

로지스틱 회귀분석 기법을 이용한 강원도 산사태 취약성 평가 및 분석

연영광^{1·2*}

Evaluation and Analysis of Gwangwon-do Landslide Susceptibility Using Logistic Regression

Young-Kwang YEON^{1·2*}

요 약

본 논문에서는 로지스틱 회귀분석 기법을 이용하여 산사태 취약성 분석을 수행하였다. 예측모델의 성능은 모델의 적합도 검증을 통해 사용된 데이터가 모델에 얼마나 잘 반영되어 구축되었는지에 대한 적합도 평가뿐만 아니라 예측성능에 대한 평가가 필요하다. 따라서 이 논문에서는 모델에 대한 객관적인 결과를 얻기 위해 이와 같은 두 가지 측면에 대하여 예측성능 평가를 적용하였다. 연구지역은 2006년도 집중 호우로 많은 산사태가 발생한 강원도 인제 일대를 대상으로 하였다. 산사태 관련인자들은 지형도, 토양도, 임상도로부터 추출하였다. 예측모델에 대한 평가는 누적이득차트 곡선의 하부영역을 계산하였다. 예측모델의 적합도 평가에서는 87.9% 교차검증을 통한 예측정확도 평가 결과 84.8%로 두 평가 결과간의 큰 차이를 보이지 않으며 좋은 성능의 결과를 산출하였다. 이는 산사태와 관련성이 높은 유발인자와 예측모델 성능에서 기인된 결과로 해석될 수 있다.

주요어 : 산사태, 로지스틱 회귀분석, 교차검증, 모델평가

ABSTRACT

This study conducted landslide susceptibility analysis using logistic regression. The performance of prediction model needs to be evaluated considering two aspects such as a goodness of fit and a prediction accuracy. Thus to gain more objective prediction results in this study, the prediction performance of the applied model was evaluated considering

2011년 10월 4일 접수 Received on October 4, 2011 / 2011년 11월 9일 수정 Revised on November 9, 2011 / 2011년 11월 18일 심사완료 Accepted on November 18, 2011

1 한국지질자원연구원 국토지질연구본부 Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

2 과학기술연합대학교 대학원 지리정보시스템공학과 Department of Geoinformatic Engineering, University of Science & Technology

* 연락처 E-mail : ykyeon@kigam.re.kr

two such evaluation aspects. The selected study area is located between Inje-eup and Buk-myeon in the middle of Kwangwon. Landslides in the study area were caused by heavy rain in 2006. Landslide causal factors were extracted from topographic map, forest map and soil map. The evaluation of prediction model was assessed based on the area under the curve of the cumulative gain chart. From the results of experiments, 87.9% in the goodness of fit and 84.8% in the cross validation were evaluated, showing good prediction accuracies and not big difference between the results of the two evaluation methods. The results can be interpreted in terms of the use of environmental factors which are highly related to landslide occurrences and the accuracy of the prediction model.

KEYWORDS : Landslides, Logistic Regression, Cross Validation, Model Evaluation

서론

산사태는 사면 경계부에서 생긴 전단파괴에 의해 흩덩이 또는 돌덩이가 아래로 내려오는 것으로 정의되며(Skempton and Hutchinson, 1969), 그 형태에 따라 낙반(Fall), 전도(Topple), 슬라이드(Slide), 퍼짐(Spread) 및 유동(Flow)으로 분류된다(Crudon and Varnes, 1996). 국내 산사태의 경우 여름철 집중 강우로 인해 집중적으로 발생되며(Hong, 1990), 이로 인해 도로, 교량 및 농지의 유실 뿐만 아니라 많은 인명피해를 주고 있다.

산사태의 피해를 저감하기 위해서는 산사태 취약지구의 산정과 관리가 필요하다. 이러한 필요성에 의해 산사태 재해와 위험성 산정에 관련된 연구 주제들이 학계에 주요관심사가 되고 있다(Aleotti and Chowdhury, 1999). 산사태의 취약성 분석은 산사태 산사태를 유발시키는 성향으로 정의(Guzzetti *et al.*, 2006)되어 대상지역을 확률적으로 표현한다. 이러한 산사태 취약성 분석은 주로 광역적 분석에 응용되며, 분석기법들로는 확률적 방법(Luzi *et al.*, 2000; Lee and Min, 2001; Donati and Turrini, 2002; Lee and Choi, 2003; Neuhäuser and Terhorst, 2007), 통계기법(Atkinson and Massari, 1998; Dai and Lee, 2002; Nefeslioglu *et al.*, 2008), 인공신경망(Ermini *et al.*, 2004; Lee *et al.*,

2004; Gómez and Kavzoglu, 2005; Melchiorre *et al.*, 2008) 등이 활용되고 있다. 이러한 예측모델들은 이미 발생한 산사태 위치에서의 산사태 유발가능 요소들에 대한 발생 빈도를 이용하여 모델을 구축한다. 선행 연구들에서의 산사태 취약성 분석과정은 두 단계로, 예측모델 구축 단계와 구축한 예측모델을 이용하여 사용한 산사태 발생위치에 대한 적합성 검증 및 평가 단계를 구성한다.

산사태 취약성 분석 결과는 두 가지 측면에서 평가가 필요하다. 즉 모델이 훈련과정에서 얼마나 사용한 데이터에 맞게 모델이 구축되었는지에 대한 적합성 평가와, 모델의 향후 발생 가능한 사건에 대한 예측성능에 대한 평가가 필요하다. 그러나 과거 산사태관련 연구들에서는 대부분 적합성에 대한 취약성 분석을 주로 고려하였으며, 사건발생에 대한 취약성은 향후 발생 가능성을 염두에 두어야 할 필요가 있기 때문에 예측 정확도와 같이 제시할 필요가 있다. 일반적으로 적합도 평가에서는 훈련과정에서 사용된 사건 데이터를 모두 사용하며, 예측 평가에서는 별도의 데이터를 이용한다. 모델의 정확도 측면에서 적합도 평가는 모델구축에 사용된 데이터가 재사용되기 때문에 보다 정확성이 높은 결과를 도출하며, 예측평가 결과가 적합도 평가 결과에 가까울 때 모델구축이 바람직하게 구축되어 졌다고 볼 수 있다.

따라서 이 논문에서는 산사태 취약성 분석을 통해 산사태 원인을 분석해 보고, 분석 결과에 대하여 적합도 및 예측도 평가를 통해 보다 객관적인 결과를 도출 하고자 한다. 이를 위해 강원도 인제군지역에서 발생한 산사태에 대하여 로지스틱 회귀기법을 이용하여 취약성 분석을 수행하며, 적합도 평가와 예측성능 평가를 해 보고자 한다. 평가를 위한 산정기준으로 누적이득차트(Chung and Fabbri, 1999)와 백분위 등급 기준을 이용한다.

연구지역

이 논문의 산사태 취약성 분석을 위한 연구 대상지역은 강원도 인제군과 북면일대로 그림 1과 같다. 해당지역은 좌표상으로 $38^{\circ}5'52.19"N \sim 38^{\circ}3'42.43"N$, $128^{\circ}12'4.92"E \sim 128^{\circ}17'56.08"E$ 로 걸쳐 있으며, 공간적 범위는 $34,696,750m^2$ 이다. 이 지역의 산사태는 2006년 7월 11일부터 18일간 내린 집중호우로 인해 발생했다. 산사태가 발생한 2006의 연간 강우량은 $1740mm$ 이었으며, 8일간의 강우량은 $559mm$ 으로 당해 연도 강우량에 큰 영향을 주었다. 선정된 연구지역내의 산사태는 0.4m급 항공영상과 수치고도모델 분석을 통해 그림 2와 같이 590점으로 조사되었으며, 향후 교차검증을 위해 랜덤으로 두 그룹 LandslideSetA와 LandslideSetB로 나누었다.

산사태와 같은 공간사건들은 이미 발생된 사건에 대한 환경적 조건의 유사성으로 미래의 사건에 대해 예측 가능하다. 산사태의 발생 유발환경 관련하여 지형, 지질, 토양, 식생요소들을 고려할 수 있으며(Bromhead, 1992), 국내 산지관리법 시행규칙(제 5조 및 제 28조의 2 관련)에 산사태 위험 판정 기준에 임상, 토양, 지형요소들이 명시되어 있다.

이 연구에서의 집중강우로 유발된 산사태 환경요인을 추출하기 위해 선행연구에서의 사용된 요소들을 고려하여 지형도, 토양도 및 임상도를 이용하였으며, 화강암 지대의 대부분 동일암상분포로 인해 지질도는 제외되었다. 지형도

는 지형적 구조형태에 따라 수계형성 및 토사유입의 영향으로 산사태를 유발할 수 있다. 따라서 지형적 형태를 반영할 수 있는 경사(t_{slope}), 경사방위(t_{aspect}), 곡률($t_{curvature}$), 그리고 능선으로부터의 거리($t_{ridgeBuffer}$)를 추출하였다. 토양도로부터 식생의 성장환경 및 토양의 물리적 상태와 관련된 요소들을 선별하였으며, 토질($s_{texture}$), 배수($s_{drainage}$), 모재($s_{material}$), 유효토심($s_{thickness}$)을 추출하였다. 임상도는 식생의 현황과 관련된 인자들을 고려하여, 수종(f_{type}), 수령(f_{age}), 직경두께($s_{thickness}$), 밀도($s_{density}$) 요소들을 추출하였다. 각 유발요소들은 1:25,000 축척의 지형도의 5m 등고선 간격을 기준으로 5x5m 해상도로 변환하였다. 각 추출된 인자들의 구성은 표 1과 같으며, 경사, 곡률 및 능선거리는 연속형, 이외의 레이어는 이산형 속성 값을 갖는다. 산사태 위치를 포함한 13개의 레이어들을 예측모델의 입력 데이터로 이용하기 위해 5m×5m의 해상도로 전체 1,385,973개의 픽셀을 구성하였다.

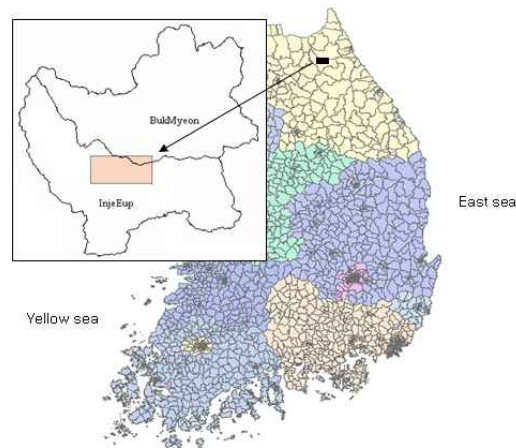


FIGURE 1. Study area(Inje, Kwangwon)

로지스틱 회귀분석 기법

로지스틱 회귀기법은 하나의 독립변수와 다수의 종속변수간의 중회귀 관계의 형태를 따

TABLE 1. Thematic maps for the landslide susceptibility analysis

Map Source	Thematic Layer	Type	Scale(resolution)	Conversion
Airborne Image	landslide area	class	0.4m	
	t_slope	continuous		
Topological Map	t_aspect	discrete	1:5,000	
	t_curvature	continuous	(Contour 5m)	
	t_buffered ridge	continuous		
Soil map	s_texture	discrete		
	s_drainage	discrete	1:25,000	5 m X 5 m
	s_material	discrete		
Forest Map	s_thickness	discrete		
	f_type	discrete		
	f_diameter	discrete	1:25,000	
	f_density	discrete		
	f_age	discrete		

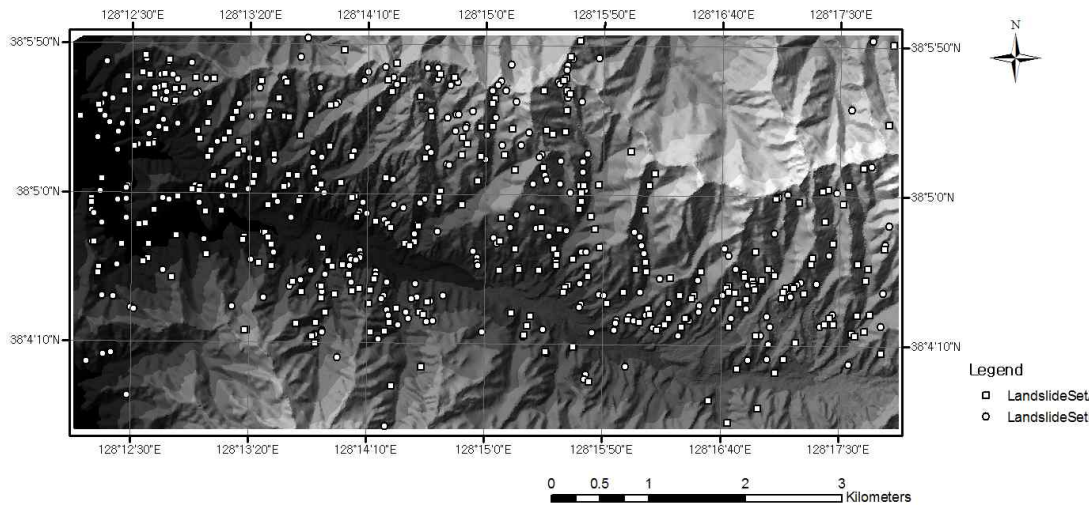


FIGURE 2. Landslide distribution locations. Two groups of landslides are separated for the cross validation.

른다(Atkinson and Massari, 1998). 로지스틱 회귀기법의 장점은 일반 선형회귀 모델에 추정 링크함수의 추가를 통해, 연속형, 이산형의 복합 데이터 타입을 지원하며, 판별분석과 같이 정규분포 형태의 데이터를 필요로 하지 않는다. 로지스틱 회귀기법 분석과정은 독립변수를 로짓(logit) 변환 후 최대우도추정법(maximum likelihood estimation)을 이용한

다. 이러한 방식에서 로지스틱 회귀추정은 특정 사건발생의 확률을 추정한다(Atkinson and Massari, 1998; Dai and Lee, 2002).

로지스틱 회귀의 산사태 응용에서, 독립변수인 산사태 사건발생 유무에 대하여 지형도, 토양도 및 임상도에서 추출한 산사태 발생 인자의 평균이 독립변수 x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)에 대한 선형 식 (1)으로 표현된다.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (1)$$

여기서 b_0 은 모델의 절편, n 은 독립변수의 개수, b_i 는 각 x_i 의 계수이다.

회귀 모형에서 산사태 유발 인자로 사용되는 독립변수들은 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 의 값을 가질 수 있으며, 이때 출력되는 y 값의 범위 역시 $-\infty$ 에서 $+\infty$ 의 값을 갖게 된다. 산사태 발생에 대한 확률적 표현을 위해 0에서 1사이의 값을 갖는 로지스틱 변환과정을 이용할 수 있으며, 이는 다음 식 (2)에 의해 변환되며, 여기서 P 를 로짓이라 한다. 따라서 산사태 사건 발생의 확률로 선형 로지함수를 이용하여 z 의 선형회귀 결과에 대하여 0과 1사이의 값을 산출하도록 한다.

$$P = \frac{1}{1 + e^{-y}} \quad (2)$$

이와 같은 로지스틱 회귀기법의 산사태 응용에서의 장점은 산사태 발생과 관련성이 높지 않은 산사태 유발 환경요소가 포함되어 있더라도 예측 결과에 민감한 반응을 보이지 않는 장점이 있다.

적용 및 실험

예측모델의 궁극적인 목적은 최소의 일반화 오류를 포함한 정확도 높은 예측모델을 구축하는 것이다(Maimon and Rokach, 2005). 이러한 측면을 고려할 때 산사태 취약성 분석 결과는 예측 성능을 고려하여 평가되어야 한다. 예측에 대한 정확도의 평가로 가장 일반적으로 k-폴드 교차검증(Lachenbruch and Mickey, 1968)이 활용되고 있으며, 예측모델이 훈련한 데이터로부터 과적합 여부를 객관적으로 확인할 수 있게 한다. 이 방법은 k 가 2인 경우 전체데이터 집합을 두 개의 그룹으로 랜덤하게 나누어 상호 데이터를 이용하여 훈련과 검증과정을 두 단계로 반복하게 된다. 이 연구에서는 그림 2에 식별된 산사태 영역에서 첫 번째 단계에서는 LandslideSetA를 이용하여 훈련하며 검증은 LandslideSetB를 이용한다. 두 그룹의 데이터는 두 번째 단계에서 그 역할을 달리한다. 검증에 대한 일련의 과정이 그림 3에 도시되어 있다. 모델의 적합성 평가는 검증과정에서 조사된 모든 산사태 위치를 이용하여 평가한다. 정확도에 대한 산정은 평가되는 산사태 위치에 대한 예측치의 백분위 등급 값을 상자도표와 누적이득차트를 이용하여 예측 결과를 평가 하고자한다.

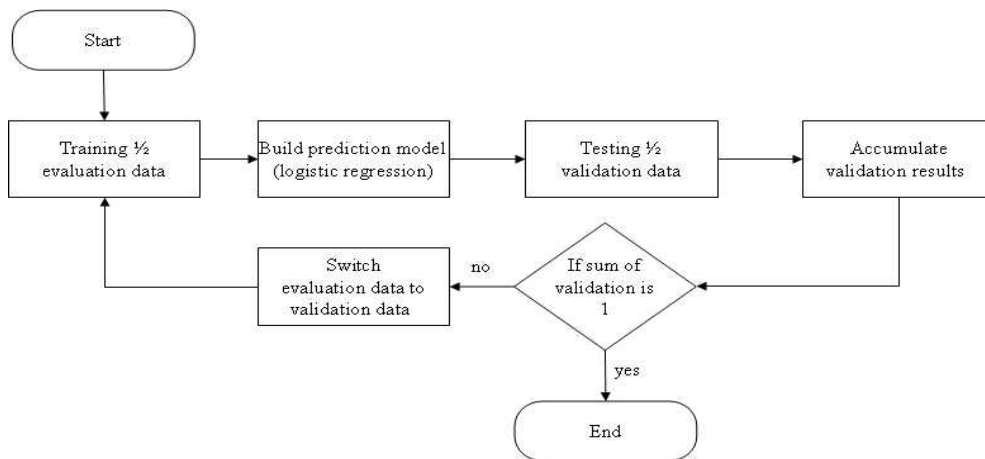


FIGURE 3. Two fold cross-validation process

적합도 평가 결과를 위해 조사된 모든 산사태 위치를 이용하여 식 (3)이 도출되었다. 각 식에는 연속형 변수의 회귀계수가 포함되어져 있으며, 범주형 변수에 포함된 회귀계수 값은 표 2에 정리되어 있다. 연구지역의 각 위치마다의 환경요소 값들에 대한 회귀식의 계산 결과는 로짓 변환을 통해 산사태 발생 유무에 대하여 0과 1사이의 확률 값으로 변환된다. 산사태 발생을 1로 간주할 때 발생에 대한 취약성을 각 위치값은 그림 4와 같이 표현된다. 산사태 취약성에 대한 해석은 각 회귀 계수 값이 양의 값으로 클수록 로짓 변환된 확률 값이 커지기 때문에 산사태 취약성에 높은 영향을 주고, 음의 값은 양의 값의 반대의 개념으로 풀이된다. 유도된 회귀 계수 값을 통해 해석될 수 있는 내용 중 특히 주목되는 부분은, 임상도에서 추출한 인자로 나무의 직경이 작고, 연생이 비교적 어리고, 나무의 밀도가 중간정도인 소나무 인공조림에서 산사태 발생과의 밀접한 인과관계가 형성된 것을 확인할 수 있다. 이는 인공조림으로 인한 산지 환경 변화가 산사태 유발에 영향을 준 것으로 해석할 수 있다.

예측적인 측면을 고려하여 평가한 교차검증에서의 첫 번째 과정에서 LandslideSetA를 이용해 훈련한 결과가 그림 5(a)이며, 두 번째 단계에서 LandslideSetB를 이용하여 그림 5(b)가 도출되었다. 시각적으로 표현된 산사태 위치(LandslideSetA)를 이용하여 예측모델을 구축하여 산사태 취약성도를 작성하였으며, 원형으로 표현된 위치(LandslideSetB)에서 평가과정을 수행하였다. 그림 5(b)에서는 각 위치 그 검증 평가방법을 바꾸어 수행하였다. 평가 결과 훈련 공간영역에서 평가되는 산사태위치에 대한 백분위 등급값의 분포는 그림 6의 상자도표로 묘사하였다. 상자도표에서 원으로 묘사한 것은 예외자이며, 별로 묘사한 위치는 이상치이다. 이들 통계치는 표 3에 묘사된 바와 같이 교차검증에서의 평균 84.7 중위수 91.3, 적합도 평가에서는 평균 87.8, 중위수 93.2가 산정되었다. 누적이득차트에서의 정량적 산출

결과는 그림 7에 묘사되어있다. 누적이득차트는 좌측 상단으로 치우칠 때 성능이 좋은 것으로 해석될 수 있다. 그림 7의 그래프에서 보이듯이 적합성 평가 결과에서 정확도가 높은 것으로 보이고 있으며, 곡선들의 하부 면적을 전체 100%를 기준으로 교차검증에서 84.8%, 적합성 검증에서 87.9%를 보이고 있다. 평가되는 산사태 위치에서의 백분위 등급 값들의 분포 역시 적합성 검증 결과에서 좀 더 상위 등급에 밀집된 것을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 y = & -22.556 + (0.13 \text{ t_slope}) \\
 & + (-0.09 \text{ t_ridgeBuffer}) \\
 & + (-0.288 \text{ t_curvature}) + \text{t_aspect}^* \\
 & + \text{f_age}^* + \text{f_density}^* + \text{f_type}^* \\
 & + \text{s_drainage}^* + \text{s_material}^* \\
 & + \text{s_texture}^* + \text{s_thickness}^* \quad (3)
 \end{aligned}$$

토의 및 결론

이 논문에서 2006년도 강원도 인제지역에서 발생한 산사태에 대하여 취약성 분석을 수행하였다. 산사태 취약성 분석을 위해 산사태 발생 시점의 스냅샷 형태의 자료를 이용하였다. 취약성 분석에서 주목되는 부분은 수증 변화에 의한 산지 환경 변화가 산사태 발생에 영향을 준 요인으로 밝혀졌다. 이러한 인위적 환경 변화에 대한 분석은 해당 환경요소 변화에 대한 전후의 취약성도의 차이를 이용하여 인위적 활동에 대한 취약성을 분석할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 환경 변화에 따른 취약성 분석은 수집 가능한 자료의 한계로 인해 향후 연구로 남기고자 한다.

예측모델의 성능적 특징은 훈련 데이터에 과적합될 수록 적합도가 높게 나올 수 있으나, 예측 정확도는 이에 반비례한 성능으로 평가될 수 있다. 따라서 적합도와 예측도의 평가 결과가 근사할 때 바람직한 예측모델이 구축되었다고 할 수 있다. 이 논문에서는 적합도 평가와 예측평가 결과의 차이가 누적이

TABLE 2. Coefficients of categorical data from the result of goodness-of-fit test

	Value Domain	Coefficient		Value Domain	Coefficient
t_aspect	FLAT	-11.645	s_texture	Coarse loamy	-11.327
	NORTH	.344		Fine loamy	-12.603
	NORTHEAST	-.090		Fine loamy or coarse loamy	-26.518
	EAST	1.270		Loamy skeletal	-10.163
	SOUTHEAST	1.372		Sandy skeletal	.000
	SOUTH	.896	s_material	Residuum on granite	1.895
	SOUTHWEST	.530		Alluvium	3.631
	WEST	.220		Alluvium-colluvium from acid rock	-10.178
	NORTHWEST	.000	Alluvium-colluvium from granite	1.242	
f_diameter	18 ~ 28	1.197		Colluvium	2.856
	Over 30	.000		Colluvium from granite	1.601
f_age	Non-forest	-1.187		Colluvium from porphyry	1.917
	11 - 20 year	1.469		Local alluvium	-9.685
	21 - 30 year	.869		Local alluvium-colluvium	.000
	31 - 40 year	-.340	s_drainage	River overflow area	11.614
	41 - 50 year	-.557		Imperfectly	-.220
	over 51 year	.000		Moderately well	-.402
f_density	Less than 50%	.032		Somewhat excessively	.728
	51-70%	.466		Well	.000
	Over 71%	.000	s_thickness	Deep	23.242
f_type	Non-forest	1.055		Moderately deep	21.236
	Pine	-.045		Shallow	21.622
	Non-conifer	-.052	Very shallow	.000	
	Agricultural Land	-11.067			
	Mixed (Non-conifer, conifer)	-.989			
	Planted pine	.635			
	Planted non-conifer	-12.310			
	Korean pine	.263			
	Larch	.000			

특차트 및 상자도표의 백분위수의 평균치가 3.1%의 근접한 정확도를 보였다. 이는 산사태와 적합한 유발인자의 선택, 사용한 예측모델 성능에서 기인된 결과로 해석될 수 있다.

이 논문에서는 산사태 취약성 분석을 로지

스틱 회귀기법을 이용하여 예측적 측면의 성능을 고려하여 평가해 보았다. 이러한 평가 결과는 예측모델 성능의 객관적 지표로 활용될 수 있으며, 취약성 분석결과에 대한 해석에 신뢰를 높일 수 있다. 특히 예측성능 평가

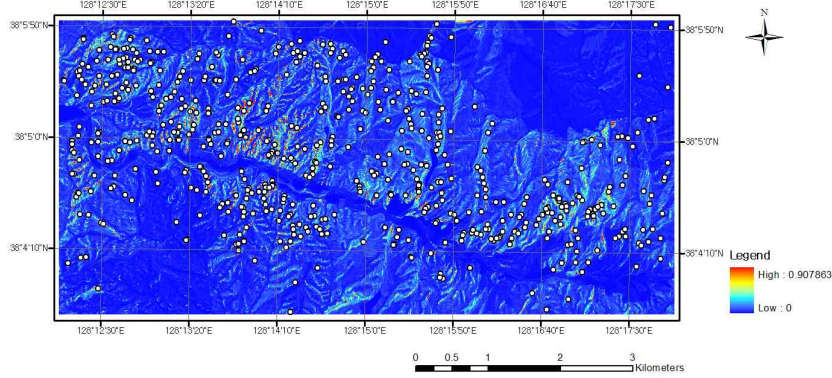
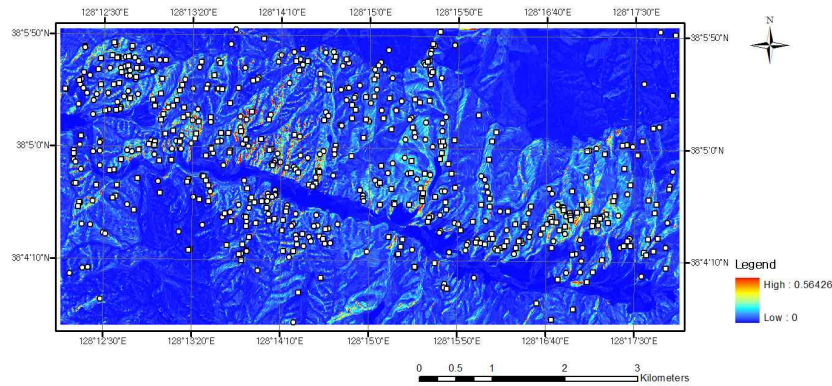
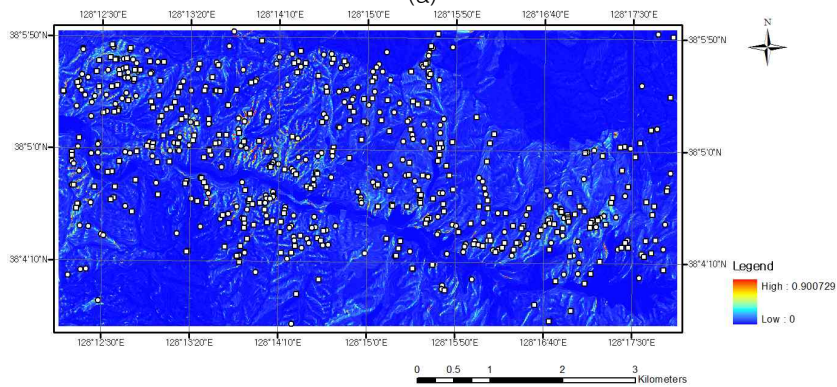


FIGURE 4. Landslide susceptibility map using all landslides occurrence locations



(a)



(b)

FIGURE 5. Landslide susceptibility maps; (a) is the result using LandslideSetA in the first fold, and (b) is the result using LandslideSetB in the second fold

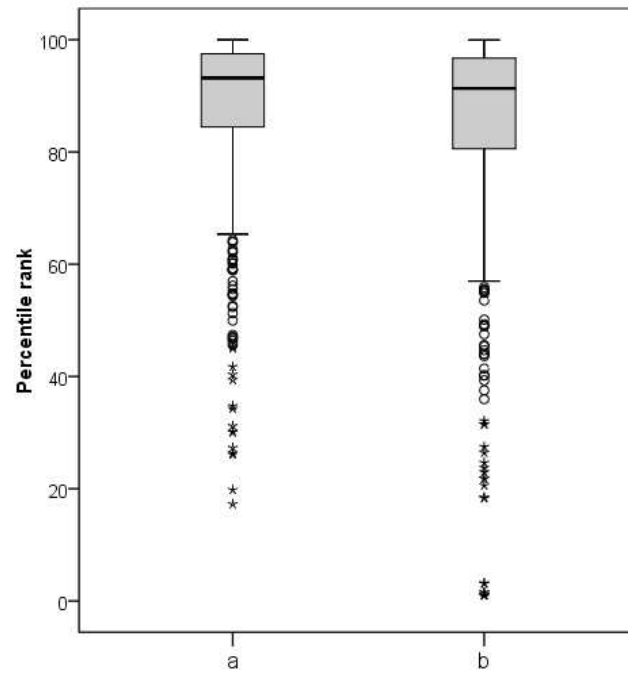


FIGURE 6. Box plots of landslide percentile ranks; a is the result of goodness-of-fit test and b is the result of cross-validation

TABLE 3. Statistic of box plot

Descriptives		Goodness-of-fit		Cross-validation	
		Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
Mean		87.8239	.60079	84.7140	.76293
95% Confidence	Lower Bound	86.6440		83.2156	
Interval for Mean	Upper Bound	89.0039		86.2124	
5% Trimmed Mean		89.7370		87.3072	
Median		93.1933		91.3141	
Variance		212.957		343.420	
Std. Deviation		14.59306		18.53159	
Minimum		17.26		1.02	
Maximum		99.98		99.97	
Range		82.72		98.95	
Interquartile Range		13.08		16.18	
Skewness		-2.100	.101	-2.321	.101
Kurtosis		4.793	.201	6.084	.201

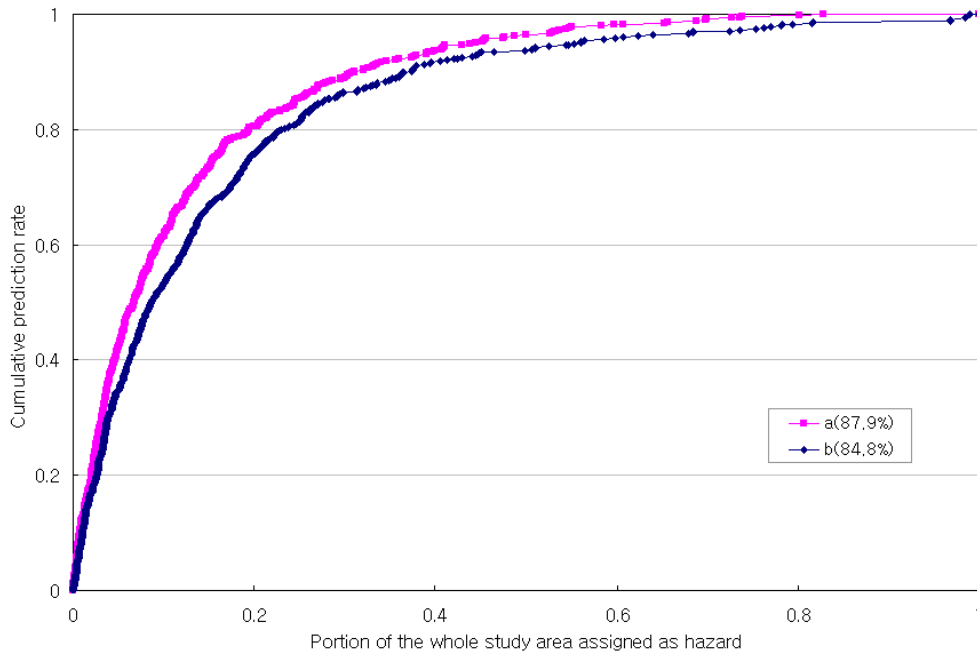


FIGURE 7. Success rate curves; a is the result of goodness-of-fit test and b is the result of cross-validation

를 통한 로지스틱 회귀기법은 예측 정확성과 원인분석을 필요로 한 산사태 예상 혹은 취약 지구에서 산사태 예방활동에 활용 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 한국지질자원연구원과 항공우주연구원의 공동연구사업인 「지상관측 위성자료 clearing house 구축」의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드린다. **KAGIS**

참고 문헌

Aleotti, P. and R. Chowdhury. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the

Environment 58(1):21-44.
 Atkinson, P.M. and R. Massari. 1998. Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. Computer & Geosciences 24(4):373-385.
 Bromhead, E.N. 1992. The Stability of Slopes. Blackie Academic & Professional, 2ed., London, UK. 411pp.
 Chung, C.F. and A.G. Fabbri. 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 65(12):1388-1399.
 Cruden, D.M. and D.J. Varnes, 1996. Landslides types and processes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster(ed.).

- Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, Special Report 247. National Academy Press, Washington D.C., USA, pp.36–75.
- Dai, F.C. and C.F. Lee. 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau island, Hong Kong. *Geomorphology* 42:213–228.
- Dai, F.C., C.F.J. Lee, J. Li and Z.W. Xu. 2001. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, HongKong. *Environmental Geology* 40:381–391.
- Donati, L. and M.C. Turrini. 2002. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). *Engineering Geology* 63: 277–289.
- Ermini, L., L. Catani and N. Casagli. 2004. Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66(1–4):327–343.
- Gómez, H. and T. Kavzoglu. 2005. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology* 78:11–27.
- Guzzetti, F., P. Reichenbach, F. Ardizzone, M. Cardinali and M. Galli. 2006. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology* 81:166–184.
- Hong, W.P. 1990. Recent technical review on slope stabilizing methodology. *Korean Geotechnical Society* 6(3):88–98.
- Lachenbruch, P. and R. Mickey. 1968. Estimation of error rates in discriminant analysis. *Technometrics* 10:1–11.
- Lee, S. and U.C. Choi. 2003. Development of GIS-based geological hazard information system and its application for landslide analysis in Korea. *Geosciences Journal* 7:243–252.
- Lee, S., J.H. Ryu, J.S. Won and H.J. Park. 2004. Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology* 71(3–4): 289–302.
- Lee, S. and K.D. Min. 2001. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology* 40:1095–1113.
- Luzi, L., F. Pergalani and M.T.J. Terlien. 2000. Slope vulnerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology* 58:313–336.
- Maimon, O. and L. Rokach. 2005. *The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. Springer, USA. 1383pp.
- Melchiorre, C., M. Matteucci, A. Azzoni and A. Zanchi. 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. *Geomorphology* 94:379–400.
- Nefeslioglu, H., T. Duman and S. Durmaz. 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). *Geomorphology* 94:401–418.
- Neuhäuser, B. and B. Terhorst. 2007.

Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology* 86:12-24.

Skempton, A.W. and J.N. Hutchinson. 1969. Stability of natural slopes. *Proceeding of the 7th International Conference of Soil Mechanics*. Mexico, 1969. Vol. 2, pp.291-340. 