을 계산하기 위하여 SHALSTAB에서 계산된 각 격자마다 사면이 불안정하기 시작하는 강우량을 산정하였으며 이 중에서 263 mm 이하의 강우에 해당하는 Raster 과일을 추출하고(Figure 4), Polygon으로 변환하여 중첩되는 면적을 계산하였다. SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석과 산사태 발생지에 대한 중첩 결과, Table 4와 같이 85.1%로 일치하였다. 그리고 산사태 발생지와 중첩된 지역 중 무조건 불안정한 지역은 2.5 ha로 약 20.1%로 일치하는 것으로 나타났으며, 263 mm이하의 강우에서 사면이 불안정하기 시작하는 지역은 8.0 ha로 약 65.0%로 나타났다. 따라서 본 연구지역인 월악산국립공원에서의 산사태 위험지 예측에 있어서 SHALSTAB을 이용하는 것이 적합

하다고 판단한다.

본 연구에서는 수문-무한사면안정모델을 결합한 SHALSTAB을 이용하여 빈도별 확률강우강도에 따른 산사태 위험지를 예측하였다. 또한 산사태 발생지와 정확도 검증을 통하여 SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 예측을 객관적, 논리적으로 파악할 수 있었으며 산사태 발생원인인 강우강도에 따른 산사태 위험지 분포를 잘 파악할 수 있었다. SHALSTAB과 유사한 모델인 SINMAP (Stability Index Mapping)이 산사태 위험지 조사에 이용되고 있다. 이 두 모델은 무한사면에 대한 안정성 평가에 같은 식을 사용하지만 SINMAP에서는 임목근계의 영향을 평가하고 있다(Michel, 2014). SINMAP은 산림의 산사태 방지에 대한 긍정적인 평가에는 좋지만, 벌채 후에 대단위 산사태가 많이 발생하는 상황을 고려하면 산림의 영향을 배제한 위험지 판정이 타당하다고 생각한다.

결론

본 연구에서는 월악산 국립공원 지역을 대상으로 하여 강우강도에 따른 광역적 산사태 위험지 분석을 수행하였다. 산사태 위험지 분석하기 위하여 수문-무한사면안정모델을 결합한 SHALSTAB을 이용하여 분석하였다.

SHALSTAB의 입력 매개변수인 토양의 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s), 경사도(θ), 상부기여면적(a) 등을 현지조사와 GIS 프로그램을 이용하여 각각의 값을 결정하였다. 이런 값들을 이용하여 연구지역 내의 각각의 쉘마다 사면이 불안정해지는 수문매개변수인 $\log(q/T)$ 의 값을 산정하여 강우강도에 따른 산사태 위험지를 예측하였다. 또한 산사태 발생지에 대한 데이터베이스를 구축하여 산사태 위험지 분석과 중첩하여 정확도를 검증하였으며 그 결과, 85.1% 일치하였다. 따라서 SHALSTAB을 이용하여 강우강도에 따른 산사태 발생 위험지역을 판별하는데 활용이 가능할 것으로 사료된다. 본 논문의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 매개변수인 투수량계수(T), 내부마찰각(ϕ), 포화단위중량(γ_s)은 유역 내에서 동일하다고 가정하였다. 투수량계수(T)는 19.58 m²/day, 내부마찰각(ϕ)은 36.3°, 포화단위중량(γ_s)은 2.03 t/m³으로 값이 결정되었다.

2. FARD2006을 이용하여 연구지역의 빈도별 확률강우량을 산정하였다. 5년, 30년, 100년, 200년, 500년 빈도의 강우강도에 상응하는 수문매개변수인 $\log(q/T)$ 의 값을 -2.11, -1.91, -1.77, -1.69, -1.59로 범위를 정하고 안정/불안정 지역을 분류하였다. 결과적으로 강우강도가 증가함에 따라서 사면의 불안정한 지역의 분포가 증가하였다. 100년 빈도의 강우시에 전체면적의 54.8%가 위험지역으로 분류되었다.

3. 유역 내에서 내부마찰각(ϕ)인 36.3° 보다 경사가 급한 지역은 무조건 불안정한 지역으로 전체면적의 20.6%인 약 53.4 km²가 분포한다. 또한 경사도가 22.5° 이하인 지역은 무조건 안정한 지역으로 전체면적의 16.2%인 42.1 km²가 분포한다. 안정/불안정한 지역은 강우강도에 따라 분포가 달라진다. 이에 해당하는 지역은 전체면적의 63.2%로 나타났다.

4. 항공사진을 이용하여 산사태 발생지 데이터베이스를 구축하고 SHALSTAB을 이용한 산사태 위험지 분석과 중첩하여 정확도를 검증하였다. 결과, 무조건 불안정한 지역과 기상청 충주관측소의 일일 최대강우량인 263 mm이하에서 사면이 불안정한 지역이 산사태 발생지와 약 85.1%가 일치하였다.

5. 결과적으로, SHALSTAB을 이용한 광역적 산사태 위험지 분석에 있어서 강우강도에 따른 사면의 안정/불안정한 지역에 대한 분포도를 쉽게 확인 할 수 있었으며 객관

적, 논리적으로 산사태 위험지를 판단할 수 있었다. 따라서 강우강도에 따른 광역적 산사태 위험지 분포도 작성에 있어서 산사태 위험지를 예측하는데 사용될 수 있다고 판단된다.

SHALSTAB은 지형분석과 물리 모델을 이용하여 산지 사면의 포화대를 찾아낸다. 이 포화대는 직접적으로 산사태 발생에 영향을 미치므로 강우강도별로 산사태 위험지역을 판별하고 있다. 이것은 국지적인 지형에 의해 사면 경사와 천층지하수가 모이는 지점을 반영하며 강우강도별로 위험성을 판별할 수 있어서 적용성이 높다. 또한 강우강도별로 위험지점을 판별하고 있으므로 실시간 강우에 따른 산사태 위험도를 판별할 수 있는 이점도 있을 것으로 생각한다. 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

SHALSTAB과 SINMAP이 산사태 위험지 조사에 이용되고 있다. 이 두 모델은 무한사면에 대한 안정성 평가에 같은 식을 사용하지만 SINMAP에서는 임목근계의 영향을 평가하고 있다. SINMAP은 산림의 산사태 방지 효과에 대하여 긍정적인 평가를 하기에는 좋지만, 벌채 후에 대단위 산사태가 많이 발생하는 상황을 고려하면 산림의 영향을 배제한 위험지 판정이 타당하다고 생각한다.

References

- Michel, G.P., Kobiyama, M., and Goerl, R.F. 2014. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *J. Soils and Sediments*. <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11368-014-0886-4> (2014. 5. 26).
- Cha, K.S. 2004. Prediction of potential landslide sites using the multicell technique and the landform index. PhD thesis, Seoul National University. pp. 127.
- Choi, K. 1986. Landslides occurrence and its prediction in Korea. PhD thesis, Kangwon National University. pp. 45.
- Dietrich, W.E. and Montgomery, D.R. 1998. SHALSTAB, A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab> (2014. 5. 26).
- Hong, W.P., Kim, S.K. and Han, J.G. 1990. Prediction of Rainfall - triggered Landslides in Korea. *Geotechnical Engineering* 6(2): 55-63.
- Kim, J.S., Kim, N.C. and Lee, H.H. 2000. Application of a Physically Based Model to Shallow landsliding. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 3(1): 62-69.
- Kim, K.S., Kim, W.Y., Chae, B.G. and Cho, Y.C. 2000. Engineering Geologic Characteristics of Landslide Induced by Rainfall - Boeun, Chungcheong Buk-do -. *The Journal of Engineering Geology* 10(2): 163-174.
- Lee, C.W. 2010. Debris flow characteristics and measures. *sanrimji* 533: 84-87.

- Lee, M.S., Ryu, J.C. and Kim, K.S. 2009. Development of the Linear Regression Analysis Model to Estimate the Shear Strength of Soils. *The journal of Engineering Geology* 19(2): 177-189.
- Lee, S.H. 2005. Application of a physically based hydrologic model to the prediction of shallow landslide potential area using GIS. PhD thesis, Chungbuk National University. pp. 104.
- Ma, H.-S., Jeong, W.-O. and Park, J.-W. 2008. Development of Prediction Technique of Landslide Hazard Area in Korea National Parks. *Journal of Korean Forest Society* 97(3): 326-331.
- Min, C.-S. 2006. Prediction of Landslide Based on the Characteristics of Subsurface Flow. Master's Thesis, Seoul National University. pp. 75.
- Montgomery, D.R. and Dietrich, W.E. 1994. A Physically-Based Model for the Topographic Control on Shallow Landsliding. *Water resources research* 30(4): 1153-1171.
- Woo, B.M., Yim, K.B. and Lee, S.W. 1978. Studies on the Landslides and Its Control Measures in Anyang Area. *Journal of Korean Forest Society* 39:1-34.
- Yang, I.T., Chun, K.S., Park, J.K. and Lee, S.Y. 2007. An Estimation to Landslide Vulnerable Area of Rainfall Condition using GIS. *Journal of the Korean Society for GeoSpatial Information System* 15(1): 39-46.

(2013년 4월 15일 접수; 2013년 6월 24일 채택)