

산사태 발생지점의 특성을 고려한 취약성 분석 비교 Comparison of Landslide Susceptibility Analysis Considering the Characteristics of Landslide Trigger Points

신현우¹⁾ · 이수곤²⁾

Shin, Hyun Woo · Lee, Su Gon

Abstract

This study examined the correlation among topography, forest type, soil and geology in Inje area where landslides occurred during heavy rainfall from July 11 to July 18, 2006 to assess the landslide susceptibility. In order to assess the susceptibility of future landslides, landslides occurred in Inje area were classified into slide type and flow type, and slope angle, aspect, curvature, ridge and valley were extracted from the area. The landslide susceptibility was assessed by applying diameter class, age class, density, and forest type to Bayesian-based LR (Logistic Regression) model and WOE (Weight of Evidence) model, and the fitness of modeling was verified by predict rate curve. As the results of susceptibility assessment, using all landslides without no distinction, it was found that 75% of the LR model and 73% of the WOE model were fit in terms of the top 20% of the landslides. According to slide type and flow type in the top 20% of the landslides, it was found that 71% of the LR model and 69% of the WOE model were fit in terms of the slide type. Whereas, it was found that 86% of the LR model and 82% of the WOE model were fit in terms of the flow type. That is, the results of the LR model showed higher fitness than the results of the WOE model, and the fitness of the flow type was higher than that of the slide type. Consequently, it suggests that it is reasonable to assess and verify the landslide susceptibility according to the types of landslides.

Keywords : Landslide Susceptibility Assessment, Likelihood Ratio, Weight of Evidence, Predict Ratio Curve.

초 록

본 연구는 산사태 발생 취약성을 평가하기 위해 2006년 7월 11일부터 7월 18일까지 집중호우 시 다수의 산사태가 발생한 인제지역의 지형요인, 임상, 토질, 지질과의 상관관계를 분석하였다. 미래에 발생할 산사태의 취약성 평가를 위해 인제지역에 발생한 산사태를 활동형태와 흐름형태로 구분하고 지형에서 경사, 경사각, 곡률, 능선, 계곡을 추출하였다. 그리고 임상요인에서 경급, 영급, 밀도, 임상을 추출하여 베이지안을 기반으로 하는 LR 모델과 WOE 모델을 적용하여 연구지역 산사태의 취약성을 평가하고 예측비율곡선을 이용하여 적합도 검증하였다. 취약성 평가 결과의 적합도 검증 결과 산사태를 유형별 구분 없이 적용한 결과 상위 20%에서 LR 모델은 75%, WOE 모델은 73%의 적합도를 보이고 있으며, 활동형태와 흐름형태로 구별하여 검증한 결과 활동 형태는 상위 20%에서 LR 모델은 71%, WOE 모델은 69%의 적합도를 나타내고, 흐름 형태에서는 상위 20%에서 LR 모델은 86%, WOE 모델은 82%의 적합도를 나타내었다. 평가결과 적합도는 LR 모델 적용 결과가 WOE 모델 적용 결과보다 높은 적합도를 보였으며, 활동형태 보다는 흐름형태의 적합도가 높게 나타났다. 이러한 결과로 보아 산사태 취약성 평가와 검증 시에는 기존의 연구 방법과는 달리 산사태 발생 예측 시 유형별로 구분하여 실시하는 것이 타당한 것으로 사료된다.

핵심어 : 산사태 취약성 평가, 우도비, 증거가중치, 예측비율곡선

Received 2018. 03.13, Revised 2018. 04. 04, Accepted 2018. 04. 27

1) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul (E-mail: shwoo9@hanmail.net)
2) Dept. of Civil Engineering, University of Seoul (E-mail: sglee@uos.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리나라는 국토의 70% 이상이 산악지역이며 경사가 급한 지형 여건상 산사태가 발생할 확률이 높다. 해마다 6월과 9월 사이의 장마철에 태풍과 호우가 발생하며, 이시기에 산사태가 집중적으로 발생하여 수많은 인명과 재산상 손실을 초래하고 있다. 2002년부터 2011년까지 연평균 산사태 발생 면적은 779ha로 1980~1989년 발생면적인 231ha보다 3.4배 증가하였다(Kim and Kim, 2013). 2011년 7월에는 서울 도심의 우면산에서 토석류 산사태가 발생하는 등 산사태로 인한 사회적 불안이 가중되고 있다.

이처럼 반복하여 발생하는 산사태를 발생 이전에 산사태 발생 가능 지역을 정확히 예측 할 수 있다면 사회적 손실을 줄여 나가는데 크게 이바지할 것이다. 산사태 취약성 분석은 산사태를 유발시키는 성향으로 정의되어 대상 지역을 확률적으로 표현한다(Guzzetti *et al.*, 2006). 산사태 취약성 지도를 제작하는 방법은 크게 정성적 해석 기법과 정량적 해석 기법으로 구분 할 수 있다(Aleotti and Chowdhury, 1999).

산사태 취약성 해석에 불확실성을 고려하기 위해 Chung and Fabbri(1999)는 조건부 확률, 규칙의 확신도(Certainty Fator), 퍼지 연산 등을 이용하였고, Suzen and Doyuran(2004)은 증거가중치(Weight of Evidence, WOE)를 이용하였다. 통계적 모델인 빈도비 분석(Lee and Talib, 2005; Dahal *et al.*, 2007), 로지스틱 회귀분석(Lee and Sambath, 2006; Pradhan *et al.*, 2008), 인공신경망(Ermini *et al.*, 2005) 등 다양한 방법을 통해 산사태 취약성을 분석하고 지도화하여 그의 적합성을 검증하는 연구가 주를 이루었다. 우리나라의 경우 한국 지질자원연구원이 1998-2005년도까지 발생한 10개 지역의 3,485개의 산사태를 분석한 결과 42.3%인 1,452개가 평면 슬라이드이고 1,452개의 산사태는 평면 슬라이드와 토사류의 복합된 산사태로 분류되었다(KIGAM, 2004). 그러나 지금까지 산사태 취약성 분석을 수행한 선행 연구 결과는, 산사태의 발생유형을 고려하지 않고 수행한 것이 대부분이었다. 산사태를 유형별로 구분하여 취약성을 평가한다면 보다 높은 예측 결과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 선행 연구자들과는 다르게 산사태 발생 지점의 특성을 고려하여 흐름형태와 활동 형태로 유형을 분류하여 취약성 평가와 적합도 검증을 실시하여 비교해 보고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 토석류 산사태의 특성과 취약성 분석을 위해,

2006년 7월 집중 호우 시 산사태가 많이 발생한 강원도 인제 지역을 대상으로 하였다. 즉, 인제군 인제읍 북면 기린면을 대상으로 약 47Km² (동경 128°12'10"E-128°20'09"E, 북위 38°03'57"N- 38°06'09"N)내에서 114개의 산사태가 발생한 지역을 연구 대상 지역으로 선정하였다. 또한 연구 대상지에서 발생한 산사태 114개에 대해 발생 당시의 항공사진과 현장조사를 통해, 연구 대상 지역의 산사태가 발생 시점부에서 사면에서 발생한 활동 형태의 산사태 42개와 계곡에서 발생한 흐름형태의 산사태 72개가 발생되었음을 확인하였다.

산사태 유발요인들의 상관관계 분석을 위해, 한국지질자원 연구원에서 발행한 1:250,000 강릉-속초 지질도폭과 국립산림과학원에서 작성한 인제 지역 임상도, 수해 발생 후 항공사진, 국립농업과학원에서 작성한 정밀 토양도 등을 활용하고자 한다. 이렇게 발생 지역의 특성을 고려하여 지형적인 요인과 임상적인 요인에서 9개의 요인을 추출하여 인제 지역에 적용하여, 유형별 산사태의 위험도를 평가하고 평가 결과 적합도 검증을 실시하고자 한다. 이를 위해 LR 모델과 WOE 모델을 활용하고자 한다. 취약성 평가 결과의 적합도 검증을 위해 예측비율곡선을 활용하였다. 또한 유형별로 구분하여 예측을 수행한 것과 유형별로 구분하지 않은 예측결과를 비교하고자 한다. 결과 확인을 위해 각 분석 대상 요소들의 등급 값을 등면적화하여 단위면적당 발생하는 사건의 확률을 연산해 보고자 한다. 이 연구의 수행 방법 및 절차를 Fig. 1에 나타내었다.

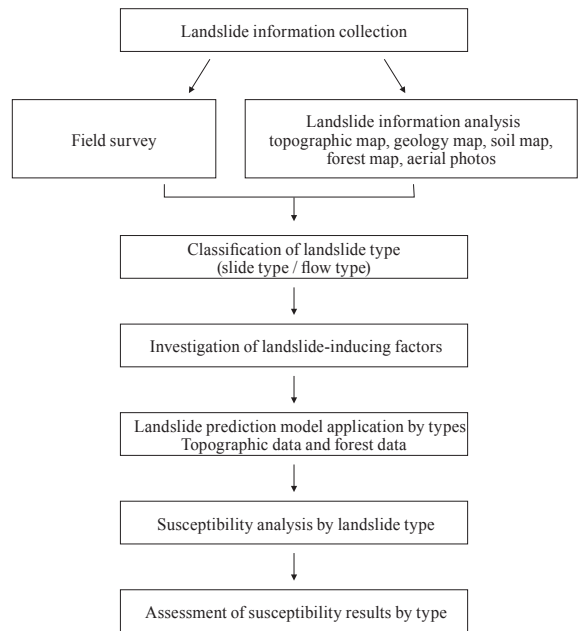
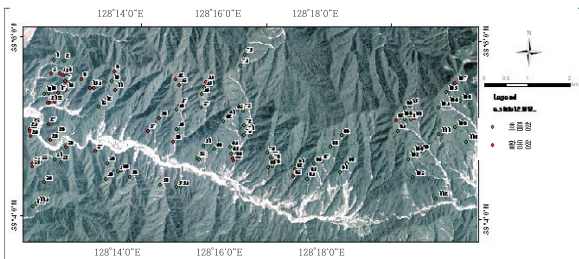


Fig. 1. Flow diagram showing the methods and procedures

3. 연구 대상지 선정

연구대상지역은 2006년 7월 집중호우로 산사태가 많이 발생한 인제군 인제읍 북면, 기린면을 대상으로 약 47Km² (동경 128°12'10"E-128°20'09"E, 북위 38°03'57"N- 38°06'09"N)내에서 114개의 산사태가 발생한 지역을 선정하였다(Fig. 2). 또한, 지형, 지질, 토양, 임상 등이 산사태 발생률과의 상관관계를 알아보기 위해, 관련인자들에 대해 GIS 기반의 공간 데이터베이스를 구축하는 것이 선행되어야 한다. 이를 위해 수치지형도, 산사태 발생 전후의 항공사진, 국립산림과학원에서 작성한 임상도, 한국지질자원연구원에서 작성한 지질도, 국립농업과학원에서 작성한 정밀 토양도 등을 ArcGIS 9.0 SW를 활용하여 상대적인 등급 값을 연산하고, 항공사진의 산사태 발생 위치와 공간자료를 통합하여 주제도를 작성하였다. GIS (Geographic Information System) 기반의 공간 데이터베이스를 구축하기 위해 세계 측지계의 TM (Transverse Mercator) 중부원점 좌표계에 맞게 좌표체계를 통일하였다. 산사태에 영향을 미치는 인자들의 연산 값을 구하기 위해, 5m×5m 크기의 격자형 Cell(총 격자수는 2,170,844 개)로 나누었으며, Arc Toolbox의 Zonal Statistics 기능을 이용하여 인자들의 등급 값을 계산하였다. 공간 데이터베이스 구축을 위한 연구 대상지역 산사태 현황 자료를 Table 1에 나타내었다.



(a) Aerial Photograph of Landslides in Inje area



(b) Flow-type landslide



(c) Slide-type landslide

Fig. 2. Photographs of study area

Table 1. Landslide data of the study area

Category	Factor	Class	Property	Data type	Scale	Data source
Geologic hazard map	Landslide			Point	1: 5,000	Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
	Slope	1 2 3 4 5 6 7	0-12 12-24 24-36 36-48 48-60 60-70 ≤71	Grid	1: 5,000	
topographical map	Aspect	1 2 3 4 5 6 7 8	N NE E SE S SW W NW			
	Curvature	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	-10~-8 -8~-6 -6~-4 -4~-2 -2~0 0~2 2~4 4~6 6~8 8~10			
	Ridge	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0-5m 6-10m 11-15m 16-20m 21-25m 26-30m 31-35m 36-40m 41-45m 46-50m			
	Valley	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0-5m 6-10m 11-15m 16-20m 21-25m 26-30m 31-35m 36-40m 41-45m 46-50m			

Category	Factor	Class	Property	Data type	Scale	Data source
forest map	Diameter	1	>6cm	Polygon	1; 25,000	Korea Forest Service (The Korea Forest Research Institute)
		2	6-16			
		3	18-28			
		4	≤30			
	Density	1	≥ 20%			
		2	≥ 40%			
		3	40-70%			
		4	≤71%			
	Forest type	1	Non-forest area R			
		2	Mixed forest M			
		3	Coniferous C			
		4	Pinus densiflora forest D			
		5	Cultivated land LOF			
		6	Livestock farm LP			
7		Pinus koraiensis PK				
8		Hardwood H				
9		Hardwood forest: plantation PH				
10		Pinus densiflora forest:: plantation PD				
13	Populus forest: plantation PO					
Age	1	1-10 years				
	2	11-10				
	3	21-30				
	4	31-40				
	5	41-50				
	6	51years or more				
Geological map	Inje, Sorak			Polygon	1; 50,000	
Soil map	Soil map			Polygon	1; 25,000	

4. 모델별 산사태 취약성 평가

4.1 인자별 산사태 발생 수 분석

인제지역에 발생한 산사태의 유발요인을 분석하기 위해, 지형도에서 경사, 경사각, 곡률 등을 추출하고, 한국지질자원연구원에서 작성한 인제 설악산 지질도를 사용하였으며, 국립농업과학기술원에서 작성한 정밀토양도에서 토양의 토성, 심토석력, 배수등급, 토양의 경사, 토심 등을 추출하고, 국립산림

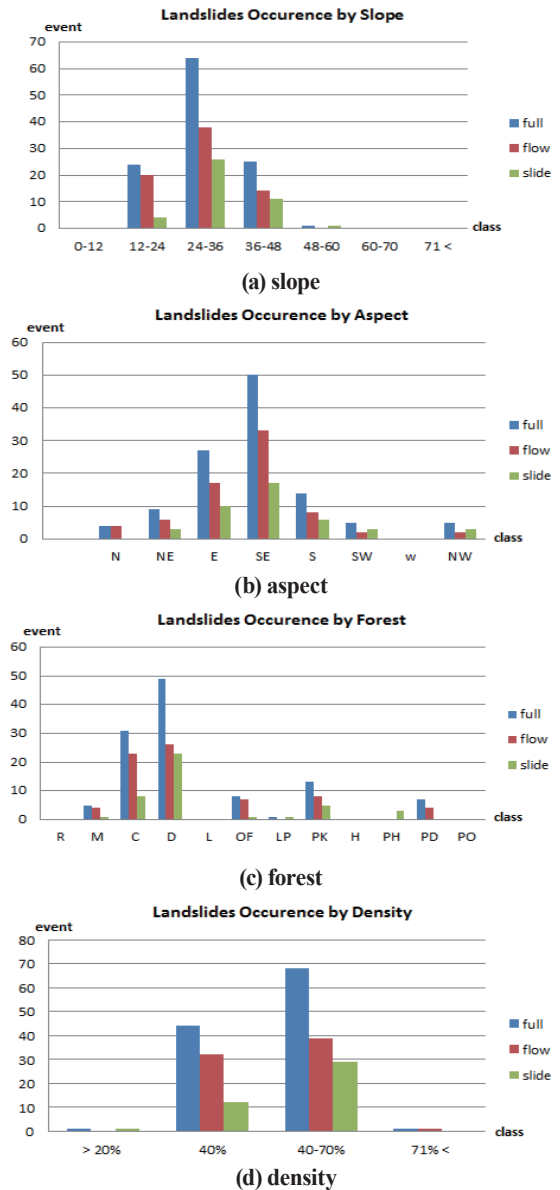


Fig. 3. Analysis of occurrence of landslide by factors

과학원에서 작성한 임상도에서 임상, 영급, 경급, 밀도 등을 추출하였다. 이렇게 추출한 자료를 GIS 기법을 이용하여 공간적으로 통합하여 주제도를 작성하고, 인자별 산사태 발생 건수를 분석하였다(Fig. 3).

Fig. 3(a)와 같이 사면의 경사각은 98.24%가 24°~48°에서 발생하였다. Fig. 3(b)와 같이 산사태가 발생한 사면의 경사방향은 남동방향이 43.85%, 정남방향이 28.07%로 나타났으며, 주로 남향에서 산사태가 발생하였다. 이는 산사태 발생이 사면방위로 인한 일조시간의 차이에 의한 토층내의 지하수의 위치, 기반암의 풍화정도, 식생의 생육차이로 인해, 북쪽사면보다는 남쪽사면에서 온도변화의 영향으로 풍화가 더 빨리 진행하며, 이로 인해 산사태가 보다 많이 발생하였음을 알 수 있다. 이처럼 인제지역의 산사태 역시 사면의 경사가 급한 곳에서 많이 발생한 것으로 보아, 자연사면에서 경사각은 산사태의 유발과 깊은 관계가 있음을 알 수 있다.

임상 분석 결과, 임상의 분포는 Fig. 3(c)와 같이 소나무, 전나무가 70.17%를 점하고 있고, 밀도는 Fig. 3(d)와 같이 2등급 이하가 39.47%, 3등급 이상이 60.52%가 분포하고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 하였을 때, 산사태가 발생한 지역은 대체로 교목의 수관 점유 비율이 75% 이상이고, 수령이 오래되어 직경이 굵은 소나무와 전나무가 주로 자라는 지역에서 발생하였음을 알 수 있다. 이는 집중호우 발생시 지하로 침투하는 빗물이 수목의 뿌리에 영향을 주어, 지반의 균열을 발생시킴으로써 붕괴로 이어졌을 것으로 판단된다.

4.2 LR 모델을 이용한 산사태 취약성 평가

일반적으로 산사태 취약성 평가를 위해 지질도, 토양도, 임상도 등과 같은 범주형 자료와 지형, 사면경사, 사면방위, 곡률 등의 연속형 자료를 활용한다. 그러나 산사태가 발생한 인제지역은 기반암이 화강암이고, 토양의 토성이 사양 질이며, 토층이 1m 미만으로 배수등급이 양호한 지역이므로, 산사태 취약성 평가에서는 임상과 지형적 인자들과의 상관관계만 모델에 적용하였다. 상관관계 분석을 위해 임상에서는 영급, 경급, 상급, 밀도를 모델에 적용하고 각 인자들의 상대적인 등급 값을 계산하였다. 각 요소들의 LR값을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$LR = \frac{N_{\pi x}(SX_i)}{\sum_{i=1}^m SX_i} \cdot \frac{N_{\pi x}(X_j)}{\sum_{j=1}^n N_{\pi x}(X_j)} \quad (1)$$

Where $N_{\pi x}(SX_i)$ is the number of pixels with landslides within class i of parameter variable X , $N_{\pi x}(X_j)$ is the number of pixels within parameter variable X_j , m is the number of classes in the parameter variable X , and n is the number of parameters in the study area.

LR 값이 1이면 평균이며, 1보다 크면 그 지역의 산사태 발생 확률이 높고, 산사태와 상관관계가 크다는 것을 의미하며, 1보다 작으면 상관관계가 작다는 것을 의미한다. Fig. 4는 Eq. (1)에 의해 산출한 LR값에 의해 작성된 산사태 유형별 취약성 지도이다.

산사태 취약성 평가 결과, 유형을 구분하지 않은 것과 구분한 것이 조금 다른 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 사건의 발생은 형태를 구분한 것과 구분하지 않은 것이 같은 등급에서 가장 많이 발생하는 양상을 보이고 있으나, LR 값은 흐름과 활동형태에서 차이가 있음을 알 수 있다. 임상과 지형적 요소들에 대한 취약성 평가 결과 사건이 발생한 등급에서 취약지수 또한 높게 나타나지만 일부 인자들은 등급이 다름을 알 수 있다. 임상에서 이러한 결과는 흐름형태의 산사태가 활동형태의 산사태 보다 수형이 작은 수목에서도 산사태가 발생할 수

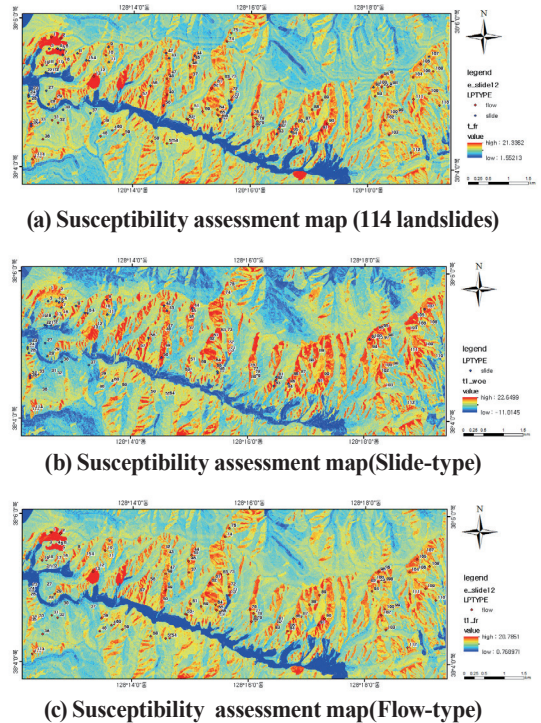


Fig. 4. Susceptibility assessment map: LR model

있다는 것을 보여주고 있으며, 미래에 동일한 조건의 자연 환경 하에서 토심이 낮은 경우 임목의 직경이나 수중에 관계없이 산사태가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 지형적 요소들의 사건 발생 등급과 취약지수가 높은 등급이 다른 이유는 활동형태의 산사태가 시간이 경과함에 따라 강우의 영향으로 흐름형태의 산사태로 발전하고, 활동형태의 산사태는 사면의 경사각에 대한 영향을 많이 받지만, 흐름형태의 산사태 발생에는 사면의 경사각의 영향이 상대적으로 덜하다는 것을 알 수 있다. 위의 결과를 살펴보면 형태를 구분하지 않은 것보다 형태를 구분하여 취약성을 평가한 것이 취약지수가 높아 산사태 예측확률이 높아지는 것을 알 수 있다.

4.3 WOE 모델을 이용한 산사태 취약성 평가

WOE 모델을 적용하여 취약지수를 산정하기 위한 식은 다음과 같다.

$$W^+ = \ln_e \frac{P\{B|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (2)$$

$$W^- = \ln_e \frac{P\{\bar{B}|D\}}{P\{\bar{B}|\bar{D}\}} \quad (3)$$

Where P is the probability and \ln is the natural log. For each landslide predictive factor, W^+ is used for those pixels of a factor (represented as a class in a multi-class map) to indicate the importance of the presence of the factor for the occurrence of landslides and W^- is used to evaluate the importance of the absence of the factor for the occurrence of landslides.

Eq. (2)와 Eq. (3)은 LS 와 LN 에 자연로그(\ln)를 취한 값으로서 W^+ 는 각 인자들의 n 등급에 대한 양(positive)의 증거가중치를 표시하는 것이며 W^- 는 어떠한 요인의 n 등급에 대한 음(negative)의 증거가중치를 나타낸다.

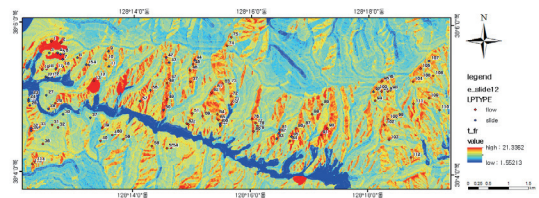
WOE를 이용한 산사태 취약성 분석은 우도비에 자연로그를 취하여 W^+ 와 W^- 의 가중치를 적용해서 산정한다. C 의 표준화된 값(studentized value)인 $C/S(C)$ 는 가중치의 차 C 값과 C 값의 표준편차 $S(C)$ 로 나눈 값으로 정의한다(Bonham-Carter, 1994). 이것을 식으로 표시하면 다음 Eq. (4)와 Eq. (5)와 같다.

$$C = W^+ - W^- \quad (4)$$

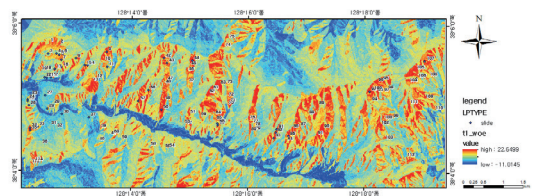
$$S(C) = \sqrt{S^2(W^+) + S^2(W^-)} \quad (5)$$

이 연구에서 인자들은 $C/S(C)$ 의 최대값을 가지는 등급의 W^+ 가중치와 W^- 가중치로 이분화되고, 이분화된 인자들의 중첩 분석을 통하여 산사태 취약지수를 계산하여 가능성을 작성한다. WOE의 값이 0의 값을 가지면 상관관계가 없고, (-)값을 가지면 음의 상관관계를, (+)값을 가지면 양의 상관관계를 나타낸다.

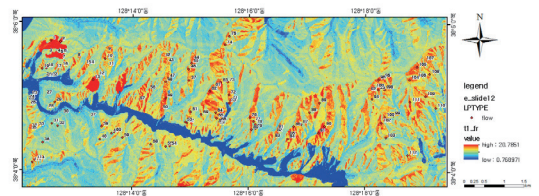
Fig. 5의 (a), (b), (c)는 WOE 모델에서 계산된 값을 누적하여 도시한 취약성 평가지도이다. 임상요인 중 흉고직경과 경급, 밀도는 흐름과 활동 형태가 같은 등급에서 사건의 발생과 취약성이 일치하는 것으로 나타나지만, 능선과 곡목은 등급의 차이가 있음을 알 수 있다. 흐름형태와 활동형태 모두 오목한 부분이 볼록한 부분보다 취약성이 높게 나타나, 오목한 부분이 산사태에 취약한 것으로 보인다. 사면의 경사각은 흐름형태와 활동형태 모두 3등급인 24~36° 범위의 경사각에서 가장 취약한 것으로 평가되었다. 이러한 분석 결과를 종합하면 임상에서는 산지에 식재되어 있는 수목의 종류가 다른 임상 요인들에 비해 산사태에 미치는 영향이 큰 것으로 보여 교목보다는 관목 수종의 음성 수목을 식재하는 것이 사면 안



(a) Susceptibility assessment map (114 landslides)



(b) Susceptibility assessment map(Slide-type)



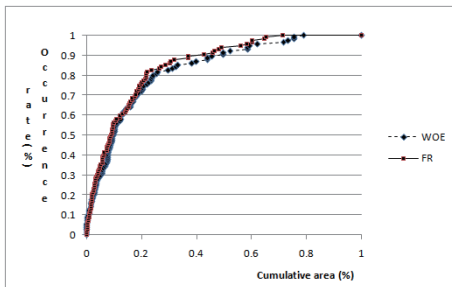
(c) Susceptibility assessment map(Flow-type)

Fig. 5. Susceptibility Assessment Map: WOE Model

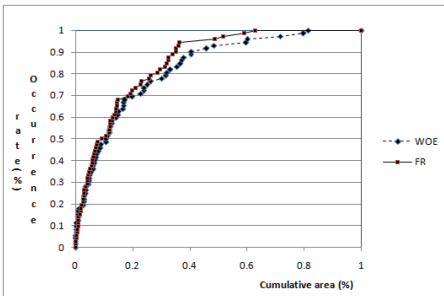
정에 훨씬 유리한 것으로 판단된다. 또한, 지형 요인들 중에는 남쪽 방향에서 경사각이 24°~36° 되는 사면이 산사태 발생에 가장 취약한 것으로 나타난다. 그러므로 산사태 방지를 위한 계획 수립 시 이러한 인자들이 우선적으로 고려해야 할 것으로 판단된다.

5. 예측비율곡선에 의한 산사태 취약성 적합도 검증

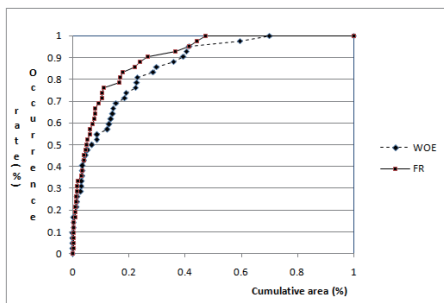
3장과 4장에서 작성한 취약성도는 산사태 발생 확률에 대한 추정 값이므로 이에 대한 적합도 검증이 필요하다. 본 연구에서는 취약성 예측 능력 향상을 위해 산사태를 유형별로 분



(a) Prediction rate curve of 114 landslides



(b) Prediction rate curve of 42 slide-type landslides



(c) Prediction rate curve of 72 flow-type landslides

Fig. 6. Prediction rate curve

류하여 취약성도의 적합도를 예측비율곡선(Prediction Rate Curve, PRC)을 이용하여 검증하였다.

예측비율곡선은 연구대상 지역에 대하여, 각 인자들의 상대적 등급 값을 백분율로 치환하고, 과거 산사태 발생 위치를 중첩하여 과거 발생된 사건이 어느 등급에 포함되는지를 평가하였다. 이러한 방법으로 등급이 높은 것부터 누적하여 누적 결과를 빈도 기반으로 표현함으로써 산사태 발생 빈도를 명확하게 표현이 가능하기 때문에 검증 방법으로 자주 이용되고 있다(Chung and Fabbri, 1999).

빈도 기반으로 표현된 Fig. 6(a)의 예측비율곡선에서 유형별로 구분하지 않은 산사태는 상위 20%에서 LR 모델 적용 결과로 75%, WOE 모델 적용 결과로 73%의 취약성 적합도를 보이고 있다(Chung and Fabbri, 1999). 그러나 유형별로 구분하여 적용한 결과, Fig. 6(b)에 나타난 것처럼, 활동형태는 LR 모델의 경우 71%, WOE 모델의 경우 69%의 적합도를 보였다. Fig. 6(c)에 나타난 것과 같이, 흐름 형태는 LR 모델의 경우 86%, WOE 모델의 경우 82%의 취약성 적합도를 보였다. 흐름형태의 취약성 적합도가 높게 나타나는 이유는 강우강도와 강우지속시간으로 인해 활동형태가 흐름형태로 전환되어 발생하는 특징 때문임을 알 수 있다.

이러한 연구 결과는 유형을 구별하여 취약성 평가와 적합도 검증을 실시하는 것이 민감도가 높아 예측 확률이 높아지는 것을 알 수 있다. 따라서 미래에 발생할 수 있는 산사태 예측 역시, 동일한 지질환경 조건이라면 산사태를 발생 유형별로 구분하여 적용하는 것이 유형을 구분하지 않은 것보다 예측 능력이 향상될 것으로 기대된다.

6. 결론

본 논문에서는 산사태 발생에 대한 예측을 수행하기 위해 기존의 산사태 발생지역의 환경을 고려하여 그와 유사한 지역에 대한 산사태 발생 확률을 예측하고자 한다. 이를 위해 지형과 임상에서 9개의 인자를 추출하여 베이지안(Bayesian)을 기반으로 하는 LR 모델과 WOE 모델을 실제 현장 데이터에 적용하여 그 효용성을 평가했다. 또한 이 과정에서 보다 정확한 예측을 위해 산사태를 유형별로 분류하여 예측모델을 적용해보고 그 결과를 비교함으로써 유형별 분류가 산사태의 발생확률을 예측하는데 어떤 효용성이 있는지 살펴보고자 하였다.

이를 위해 인제 지역에 적용하여, 유형별 산사태의 위험도를 평가하고 평가 결과에 대한 적합도 검증을 실시하고자 한다. 취약성 평가 결과의 적합도 검증을 위해 예측비율곡선을

활용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

인제 지역의 산사태 취약성 분석 결과, 남동 방향으로 24°~36°의 경사각을 갖는 하향 경사면과 오목한 지형, 인공 조림한 소나무숲, 2영급, 중밀도, 소경목인 지역에서 산사태 발생확률이 가장 높게 나타났다. 평가 결과, 산사태를 유형별 구분 없이 적용했을 때에는 상위 20%에서 LR값은 75%, WOE값은 73%의 적합도를 보이고 있다. 그러나 산사태를 유형별로 구분했을 때, 활동 형태에서는 상위 20%에서 LR 값은 71%, WOE 값은 69%의 적합도를 보이며, 흐름 형태에서는 상위 20%에서 LR 값은 86%, WOE 값은 82%의 적합도를 나타내었다.

결과적으로 평가결과 적합도는 LR 모델 적용 결과가 WOE 모델 적용 결과 보다 높은 적합도를 보였으며, 활동형태 보다 흐름형태의 적합도가 높게 나타났다. 이러한 결과는 산사태 취약성 분석 시, 기존의 연구 방법과는 달리 유형별로 구분하여 취약성 분석을 실시하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 따라서 미래에 발생할 수 있는 산사태 예측 역시, 동일한 지질환경 조건이라면 산사태를 발생 유형별로 구분하여 적용하는 것이 유형을 구분하지 않은 것보다 예측 능력이 향상될 것으로 기대된다.

그러나 본 연구에서는 산사태 발생지에 대한 제한된 정보로 인해 보다 다각적인 분석이 어려웠으며, 다양한 분석방법론과의 비교분석이 이루어지지 않은 한계가 있었다. 이러한 한계를 보완하고, 본 연구 결과인 유형별 산사태 취약성도가 효율적으로 활용되기 위해서는 지금까지 산사태가 발생한 지역에 대해 국가적인 DB를 구축하고, 이를 활용하여 체계적인 분석을 수행함으로써 보다 정확한 예측 모델이 개발 및 적용되어야 할 것이다.

References

- Aleotti, P. and Chowdhury, R. (1999), Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 58, No. 1, pp. 21-44.
- Bonham-Carter, G.F. (1994), *Geographic Information Systems for Geoscientist : Modeling with GIS*, Oxford: Pergamon Press, London.
- Chung, C.F. and Fabbri, A.G. (1999), Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 12, pp. 1388-1399.
- Dahal, R.K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Masuda, T., and Nishino, K. (2007), GIS-based weights of-evidence modelling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping, *Environmental Geology*, Vol. 54, No. 2, pp. 311-324.
- Ermini, L., Catani, L., and Casagli, N. (2005), Artificial neural networks applied to and landslide susceptibility assessment, *Geomorphology*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 327-343.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., and Galli, M. (2006), Estimating the quality of landslide susceptibility models, *Geomorphology*, Vol. 81, pp. 166-184.
- KIGAM (2004), *Development Landslide Risk Assessment System and Damage Mitigation Technology*, M1-0324-00-0003-03-831-00-001-00, Daejeon, Korea, 288p.
- Kim, J.H. and Kim, W.Y. (2013), Review of research trends on landslide hazards, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 3, pp. 305-314. (in Korean with English abstract)
- Lee, S. and Sambath, T. (2006), Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models, *Environmental Geology*, Vol. 50, No. 6, pp. 847-855.
- Lee, S. and Talib, J.A. (2005), Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis, *Environmental Geology*, Vol. 47, No. 7, pp. 982-990.
- Pradhan, B., Lee, S., Mansor, S., Buchroithner, M., Jamaluddin, N., and Khujaimah, Z. (2008), Utilization of optical remote sensing data and geographic information system tools for regional landslide hazard analysis by using binomial logistic regression model, *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol. 2, No. 1, pp. 35-42.
- Suzen, M.L. and Doyuran, V. (2004), A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate, *Environmental Geology*, Vol. 45, No. 5, pp. 665-679.