

설악산 국립공원 지역 토석류 발생가능성 평가 기법의 개발

이성재¹ · 김길원² · 정원옥³ · 강원석⁴ · 이은재^{5*}

¹서울대학교 학슬림, ²경상대학교 농업생명과학연구원,
³국립공원관리공단 국립공원연구원, ⁴국립산림과학원 산림보전연구부,
⁵국립산림과학원 산림기술경영연구소

Development of a Prediction Technique for Debris Flow Susceptibility in the Seoraksan National Park, Korea

Sung-Jae Lee¹, Gil Won Kim², Won-Ok Jeong³, Won-Seok Kang⁴ and Eun-Jai Lee^{5*}

¹University Forests of Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Institute of Agriculture Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

³Korea National Park Research Institute, Korea National Park Service, Wonju 26441, Korea

⁴Department of Forest Conservation, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

⁵Technology and Management Research Center, National Institute of Forest Science, Pocheon 11186, Korea

요약: 최근의 기후변화는 산지토사재해의 발생을 가속시키고 있다. 산지토사재해 중 토석류는 전파길이가 길고 매우 빠른 거동 특성을 갖기 때문에 매우 위협적으로 인식된다. 본 연구는 설악산 국립공원내 토석류 발생지 263개소를 대상으로 발생 길이(m)에 미치는 영향인자를 구명하고, 수량화이론(I)을 사용하여 발생 길이에 대한 각 산림환경 인자의 기여도 분석을 하여 예방적인 측면에서 국립공원내 토석류 발생 가능성지역에 대한 예측기법을 개발하였다. 각 산림환경 인자의 Range를 추정된 결과, 종단사면(0.9676)이 가장 높게 나타나 설악산 국립공원의 토석류 발생 가능성에 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었으며, 다음으로는 횡단사면(0.6876), 고도(0.2356), 사면경사(0.1590), 방위(0.1364) 순으로 나타났다. 설악산 국립공원 산악지 토석류 발생 발생가능성 판정표를 기준으로 5개의 산림환경 인자의 category별 점수를 계산한 추정치 범위는 0점에서 2.1864점 사이에 분포하고 있으며, 중앙값은 1.0932점으로 토석류 발생가능성을 예측을 작성한 결과 I 등급은 1.6399 이상, II등급 1.0932~1.6398, III등급 0.5466~1.0931, IV등급 0.5465 이하로 나타나 1등급, 2등급에서 토석류 발생 비율이 86.3%로서 높은 적중률을 보였다.

Abstract: Recently, climate change has gradually accelerated the occurrence of landslides. Among the various effects caused by landslides, debris flow is recognized as particularly threatening because of its high speed and propagating distance. In this study, the impacts of various factors were analyzed using quantification theory(I) for the prediction of debris flow hazard soil volume in Seoraksan National Park, Korea. According to the range using the stepwise regression analysis, the order of impact factors was as follows: vertical slope (0.9676), cross slope (0.6876), altitude (0.2356), slope gradient (0.1590), and aspect (0.1364). The extent of the normalized score using the five-factor categories was 0 to 2.1864, with the median score being 1.0932. The prediction criteria for debris flow occurrence based on the normalized score were divided into four grades: class I, >1.6399; class II, 1.0932–1.6398; class III, 0.5466–1.0931; and class IV, <0.5465. Predictions of debris flow occurrence appeared to be relatively accurate (86.3%) for classes I and II. Therefore, the prediction criteria for debris flow will be useful for judging the dangerousness of slopes.

Key words: debris flow, landslide, national parks, quantification theory, prediction criteria

* Corresponding author
E-mail: ejaylee@korea.kr

ORCID
Eun-Jai Lee  <https://orcid.org/0000-0002-6332-2504>

서 론

우리나라의 산지토사재해는 매년 6~8월경 이상 강우로 국지성 집중호우가 산발적으로 발생하며, 이는 자연적인 환경파괴를 가속화시켜 산림 및 생태계의 질서를 파괴할 뿐만 아니라 국민의 생명피해와 국토를 훼손하는 큰 원인 중의 하나다(Lee, 2014; Kwon, 2015). 특히 국립공원지역은 일반 산지에 비해 지형이 험준하고 고산지대로 이루어져 있기 때문에 집중적인 강우로 인해 무거워진 토층(암반, 쇄설물질, 토사 등)이 빗물과 함께 계곡을 따라 하류로 빠르게 이동하면서 피해가 대형화되고 있다. 최근 우리나라는 산지토사재해로 인하여 2006년부터 2015년까지 피해 면적 395 ha, 인명피해 218명, 재산 피해 5조 4천억원에 달하는 천문학적 인명 및 재산피해가 발생한 것으로 조사되었다(Lee et al., 2019).

전 세계적으로 산지토사재해가 발생하는 국가들에서는 토석류 발생위험 정도에 미치는 영향요인을 선정하고 이를 기반으로 토석류 취약지를 지정하여 재해방지 및 대비 정책에 활용하고 있다(Brand, 1988). 국내 산지토사재해로부터 인명 및 재산 피해를 저감시키기 위해 다양한 방법으로 토석류 발생 가능 지역 예측과 관련된 연구를 수행하고 있다. 이와 관련된 연구로는 인제군 산사태 지역의 토석류 거동 예측기법 적용(Kim and Hwang, 2011), 도시내 산지의 토석류 위험구역예측(Kim et al., 2015), 고산지역에 있어서 토석류 발생 위험성의 예측(Ma et al., 2015), 정밀토양도와 GIS를 이용한 토석류 발생지역 예측 분석(Kim and Han, 2017), 대동산 토석류 특성분석 및 위험지역 예측에 관한 연구(Choi et al., 2018) 등으로 다양한 분야의 연구 및 조사가 진행되고 있다. 또한 외국의 관련 연구로는 수량화법에 의한 절취 법면의 안전도 및 산지토사재해 위험지 예측을 위한 수량화 해석 등이 있다(Brand, 1984, 1998; Dai et al., 2002; Chau et al., 2004).

한편, 토석류 피해를 최소화하기 위해서는 토석류의 정확한 발생 예측 및 주변 환경인자와의 특성을 파악하는 것이 필요하지만 이는 다양한 영향요인들이 복합적으로 작용할 뿐만 아니라 토석류 발생 영향인자와 관련된 현장 데이터 부족으로 예측이 어려운 실정이다(Vmes, 1978; Hutchinson, 1988; EPOCH, 1993; Ma and Jeong, 2010; Lee, 2014; Lee and Ma, 2018; Lee et al., 2019). 특히, 토석류 발생에 대한 사전 예측이나 발생원인 규명에 대한 국내 연구는 외국에 비해 미흡한 상황이며, 토석류의 정확한 발생원인, 유동 및 퇴적 특성, 환경적 영향요인을 파악하는 것이 필요하다(Ma, 1994; Ma, 2001; Ma and Jeong, 2010; Lee, 2014; Lee and Ma, 2018).

따라서 본 연구에서는 설악산 국립공원을 중심으로 토

석류 규모(발생 길이)에 대한 산림환경 인자가 어느 정도의 영향을 미치고 있는가를 추정하기 위하여 1)상관 및 단계별 회귀분석을 통하여 높은 상위인자 선별작업으로 범주를 재분류하여 설악산 국립공원 토석류 발생 가능성 예측을 위한 판정 기준표를 개발하였다. 2)판정 기준표를 이용하여 I 등급(토석류 발생가능성 대), II등급(토석류 발생가능성 중), III등급(토석류 발생가능성 소), IV등급(안정)을 제시함으로써 토석류 발생으로 인한 인명 및 재산 피해를 최소화하고 발생 가능 지역에 대한 관리 방안 수립에 필요한 기초자료를 제공하고 수행하였다.

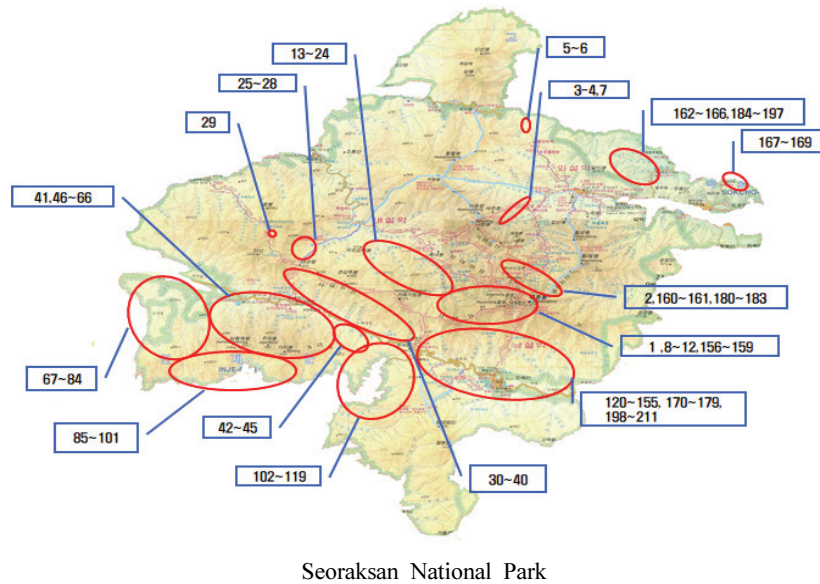
재료 및 방법

1 조사 방법

산악형 설악산 국립공원에서 집중호우 및 태풍 등으로 인하여 Figure 1과 같이 토석류피해가 발생한 263개소를 선정하였으며, 설악산 국립공원 협조를 받아 직접조사를 실시하였다. 조사시기는 2005년부터 2014년까지 실시하였으며, 현장조사시 거리측정기, GPS, 스태프(staff), 클리노미터(clinometer) 등을 이용하여 토석류 발생지 길이(m)는 발생부, 유하부, 퇴적부로 구분하여 각각 측정하여 평균하였다(Ma et al., 2014; Lee, 2014; Lee et al., 2015; Lee and Ma, 2018). 토석류 발생 길이와 이에 미치는 영향인자를 도출하기 위하여 10개의 산림환경인자(사면경사, 방위, 형태, 위치, 해발고, 임상, 모암, 토심 등)를 조사하였다.

2 분석방법

설악산 국립공원 토석류 가능성지역을 예측하기 위해 각각의 산림환경 인자를 Table 1과 같은 기준으로 구분하였다(Choi, 1986; Lee and Ma, 2018; Lee et al., 2019). 이들 산림환경 인자가 토석류 발생 길이에 어느 정도의 영향을 미치고 있는가를 분석하기 위하여, 종속변수(Y: 토석류 발생 길이(m))가 p- 1개의 독립변수(Xn: 산림환경 인자)에 의하여 변화함을 가정한 후, 단계별 회귀분석(stepwise regression analysis)을 실시하였다(Lee, 2014; Lee and Ma, 2018). 토석류 발생지역은 많은 인자가 복합적으로 영향을 미치고 있으므로, 이들 산림환경 인자가 어느 정도의 영향을 미치고 있는가를 추정하기 위하여, 종속변수[토석류 발생 길이(m)]가 독립변수(산림환경 인자)에 의하여 변화함을 가정한 토석류 길이별 범주는 Table 1에 표시한 것과 같이 요인의 특성을 명확하게 구분하여 나타내었다. 분류한 범주는 가급적 균일하게 배치되도록 하였으며, 결과 해석 자료의 객관적 근거를 고려하여 각 산림환경 인자와 토석류 발생 길이와 상관 및 단계별회귀분석을 통하여 높은 상위인자 선별작업으로 범주를 재분류하여 최종적으로



Seoraksan National Park
Figure 1. Map of the study sites (The red circles are location of debris flow).

Table 1. Classification and reactionary number of each factor by category.

Factors	Category					Total
	1	2	3	4	5	
Slope gradient	<20°	21 ~ 30°	31 ~ 40°	41 ~ 50°	51° <	
React. no.	14	65	110	43	31	263
Aspect	N	E	S	W		
React. no.	101	19	108	35		263
Vertical slope	Concave	Straight	Convex	Complex		
React. no.	199	4	53	7		263
Cross slope	Concave	Straight	Convex	Complex		
React. no.	224	8	25	6		263
Altitude	<400 m	401 ~ 800 m	801 ~ 1,200 m	1,201 m <		
React. no.	19	90	109	45		263
position	Upper	Middle	Lower			
React. no.	115	104	44			263
Stream order	0	1	2	3 <		
React. no.	48	100	81	34		263
Forest type	Coniferous	Deciduous	Mixed			
React. no.	6	51	206			263
Parent rock	Igneous	Metamorphic				
React. no.	145	118				263
Soil depth	<15 cm	16 ~ 30 cm	31 ~ 45 cm	46 cm <		
React. no.	189	43	18	13		263

설악산 국립공원 토석류 발생가능성 예측을 위한 판정 기준표를 개발하였다. 이상과 같은 과정을 거쳐 상대점수를 기준으로 토석류 발생가능성을 이용하여 설악산 국립공원 토석류 발생가능성 예측을 위한 판정 기준표를 개발하고,

판정 기준표를 이용하여 I 등급(토석류 발생가능성 대), II 등급(토석류 발생가능성 중), III 등급(토석류 발생가능성 소), IV 등급(안정)으로 평가하였다. 또한 다음과 같은 과정을 거쳐 상대점수를 기준으로 하여 토석류 발생 길이

를 이용한 가능성 지역을 예측하고, 예측점수를 실제 토석류 발생지에 직접 대입하여 적절성을 평가하였다. 본 연구에서는 통계프로그램 package SPSS 21.0을 이용하여 통계 분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1 발생 길이에 대한 영향인자 도출

일반적으로 토석류는 강우인자에 의한 직접적인 영향이 가장 많이 받으나 설악산 국립공원지역에서 발생한 모든 토석류의 정확한 강우 데이터를 획득할 수 없다. 따라서 강우인자를 제외한 토석류 발생지점의 산림환경 인자를 활용하여 토석류 발생 길이에 미치는 인자를 분석하기 위해 단계별 회귀분석을 실시하였다. 이를 분석한 결과는 Table 2와 같다. 토석류 발생 길이에 영향을 미치는 요인 중 가장 처음 도입된 변수는 오목사면(종단사면형)이며, 다음으로 복합사면(횡단사면형), 1,201 m 이상(고도), 북사면(방위), 801~1,200 m(고도), 31~40°(사면경사)순으로 모두 6개의 인자가 도입되었다.

설악산 국립공원지역에서 발생한 토석류 발생 길이(m)에 대한 추정식은 $Y = 78.825 + 491.923(\text{종단사면 오목}) - 396.410(\text{횡단사면 복합}) + 52.097(\text{고도 } 1,201 \text{ m } <) + 22.975(\text{방위 북사면}) + 26.251(\text{고도 } 801 \sim 1,200 \text{ m}) - 18.612(\text{사면경사 } 31 \sim 40^\circ)$ 로 개발되었다. 추정된 회귀모형식을 이용하여 적합도에 대한 F 통계량은 31.415(유의 확률 0.000)로 매우 유의하다고 분석되었으며, R²값은 0.424로 나타났다. Ma et al.(2015)은 수량화이론(I)을 사용하여 고산지역 토석류 발생위험 인자는 횡단사면, 임상, 토심, 경사, 사면위치, 종단사면 등 5가지 산림 환경인자가 토석류발생에 영향을 준다고 보고하였다. Choi(1986)는 수량화(I)이론에 의한 토사량에 영향을 주는 산림환경 인자는 횡단면형, 경사길이, 모암, 사면위치, 사면경사, 석력 함량, 경급, 지형, 토석류 깊이, 임상, 횡단면형 순으로 나타났다. Kang et al.(1986)은 수량화이론(II)에 의

하여 토석류 발생에 기여도가 높은 요인은 주변식생, 종단사면형, 사면위치, 사면경사도, 방위, 하천차수 순으로 보고하였다. Jung et al.(2008)은 수량화(I)이론에 의한 산사태가 토사량에 영향을 주는 산림환경 인자는 경사위치, 경사길이, 모암, 방위 임분경급, 종단면형, 경사도의 순으로 나타났다고 하였다. 특히 상관 및 단계별 회귀분석에서 토석류 길이에 영향을 미치는 요인 중 가장 처음 도입된 변수 오목사면은 토석류가 대체로 평탄사면의 약간 오목한 지형에서 전이형 슬라이드로 시작되어 토석류인 사태물질이 주위의 계곡으로 흘러내리면서 유동성토석류로 변화되는 양상으로 설명할 수 있다고 사료된다. 산지에 집중 호우나 태풍과 같은 외부요인이 작용했을 때 정상부에서 하강하는 사면이 계곡과 연결하는 계곡의 표고가 1,000 m 지점에서 토석류 발생빈도가 높아진다는 것과 발생 길이도 큰 것을 유출할 수 있는 것으로 분석되었다.

2 토석류 발생에 대한 주요 산림환경인자의 상대점수 분석

토석류 발생 길이에 대한 주요 영향인자(종단사면, 횡단사면, 고도, 방위, 사면경사)를 중심으로 category별 상대점수를 분석한 결과 Table 3과 같다. 상대점수의 범주별 점수는 부(-)의 값을 나타내는 범주는 안정하다는 측에 작용하는 요인이며, 반대로 정(+)의 값을 가지는 범주는 불안하다는 측에 작용하여 토석류로 인한 산지붕괴 발생 길이에 기여를 많이 하는 것을 의미한다. 종단사면형의 경우 오목사면이 토석류 발생 길이에 가장 큰 것으로 나타났으며, 횡단사면은 복합사면이 토석류 발생 길이에 안정 측에 기여하는 것으로 분석되었다. 사면경사 범위가 21~30°에서 토석류 발생 길이에 가장 큰 것으로 나타났으며, 사면방위는 N(북)에서 토석류 발생 후 계류로 흘러들어 대형 토석류로 하는 것으로 알 수 있다. Range는 토석류에 발생에 따른 발생 길이에 대한 각 인자의 상대점수의 변동 폭을 나타내는 척도로서 각 산림환경 인자의 category별 상대점수의 최대치 및 최소치의 상대점수 차로 나타낸다. 각 인자의 Range를 산정한 결과, 종단사면(0.9676)이 가장 높

Table 2. The stepwise regression analysis debris flow sediment and factors.

Variables	Regression coefficient	Standart error	Model R ²	F	Prob>F
Constrant	78.825	8.056			
Concave (Vertical slope)	491.923	41.332	0.145	44.329	0.000
Complex (Cross slope)	-396.410	44.666	0.360	73.177	0.000
1,201 m< (Altitude)	52.097	12.381	0.387	54.528	0.000
N (Aspect)	22.975	8.771	0.402	43.393	0.000
801~1,200 m (Altitude)	26.251	9.588	0.414	36.334	0.000
31~40 (Slope gradient (°))	-18.612	8.862	0.424	31.415	0.000

Table 3. Normalized score of each category and range.

Factors	Category	Mean score	Normalized score	Range
Vertical slope	Concave	0.0771	0.8905	0.9676
	Straight		-0.0551	
	Convex		0.0957	
	Complex		-0.0771	
Cross slope	Concave	0.6657	-0.0066	0.6876
	Straight		-0.0214	
	Convex		0.0219	
	Complex		-0.6657	
Altitude	<400 m	0.0149	-0.0149	0.2356
	401~800 m		0.0268	
	801~1,200 m		0.1455	
	1,201 m<		0.2207	
Aspect	N	0.0107	0.1257	0.1364
	E		-0.0107	
	S		0.0152	
	W		-0.0056	
Slope gradient	< 20°	0.1033	0.0126	0.1590
	21~30°		0.0559	
	31~40°		-0.1033	
	41~50°		-0.0178	
	51°<		-0.0317	

게 나타나 설악산 국립공원의 토석류 발생 길이에 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었으며, 다음으로는 횡단사면(0.6876), 고도(0.2356), 사면경사(0.1590), 방위(0.1364)순으로 나타났다. 토석류 발생 길이에 가장 큰 영향을 미치는 오목사면은 비교적 급경사지로 되어있는 산정부위의 토심이 얇은 곡두지점에서 많은 토석류 발생이 있었으며, 산복 계간상의 암반을 기반으로 하여 붕괴발생빈도가 비교적 높게 나타났다. Kim et al.(2005)은 평행사면의 토석류는 대체로 평탄사면의 약간 오목한 지형에서 전이형 슬라이드로 시작되어 토석류인 사태물질들이 주위의 계곡으로 흘러내리면서 유동성토석류로 변화되는 양상을 보인다고 보고하였다. 고도는 본 연구 대상지인 설악산 국립공원 지역은 1,707 m로 높기 때문에 산지에 집중호우나 태풍과 같은 외부요인이 작용했을 때 정상부에서 하강하는 사면이 계곡과 연결하여 토석류 발생빈도가 높고, 생산된 토석 및 유목 등이 토석류로 발전하여 계곡 및 하천으로 유입되어 피해를 가중시켰다고 사료된다. 또한 방위는 우리나라에서 전반적으로 우세하게 발달하는 지질구조인 북사면이 토석류 발생 길이에 취약하며(Ma et al., 2018), 이는 북사면의 토양수분의 변화가 잦아 토양이 풍화가 진행됨에 따라 토석류의 발생빈도가 높게 나타나는 이유 때문이라 생각된다.

3 설악산 국립공원 토석류 발생 가능성 예측 및 평가

상대점수는 정(+) 및 부(-)의 값으로 표시되어 있기 때문에 사용에 불편한 점이 있다. 따라서 이를 개선하기 위하여 각 Category별 점수 중에서 최소값(0점)으로 하고, 최소값의 절대치를 증가하여 정(+)의 값으로 변화시켜 토석류 발생 가능성 예측 스코어 표를 제시하면 Table 4와 같다. Table 4에서 5개 인자의 category별 점수를 보면 종단사면은 0점에서 0.9676 범위에 있으며, 횡단사면은 0점에서 0.6876 범위, 발생위치는 0점에서 0.2356 범위, 방위는 0점에서 0.1364 범위로 나타나고 사면경사 0점에서 0.1590 범위로 계산되었다.

설악산 국립공원토석류 발생 길이를 이용한 토석류 가능성의 예측은 Table 4와 같이 토석류 발생 상대점수를 이용하여 설악산 국립공원 토석류 예측 판정표를 작성하게 된다. Table 5에서 보면 종단사면, 횡단사면, 고도 사면 방위, 사면경사 점수를 각 조사현장에 적용하여 분석한 범위는 0점에서 2.1864점 사이에 분포하고 있으며, 중앙값은 1.0932점이었다. 토석류 가능성 등급의 구분은 5개 인자의 category별 점수를 통합하여 나타낼 수 있는 최고점수와 최저점수를 이용하여 25%의 범위로 4개 등급으로 구분하였다. 이 등급의 기준 값을 이용하여 토석류 가능성 예측기준을 Table 5와 같이 작성하였다. 설악산 국립공원

Table 4. Score table for prediction of debris flow susceptibility.

Factors	Caregory				
	1	2	3	4	5
Vertical slope	Concave	Straight	Convex	Complex	
	0.9676	0.0220	0.1728	0	
Cross slope	Concave	Straight	Convex	Complex	
	0.6591	0.6443	0.6876	0	
Altitude	<400 m	401 ~ 800 m	801 ~ 1,200 m	1,201 m <	
	0	0.0417	0.1604	0.2356	
Aspect	N	E	S	W	
	0.1364	0	0.0259	0.0051	
Slope gradient	<20°	21 ~ 30°	31 ~ 40°	41 ~ 50°	51° <
	0.1159	0.1590	0	0.0855	0.0716

Table 5. Prediction score for evaluation of debris flow susceptibility by score table.

Class of debris flow hazard area	Prediction score	Remarks
I	1.6399 <	25
II	1.0932 ~ 1.6398	50
III	0.5466 ~ 1.0931	75
IV	<0.5465	100

토석류 가능성 예측기준 판정표에서 I 등급(토석류 발생 가능성 대)은 1.6399 이상, II 등급(토석류 발생가능성 중) 1.0932~1.6398, III등급(토석류 발생가능성 소) 0.5466~1.0931, IV등급(안정) 0.5465 이하로 나타났다.

또한, Table 6의 판정표를 이용하여 설악산 국립공원 토석류 발생지에 대입 예 $Y = 0.9676(\text{종단사면 오목}) + 0.6591(\text{횡단사면 오목}) + 0.1604(\text{고도 } 801 \sim 1,200 \text{ m}) + 0.0259(\text{사면방위 남}) + 0.1590(\text{사면경사 } 21 \sim 30^\circ) = 1.9720$ 점(설악산 국립공원 토석류 발생가능성 등급 I) 분석한 결과 토석류 발생 가능성별 개소는 Table 6과 같다. Table 6에서 보면 I 등급(토석류 발생가능성 대)은 198개소로 전체의 75.3%, II등급(토석류 발생가능성 중)은 29개소로 11.0%, III(토석류 발생가능성 소)등급은 30개소 11.4%, IV등급(안정) 6개소 2.3%로 나타났다. I 등급, II등급에서 토석류는 227개소가 발생되어 예측 비율이 86.3%로서 매우 높게 분석되었으며, 설악산 국립공원토석류 가능성의 정도를 분석하는데 유용하게 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 토석류 발생지역에 실제 조사된 토석류 발생 길이와 수량화이론을 사용하여 얻어진 본 모델에 의해 계산된 토석류 발생 예측치를 비교 분석한 결과 Figure 2와 같다. Figure 2에서 가운데 직선은 계산치의 선형(평균)값을

Table 6. The number of debris flow occurred by susceptibility class.

Class of debris flow hazard	Number of debris flow	Occurred percentage(%)
I	198	75.3
II	29	11.0
III	30	11.4
IV	6	2.3
Total	263	100

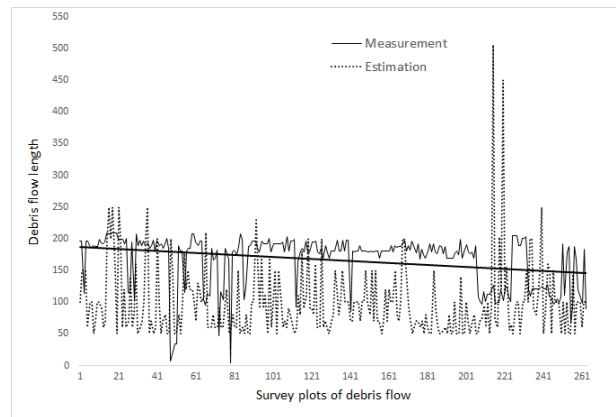


Figure 2. Compared With estimation value and measurement value in debris flow length.

의미한다. 토석류 발생 길이에 많은 영향을 미치는 5개의 산림환경 인자만의 이용하여 계산한 예측치는 각 지점의 토석류 발생 길이에 대한 실측치에는 미치지 못하지만 전체적으로 직선 아래쪽에 많이 분포 하면서 매우 안정적으로 실제 실측치를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

결 론

설악산 국립공원에서 발생한 토석류 발생지 263개소를 중심으로 토석류발생 발생 길이에 영향을 미치는 산림환경 인자를 이용한 설악산 국립공원 토석류 발생 가능성 예측 및 판정기준표를 작성한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 설악산 국립공원지역의 토석류 발생 길이를 수량화 이론(I)에 의해 각 산림환경 인자의 category별 상대 점수를 분석한 결과, 중단사면 오목이 토석류 발생 가능성에 가장 크게 영향을 미치며 중단사면 복합이 안정측에 속하는 것으로 나타났다. 횡단사면(직선), 고도(1,201 m <), 사면방위(북사면), 경사(21~30°)가 불안정 측으로 분석되었다.
2. 자연사면에서 토석류 발생 길이와 관계가 깊은 5개 인자에 의해 얻어진 각 인자의 Category별 점수표를 중심으로 토석류 발생 길이에 의한 토석류 발생 가능성 판정기준표를 작성한 결과 점수범위는 0점에서 2.1864점 사이에 분포하고 있다. 설악산 국립공원 토석류 발생가능성 예측기준 판정표에서 I등급(토석류 발생가능성 대)은 1.6399 이상, II등급(토석류 발생가능성 중) 1.0932~1.6398, III등급(토석류 발생가능성 소) 0.5466~1.0931, IV등급(안정) 0.5465 이하로 나타났다.
3. 설악산 국립공원 토석류 발생가능성 예측기준 판정표를 이용하여 설악산 국립공원 토석류 발생지에 실제 대입한 결과 I등급(토석류 발생가능성 대)은 198개소로 전체의 75.3%, II등급(토석류 발생가능성 중)은 29개소로 11.0%, III(토석류 발생가능성 소)등급은 30개소 11.4%, IV등급(안정) 6개소 2.3%로 나타났다. I등급, II등급 에서 토석류는 227개소가 발생되어 예측 비율이 86.3%로서 매우 높게 예측하였다.
4. 본 연구에서 개발한 설악산 국립공원 토석류 발생가능성 예측을 위한 판정 기준표는 설악산지역을 토석류 발생 가능성도 판정에 유용하게 이용 할 수 있을 것으로 사료된다.

산사태가 계속 및 하천으로 까지 확대되어 토석류가 발생하면 대규모 토석류로 발전하므로 산지 상류유역 구간은 인명 및 재산피해를 감소하도록 많은 관심과 노력이 필요한 것으로 사료된다. 따라서 설악산 국립공원은 자연생태학적 및 경관이 보전가치가 매우 높은 곳으로 새롭게 발생하는 토석류의 발생특성 및 발생 길이에 대한 자료축적이 필요하며, 더 나아가 “산지토사재해 예방 및 관리 시스템”을 도입하여 다른 국립공원내 산지토사재해에 대한 피해를 감소하도록 노력하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 농업생명과학대학 학술림 지원에 의하여 이루어진 것입니다. 심사단계에서 논문의 완성도를 높일 수 있도록 좋은 의견을 주신 심사위원 여러분께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

References

- Brand, E.W. 1988. Landslide risk assessment in gong kong, on Landslided. Lausanne 2: 1059-1074.
- Chau, K.T., Sze, Y.L., Fung, M.K., Wong, W.Y., Fong, E.L. and Chan, L.C.O. 2004. Landslide hazard analysis for hongkong using landslide inventory and GIS. Computers and Geosciences 30(4): 429-443.
- Choi, K. 1986. Landslides occurrence and its prediction in Korea. Doctor Philosophy Dissertation kangwon National University korea. pp. 45.
- Choi, Y.N., Lee, H.H. and Yoo, N.J. 2018. Characteristic analysis and prediction of debris flow-prone area at daeryongsan. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 21(3): 48-62.
- Dai, F.C. and Lee, C.F. 2002. Landslide characteristics and slope in instability modeling using GIS. Lantau Island, Hongkong, Geomorphology 42(2): 213-228.
- EPOCH (European Community Program). 1993. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the european community, Contract No. 900025.
- Hutchinson, J.N. 1988. Mophological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. In Landslides Proc. 5th Int. Symp. on Landslides. Balkema, Rotterdam, pp. 3-35.
- Jung, K.W., Park, S.J. and Lee, C.W. 2008. Development of the score table for prediction of landslide hazard (A case study of gyeongsangbuk-do province). Journal of Korean Forestry Society 93(7): 332-339.
- Kang, W.P., Hiroshi, M. Hiroshi, O. and Ma, H.S. 1986. On the determination of slope stability to landslide by quantification(II). Journal Korean Forestry Society 75: 32-37.
- Kim, G.H. and Hwang, J.S. 2011. The estimation of debris flow behaviors in injae landslide area. Korean Journal of Geomatics 29(5): 535-541.
- Kim, K.N., Jang, S.J., Lee, K.Y., Seo, G.B., Kim, B.S. and Chun, K.W. 2015. Prediction of the debris flow-prone area in the hilly district within urban. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation 15(3): 141-146.
- Kim, K.S., Kim, W.Y., Chae, B.G., Song, Y.S. and Cho, Y.C.

2005. Engineering geological analysis of landslides on natural slopes induced by rainfall. *The Journal of Engineering Geology* 15(2): 105-212.
- Kim, P.G. and Han, K.Y. 2017. Numerical modeling for the detection of debris flow using detailed soil map and GIS. *Korean Society of Civil Engineers* 37(1): 43-59.
- Kwon, H.J. 2016. A Study on the characteristics of influential factors and hazard prediction map development of the landslides in mountainous national parks by using spatial information technologies. Doctor of Philosophy Dissertation Kyungpook National University korea. pp. 2.
- Lee, G.S., Lee, H.J., Go, S.Y. and Cho, G.S. 2014. The evaluation on the prediction ratio of landslide hazard area based on geospatial information. *Journal of Cadastre* 44(2): 113-124.
- Lee, J.S., Song, C.G., Kim, H.T. and Lee, S.O. 2015. Risk analysis considering the topography characteristics of debris flow occurrence area. *Korean Society of Hazard Mitigation* 15(3): 75-82.
- Lee, S.J. 2014. Development of prediction technique of landslide using forest environmental factors. Doctor of Philosophy Dissertation Gyeongsang National University korea. pp. 1-6.
- Lee, S.J. and Ma, H.S. 2018. Development of prediction technique of landslide using forest environmental factors. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 52(4): 63-72.
- Lee, S.J., Lee, E.J. and Ma, H.S. 2019. Analysis of characteristics landslide susceptibility in rugged mountain range in the Korean national park. *Journal of Korean Forestry Society* 108(4): 551-560.
- Ma, H.S. 1994. Studies on development of prediction model of landslide hazard and its utilization. *Journal of Korean Forestry Society* 83(2): 175-190.
- Ma, H.S. 2001. Landslide Characteristics and recovery direction in Korean national parks. *Journal of National Park Research* 27: 17-21.
- Ma, H.S. and Jeong, W.O. 2010. Characteristics analysis of debris flow disaster in Korean national parks. *The Korea Society For Environmental Restoration And Revegetation Technology* 13(4): 52-64.
- Ma, H.S., Kang, W.S. and Lee, S.J. 2014. Prediction and evaluation of landslide hazard based on regional forest environment. *Journal of Korean Forestry Society* 103(2): 233-239.
- Ma, H.S., Kang, W.S. and Lee, S.J. 2015. Prediction of debris flow hazard in high mountain areas. *Journal of Agriculture & Life Sciences* 49(5): 13-21.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes, In *landslides analysis and Control*, TRB special Report, 176, National Academy of Science 11-33.

Manuscript Received : May 18, 2020
 First Revision : July 15, 2020
 Second Revision : July 17, 2020
 Third Revision : December 3, 2020
 Accepted : January 15, 2021