

지역산림환경을 기반으로 한 산사태 발생 위험성의 예측 및 평가

마호섭^{1*} · 강원석¹ · 이성재²

¹경상대학교 산림환경자원학과(농업생명과학연구원), ²서울대학교 학술림

Prediction and Evaluation of Landslide Hazard Based on Regional Forest Environment

Ho-Seop Ma^{1*}, Won-Seok Kang² and Sung-Jae Lee³

¹Department of Forest Environmental Resources, Gyeongsang National University
(Institute of Agriculture Life Science), Jinju 660-701, Korea

²University Forest, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

요 약: 본 연구는 지역산림지역을 중심으로 수량화이론을 이용하여 산사태 발생면적에 영향을 미치는 인자를 도출하여 각 인자의 기여도 분석을 통해 산사태 발생 위험성에 대한 예측기준을 마련하고, 그 기준을 평가하였다. 산사태 발생지 붕괴면적에 영향을 미치는 인자는 모암(화성암), 횡단사면(복합), 침엽수림(임상), 사면경사(21~30° 이상)이었다. 각 인자의 Range를 추정한 결과, 횡단사면 (0.2922)이 가장 높게 나타났고, 다음으로는 모암(0.2691), 임상(0.2631), 사면경사(0.2312)순으로 나타났다. 산사태 발생 위험도 판정표를 기준으로 4개 인자의 category별 점수를 계산한 추정치 범위는 0 점에서 1.0556 점 사이에 분포하고 있으며, 중앙값은 0.5278 점이었다. I 등급의 점수는 0.7818 이상, II 등급은 0.5279~0.7917, III 등급은 0.2694~0.5278, IV 등급은 0.2693 이하로 나타났다. I 등급 및 2 등급에서 산사태 발생 비율이 72% 로서 비교적 높은 적중률을 보였다. 따라서 본 판정표는 산사태 위험도 판정에 활용 가능한 것으로 판단된다.

Abstract: This study was carried out to propose the criteria for the prediction of landslide occurrence through analysis the influence of each factor by using the quantification theory. The results obtained from this study are summarized as follows. From a stepwise regression analysis between the landslide area(m²) and environmental factors, the factors strongly affecting the landslide sediment(m²) were the Parents rock (igneous), cross slope(complex), coniferous forests (forest type) and slope gradient (21~30°). According to the range, it was shown in order of Cross slope (0.2922), Parents rock (0.2691), Forest type (0.2631) and Slope gradient (0.2312). The range of prediction score of landslide occurrence has been distributed between score 0 and score 1.0556, the median value was score 0.5278. The prediction for class I was over 0.7818, for class II was 0.5279 to 0.7917, for class III 0.2694 to 0.5278 and for class IV was below 0.2693. The prediction on landslide occurrence appeared relatively high accuracy rate as 72% for class I and II. Therefore, this score table for landslide will be very useful for judgement of dangerous slope.

Key words: landslide, prediction score, evaluation

서 론

우리나라의 경우 산지재해 원인은 주로 기압이 불안정한 여름철 장마기간에 생기는 집중호우와 7~9월 한반도를 통과하는 태풍으로 인한 국지성 호우 등을 들 수 있다. 지난 30년간(1971~2000) 우리나라 연평균 강수량은 1,312 mm이었는데, 최근 2000년대(2000~2009)에는 1,389 mm

로 77 mm 증가하였다. 계절별로 보면 여름철에 96 mm 증가하였지만 봄철에는 13 mm 감소하여, 홍수와 가뭄의 상반된 기상현상이 함께 더욱 발생할 가능성을 보여주었다(Cho, 2011).

산사태 등 토사재해가 발생되어 생산된 토사, 유목 및 토석은 토석류로 발전하면서 계곡침식과 함께 많은 토사 석력들이 유출되고 주택, 도로 및 농경지를 덮치면 인명 및 재산피해가 가중되게 된다(Ma and Jeong, 2007; Korea Forest Service, 2012). 특히, 최근 10년간('04-13) 연평균

*Corresponding author
E-mail: mhs@gnu.ac.kr

산사태 발생면적은 456 ha로서 서울의 남산 면적(339 ha) 보다 더 많이 발생하고 있다(Korea Forest Service, 2014). 이러한 산사태 재해를 예방하고 피해를 최소화하기 위해서는 산사태의 정확한 발생특성 및 산사태물질의 이동특성을 파악하는 것이 중요하다.

최근 국내 산사태에 관한 연구는 산사태 발생요인 분석과 산사태 평가(Choi, 1986; Ma, 1990: 1992: 2001) 및 GIS를 이용한 예측기술 연구(Kang et al., 1999; Lee, 2001; Lee, 2005; Choi, 2010), 산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술개발(Ministry of Science and Technology, 2006), 강릉지역 국도의 재해위험성 평가(Kim et al., 2008), 산사태 발생지 예측을 위한 Topographic Position Index의 적용성 연구(Woo et al., 2008), 산사태재해 예측 및 저감기술개발(National Emergency Management Agency, 2008), 국립공원의 산사태 발생 위험지역 예측기법 개발(Ma et al., 2008), 기상과 지형자료를 통합한 산사태 위험지 예측기법 개발(Jo and Jo, 2009), 대구달성지역 산사태 예측 및 예, 경보시스템 구축(Kim et al., 2010) 산지토사재해 발생 예측을 위한 토양우량지수 적용가능성 검토(Oh et al., 2011) 등 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 산사태로 인한 피해는 거의 매년 발생하고 있으며, 발생지역은 특정 지역에 국한되어 있지 않고 발생되고 있어 국소지역별 취약지구 선정을 통한 조기 경계피난체계의 구축과 함께 위험지역에 대한 첨단 모니터링 시스템을 통한 취약지구를 관리할 필요성이 있다(Ma, 1994; Ma et al., 2008; Korea Forest Service, 2012).

특히, 최근에 산사태 취약지구 선정은 각 지자체를 중심으로 이루어지고 있으므로 산사태 피해를 최소화하기 위해서는 지역별 국소지역에 대한 환경인자와의 특성을 파악하고 산사태 발생예측 기술의 개발을 통한 위험지역 및 취약지역의 선정도 필요하다.

따라서 본 연구는 지역 산림환경을 기반으로 하여 산사태 취약지역 선정 및 조기감지시스템 도입에 활용할 목적으로 산사태 발생지를 중심으로 산사태 발생에 따른 각 환경인자의 기여도 분석을 통하여 산사태 발생위험성을 예측할 수 있는 기법을 개발함으로써 산사태 발생으로 인한 인명 및 재산피해를 최소화 할 수 있는 학술적 정보를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사대상지 및 항목

본 연구는 2005년 8월 2일~3일 기간 중 서해안에서 발달한 저기압대의 수증기가 지속적으로 유입되면서 시간당 15~108 mm의 집중호우가 내린 전라북도 장수군, 무주군, 진안군, 남원시, 정읍시 일대를 대상으로 하였다. 산사

태가 발생한 전라북도 지역의 호우특성은 지역적으로 매우 편중되어 전주시가 279.5 mm로서 가장 많고, 진안군 268.5 mm, 임실군 248 mm, 김제시 206.5 mm로서 도내 평균 165.6 mm보다 이들 지역이 월등히 높았고, 시우량 42 mm의 호우가 2일 동안 집중적으로 내렸다. 집중호우로 인하여 산사태는 등우량선 200 mm가 형성된 진안군, 장수군, 무주군에서 집중적으로 발생하였다. 또한 시우량도 매우 높아 정읍시의 경우 시우량은 500년 강우확률을 초과하는 108 mm의 집중호우가 발생하였다(Chang, 2005).

산사태 영향인자 분석을 위한 산림환경 조사인자의 선정은 기존의 연구 자료를 참고하여 산사태 면적의 11개의 인자를 선정하였다(Choi, 1986; Ma, 1994), 특히 조사대상 산사태 개소수는 Table 1에 나타난 바와 같이 전라북도 내 총 182개소이다.

- 1) 붕괴면적(m^2) : 산사태 길이 × 폭으로 계산 함.
- 2) 사면경사($^\circ$) : Clinometer를 이용하여 측정 함.
- 3) 사면방위 : 지형도 및 Compass를 이용하여 4방위 (NE, SE, SW, NW)로 구분 함.
- 4) 사면형태 : 산사태 발생지 중단 및 횡단사면을 볼록(凸), 오목(凹), 직선(□), 복합(凹凸)으로 구분 함.
- 5) 해발고(m) : 고도계 및 지형도상에서 붕괴지점의 고도를 측정 함.
- 6) 사면위치 : 산사태 발생지점의 위치를 산정, 산복, 산록으로 구분 함.
- 7) 하천차수 : 1/25,000 지형도상에서 Horton-Strahler의 방식에 의해 구분 함.
- 8) 임상 : 현지조사를 통해 침엽수림, 활엽수림, 혼효림으로 구분 함.
- 9) 임종 : 현지조사를 통해 천연림, 인공림으로 구분 함.
- 10) 모암 : 지질도와 현지조사를 통하여 퇴적암, 화성암, 변성암으로 구분 함.
- 11) 수고(m) : 산사태 발생지의 임상별 주 수종의 평균수고 측정하여 구분 함.
- 12) 흉고직경(cm) : 산사태 발생지 임상별 주 수종의 가슴높이 지름을 측정하여 구분 함.

2. 분석방법

전라북도 지역의 산사태 발생지점을 대상으로 피해면적에 영향을 미치는 산림환경 인자를 조사하고, 산사태 발생 위험지역을 예측하기 위해 각 기존의 연구 자료를 참고하여 인자를 Table 1과 같은 카테고리로 구분하였다(Choi, 1986; Ma, 1994). 산사태 발생지내 발생면적에는 많은 인자가 상호 복합적으로 영향을 미치고 있으므로, 이들 산림환경인자가 어느 정도의 영향을 미치고 있는가를 추정하기 위하여, 종속변수(Y: 발생면적 m^2)가 p- 1개의 독립변수(X_n : 산림환경인자)에 의하여 변화함을 가정하여,

다음의 식 1에 의하여 단계별 회귀분석(stepwise regression analysis)을 실시하였다. 일반적으로 회귀모형은 인자가 많으면 많을수록 결정계수(R^2)는 높아지는데, 단계별 회귀분석은 모형의 단순화를 위해 인자를 하나하나씩 줄여가면서 가장 영향을 많이 주는 인자들만을 선정하여 최적의 인자수를 결정하게 된다.

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_{p-1}X_{p-1} \quad (1)$$

또한, 단계별 회귀분석에서 추정된 카테고리 내의 인자들을 중심으로 산사태 발생 위험지역을 예측하기 위해 산사태 붕괴면적과 내적기준인 환경인자와의 관계를 수량화이론(quantification theory)을 이용하여 각 인자의 category별 반응표를 작성하고, 이들 반응표에서 category와 category간의 상호관계를 수량화이론에 따라 다음의 식 2에 의하여 cross표를 작성하게 된다.

$$T_{lm}N_{lm} + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{ri} 2tjklm(jk) = \sum_{i=1}^n yi\delta i(lm) \quad (2)$$

1) Score 계산

score계산은 cross표에서 유도되었으며, cross표는 n차 정방행렬로서 $AX = Po$ 라는 행렬식이 되어, 실제 계산은 역행렬 $.X = A^{-1}PO$ 에서 그 해를 얻고 각 category에 따라

계산된 수치를 score로 하게 된다.

2) Range 계산

각종 인자가 산사태 발생면적(m^2)발생에 미치는 효과를 추정하는 하나의 지표로서 range를 사용하였으며, 이는 각 인자의 category별 상대점수 (Normalized score)의 최대치와 최소치의 변동폭으로, 다음의 식 3에 의하여 계산하였다.

$$R(k) = \max(xk) - \min(xk) \quad (3)$$

Note) $\max(xk)$: k번째 인자의 category에 기여한 상대점수 (Normalized score)의 최대치

$\min(xk)$: k번째 인자의 category에 기여한 상대점수 (Normalized score)의 최소치

이상과 같은 과정을 거쳐 상대점수를 기준으로 하여 산사태 발생 위험지역을 예측하고, 산사태 발생지점의 붕괴면적과 계산치를 비교하여 예측기준의 적절성을 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 산사태 발생에 따른 각 인자의 기여도 분석

전라북도 산사태 발생지의 11개 산림환경인자들을 중심으로 붕괴면적에 가장 많이 영향하는 인자를 도출하기

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

Factors	Category					Total
	1	2	3	4	5	
Slope gradient	< 20°	21~30°	31~40°	41° <		
Landslide	10	83	78	11		182
Aspect	NE	SE	SW	NW		
Landslide	53	37	44	48		182
Vertical slope	Concave	Convex	Straight	Complex		
Landslide	70	3	59	50		182
Cross slope	Concave	Convex	Straight	Complex		
Landslide	100	55	2	25		182
Altitude	< 300 m	301~400 m	401~500 m	501 m <		
Landslide	19	51	85	27		182
Slope position	Lower	Middle	Upper			
Landslide	21	97	64			182
Stream order	0	1	2	3	4<	
Landslide	49	63	16	44	10	182
Forest type	Coniferous	Deciduous	Mixed			
Landslide	124	20	38			182
Parents rock	Metamorphic	Sedimentary	Igneous			
Landslide	7	69	106			182
Forest type	Natural Forest	Artificial Forest				
Landslide	30	152				182
Tree height	< 5 m	6~10 m	11~15 m	16 m <		
Landslide	27	19	106	30		182
Diameter of breast height	< 6 cm	6~16 cm	17 cm <			
Landslide	22	41	119			182

위하여 단계별 회귀분석을 실시한 결과는 Table 2와 같다. Table 2에서 보면 산사태 발생지의 붕괴면적에 영향을 미치는 요인 중 가장 먼저 도입된 변수는 모암(화성암)으로 전체 설명력의 19%를 차지하였다. 다음으로 횡단사면(복합), 임상(침엽수), 사면경사(21~30°이상)순으로 도입되었다. 각종 환경인자에 의한 전라북도지역의 산사태 발생지의 붕괴면적(m²)에 대한 추정식 $Y = 350.844 + 1359.009(\text{모암 화성암}) + 1760.886(\text{횡단복합사면}) + 1188.196(\text{임상 침엽수}) - 762.973(\text{사면경사 } 21\sim 30^\circ\text{이상})$ 로 도출되었다. 추정된 회귀모형식의 적합도에 대한 F통계량은 10.487(유의확률 0.000)로 매우 유의하고, R² 값은 0.468으로 나타났다.

산사태 위험예측에 관한 연구에서 Kang et al.(1986)은 수량화이론(II)에 의하여 산사태 발생의 각 요인 및 수준을 측정하여 분석한 결과, 산사태 발생에 기여도가 높은 요인은 식생, 종단사면형, 사면위치, 경사, 방위, 하천차수 순으로 보고하였다. 특히 침엽수 10년생 내외, 복합사면, 하강사면, 산록, 경사 10~15°, 방위는 남서(SW), 하천차수는 1차수의 각 수준에서 산사태 발생에 크게 기여하는 것으로 분석하였다.

Toshio Shimizu(1977, 1978)는 수량화이론을 응용하여 화강암지대의 안정성에 관계하는 인자를 분석한 결과, 사면의 안정성 판별에 영향을 미치는 기여도는 식생, 방위,

하천차수, 경사도, 횡단사면, 종단사면 등의 순으로 높게 나타났다고 하였다. Choi(1986)는 수량화(I)이론에 의한 산사태면적에 영향을 주는 인자는 횡단면형, 경사길이, 모암, 사면위치, 경사도, 석력함량, 임분경급, 지형, 산사태 깊이, 임상, 횡단면형 순으로 높게 나타났다고 하였다.

Ma et al.(2008)은 수량화이론(I)을 이용하여 국립공원지역의 산사태 발생위험지역 예측기법 연구에서 경사, 방위, 표고, 임상, 토심 등 5가지 인자가 기여하는 것으로 보고하였고, Jeong(2010)은 수량화이론을 이용한 경상북도 산사태의 발생특성 위험예측도 작성에 관한 연구에서 모암, 방위, 경사도, 경사위치, 경사길이, 종단면형, 임분경급 등 7개의 인자가 기여하는 것으로 보고하였다.

이상과 같이 전라북도 지역은 횡단사면(불록), 사면위치(산정), 표고(501 m 이상), 임상(침엽수), 모암(퇴적암), 흉고직경(17 cm 이상) 등의 인자가 산사태 발생에 기여하였으나 여러 연구지역들의 내용을 보면 국소 지역내에서도 지형적 특성, 토질적 특성 및 임상적 특성에 따라 복잡적이고 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

2. 각 인자별 상대점수 분석

전라북도지역 내에서 산사태 발생에 영향을 미치는 정도와 방향을 파악하기 위하여, 각 인자의 category별 상대점수를 분석한 결과는 Table 3와 같다. Table 3에서 보면

Table 2. The stepwise regression analysis between landslide area and factors.

Variables	Regression coefficient	Standard error	Model R ²	F	Prob>F
Constant	350.844	406.721			
Parents rock (Igneous)	1359.009	358.663	0.311	19.234	0.000
Cross slope (Complex)	1760.886	499.856	0.390	15.960	0.000
Forest type (Coniferous)	1188.196	373.068	0.446	14.614	0.000
Slope gradient (21~30°<)	-762.973	354.531	0.468	12.343	0.000

Table 3. Normalized score of each category and range.

Factors	Category	Mean score	Normalized score	Range
Parents rock	Metamorphic	0.0101	-0.0101	0.2691
	Sedimentary		0.0255	
	Igneous		0.2590	
Cross slope	Concave	0.0576	0.0648	0.2922
	Straight		-0.0576	
	Convex		-0.0124	
	Complex		0.2346	
Forest type	Coniferous	0.0490	0.2141	0.2631
	Deciduous		-0.0490	
	Mixed		0.0636	
Slope gradient	< 20°	0.1209	-0.0115	0.2312
	21~30°		-0.1209	
	31~40°		0.1459	
	41° <		0.1103	

Table 4. Score table for prediction of landslide hazard area.

Factors	Category			
	1	2	3	4
Parents rock	Metamorphic 0	Sedimentary 0.0356	Igneous 0.2691	
Cross slope	Concave 0.1224	Straight 0	Convex 0.0452	Complex 0.2922
Forest type	Coniferous 0.2631	Deciduous 0	Mixed 0.1126	
Slope gradient	<20° 0.1094	21~30° 0	31~40° 0.2668	41°< 0.2312

상대점수(Normalized score)의 범주별 점수 값들 중 부(-)의 값을 나타내는 범주는 비교적 안정 측에 작용하는 요인이며, 반대로 정(+)의 값을 가지는 범주는 위험 측에 작용하여 산사태로 인한 발생면적에 기여를 많이 하는 것을 의미하며, 그 크기는 수치의 대소로 나타낸다.

Range는 산사태 발생면적에 대한 각 인자의 category별 상대점수의 변동 폭을 나타내는 척도로서 각 인자의 category별 상대점수의 최대치와 최소치의 상대점수 차로 나타낸다. 각 인자의 Range를 산정한 결과, 횡단사면(0.2922)로서 가장 높았으며, 다음으로 모암(0.2691)로 나타났다. 임상(0.2631), 사면경사(0.2312)순으로 나타났다.

상대점수(Normalized score)는 정(+) 및 부(-)의 값으로 되어 있기 때문에 이용상 불편한 점이 있다. 따라서 이들 점수 중 최소값을 0 점으로 표시하고, 각 Category별 점수에서는 최소값의 절대치를 증가하여 정(+)의 값으로 변화시켜 산사태 발생 위험도 예측 스코어 표는 Table 4와 같다. Table 4에서 4개 인자의 category별 점수를 보면 횡단사면은 0 점에서 0.2922 범위에 있으며, 모암은 0 점에서 0.2691 범위, 임상은 0 점에서 0.2631 범위, 사면경사는 0 점에서 0.2312 범위로 분석되었다.

3. 산사태 발생 위험성의 예측 및 평가

Table 4에 제시된 산사태 발생 위험도 스코어 표를 기준으로 산사태 예측 판정표를 만들게 된다. 이 스코어 표에서 횡단사면, 모암, 임상 및 사면경사별 점수를 각 조사지역에 적용하여 나타난 예측점수의 범위는 0 점에서 1.0556 점 사이에 분포하고 있었고 중앙값은 0.5278 점이었다. 산사태 위험 등급의 구분은 예측점수의 최고점과 최저점을 기준으로 25%의 범위로 나누어 4개 등급으로 구분하였으며, 이 4개 등급의 기준 값들을 중심으로 산사태 위험도 판정표를 Table 5과 같이 작성하였다. 산사태 위험도 판정표에서 I 등급의 점수는 0.7818 이상, II 등급은 0.5279~0.7917, III 등급은 0.2694~0.5278, IV 등급은 0.2693 이하로 나타났다.

Table 5. Prediction score for evaluation of landslide hazard area by score table

Class of landslide hazard	Prediction score	Remarks
I	0.7818<	25
II	0.5279 ~ 0.7917	50
III	0.2694 ~ 0.5278	75
IV	<0.2693	100

Table 6. The number of landslide occurred by hazard.

Class of landslide hazard	Number of landslide	Occurred percentage(%)
I	39	21 %
II	92	51 %
III	45	25 %
IV	6	3 %
Total	182	100 %

본 판정표의 점수를 산사태 조사지역에 대입한 결과 산사태 위험 등급별 발생개소는 Table 6과 같다. Table 6에서 보면 I 등급은 39 개소로 전체의 21%, II 등급은 92 개소로 51%, III 등급은 45 개소 25%, IV 등급 6 개소 3%로 나타났다. I 등급 및 II 등급에서 산사태는 131개소가 발생되어 발생 비율이 72%로서 매우 높게 분포하고 있어 산사태 위험성의 정도를 판별하는데 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

전라북도 지역의 산사태 발생지역에서 실제 조사된 산사태 발생면적과 수량화이론을 적용하여 얻어진 본 모델에 의해 계산된 산사태 발생 예측치를 비교 분석한 결과는 Figure 1과 같다. Figure 1에서 가운데 직선은 실측치의 선형(평균)값을 의미한다. 산사태 발생 면적에 많은 영향을 미치는 4개의 인자만을 이용하여 계산한 예측치는 각 지점의 산사태 발생면적에 대한 실측치에는 미치지 못하지만 전체적으로 직선 아래쪽에 많이 분포하면서 매우 안정적으로 실제 실측치를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

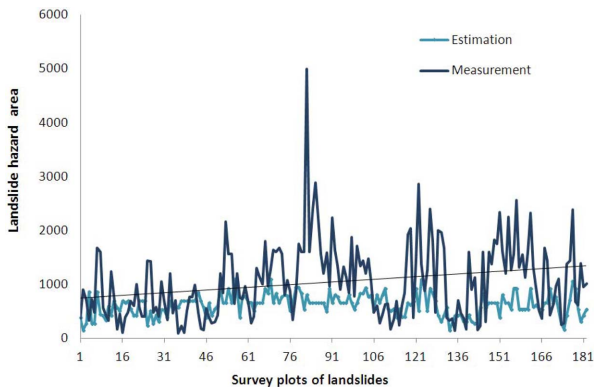


Figure 1. Compared with estimation value and measurement value in landslide area.

따라서 본 모델은 안정적인 모델로 평가되므로 전라북도 지역의 취약지구 선정을 위한 산사태 위험도 판정에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 지역 산림환경을 기반으로 산사태 발생지를 중심으로 산사태 발생면적에 많은 영향을 미치는 인자들을 도출하고, 각 인자의 기여도 분석을 통하여 산사태 발생 위험성을 예측할 수 있는 기법을 개발하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

단계별 회귀분석을 실시한 결과, 산사태 발생지의 면적에 영향을 미치는 요인 중 처음 도입된 변수는 모암(화성암), 횡단사면(복합), 임상(침엽수), 사면경사(21~30°이상) 순으로 도입되었다. 하였다. 각종 환경인자에 의한 전라북도지역의 산사태 발생지의 붕괴면적(m²)에 대한 추정식 $Y = 350.844 + 1359.009(\text{모암 화성암}) + 1760.886(\text{횡단 복합사면}) + 1188.196(\text{침엽수림}) - 762.973(\text{경사 } 21\sim 30^\circ\text{이상})$ 로 도출되었다. 각 인자의 Range를 산정한 결과, 횡단사면(0.2922)로서 가장 높았으며, 다음으로 모암(0.2691)로 나타났다. 임상(0.2631), 사면경사(0.2312)순으로 나타났다.

산사태 발생 위험도 판정표를 기준으로 4개 인자의 category별 점수를 계산한 범위는 0 점에서 1.0556점 사이에 분포하고 있으며, 중앙값은 0.5278점이었다. I 등급의 점수는 0.7818 이상, II 등급은 0.5279~0.7917, III 등급은 0.2694~0.5278, IV 등급은 0.2693 이하로 나타났으며, 본 판정표를 실제 산사태 발생지점에 각각 점수를 대입한 결과 I 등급은 39 개소로 전체의 21%이며, II 등급은 92 개소 51%, III 등급은 45 개소 25%, IV 등급은 6 개소 3%로 나타났다. I 등급 및 II 등급에서 산사태 발생 비율이 72%로서 매우 높게 나타났다. 특히, 산사태 발생지역에서 실제 조사된 산사태 발생면적에 영

향을 많이 미치는 4개의 인자들만을 이용하여 수량화이론에 의하여 얻어진 본 모델에 의해 계산된 산사태 발생 예측치를 비교 분석한 결과 보다 안정적인 모델로 평가되어 지역적인 산사태 위험도 판정에는 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단되지만 전국적인 적용에는 한계가 있을 것이다.

따라서 앞으로 산사태 발생 위험성을 보다 정확하게 예측하기 위하여 많은 자료를 확보하고, 지역 및 지형별 특성을 고려한 산림환경인자의 선정을 통하여 예측기법을 개발하는 등 산사태위험 판정기술을 확립하고 예측의 정확도를 향상시키기 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 산림청 ‘산림과학기술개발사업(과제번호 :S211213L020110, S120911L040110)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

References

- Changsugun. 2006. Report of Flood Rehabilitation Propulsion Situation. pp. 1-4.
- Cho, C.H. 2011. The Cause and Prospect of Climate Change. National Forestry Cooperative Federation San. pp. 74-77.
- Choi, E.Y. 2010. Korea landslide interpretation using. Master Dissertation Kongju National University Korea.
- Choi, K. 1986. Landslides occurrence and its prediction in Korea. Doctor of Philosophy Dissertation Kangwon National University Korea.
- Jeong, K.W. 2010. Studies on the causal characteristics of landslide and the development of hazard prediction map for landslide in Gyeongsangbuk-Do Province, Korea. Doctor of Philosophy Dissertation Kyungpook National University, Korea.
- Jo, M.H. and Jo, Y.W. 2009. Developing Forecast Technique of Landslide Hazard Area by Integrating Meteorological Observation Data and Topographical Data - A Case Study of Uljin Area -. The Korean Association of Geographic Information Studies 12(2): 1-10.
- Kang, J.T., Jung, S.Y., Ma, H.S., and Chung, Y. G. 1999. Analysis of the Forest-land Conservation Function by the GIS. Research Bulletin of Experiment Forests, Gyeongsang National University 9: 63-70.
- 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., Won, S.Y., Youn, J.H., and Song, Y.S. 2008. Hazard Risk Assessment for National Roads in Gangneung Journal of the Korean Society for Geo-Spatial Informa-

- tion System 16(4): 33-39.
- Kim, Y.J., Kim, Y.S., and Jo, W.C. 2010. Landslide Prediction and Warning Systems Construction in Dalsung Area of Daegu. *Journal of Korean Geotechnical Society* 26(5): 10-18.
- Korea Forest Service. 2012. Spot Manual for Prevention and Response on Landslide. pp. 114.
- Korea Forest Service. 2014. Expert Workshop for Landslide Prevention in Korea. pp. 94.
- Lee, S.H. 2005. Application of physically based hydrologic model to the prediction of shallow landslide potential area using GIS. Doctor of Philosophy Dissertation Chungbuk University Korea.
- Lee, S.R. 2001. Application of Regional Landslide Susceptibility, Possibility, and Risk Assessment Techniques Using GIS. *The Korean Society of Economic and Environmental Geology, Economic and Environmental Geology* 34(4): 385-394.
- Ma, H.S. 1990. Studies on landslide and debris flow in Mt. Chiri district. *Research Bulletin of Experiment Forests Gyeongsang National University* 1: 13-25.
- Ma, H.S. 1992. Studies on Landslides and debris flow in Mt. Chiri district(II). *Research Bulletin of Experiment Forests Gyeongsang National University* 2: 17-28.
- Ma, H.S. 1994. Studies on development of prediction model of landslide hazard and its utilization. *Journal of Korean Forestry Society* 83: 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. 2007. Analysis of landslides characteristics in Korean National Parks. *Journal of Korean Forestry Society* 6: 611-619.
- Ma, H.S., Jeong, W.O., and Park, J.W. 2008. Development of technique of landslide hazard area in Korea National Parks. *Journal of Korean Forestry Society* 97: 326-331.
- Ministry of Science and Technology. 2006. Development of QRA system and damage mitigation technology of landslides. pp. 360.
- National Emergency Management Agency. 2008. Development of Prediction and Reduction Technology in Landslide.
- Oh, C.Y., Jun, K.W., Jang, C.D., and Jun, B.H. 2011. Verifying of Soil Water Index for Sediment Disaster Triggering in Mountainous Area. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 7(4): 167-176.
- Toshio Shimizu. 1977. Statistical Analysis on Hazard Stability in Granite area. *Journal of Japanese Forestry Society* 59: 186-190.
- Toshio Shimizu. 1978. Discrimination of Dangerous Slope in Landslide - Theory and Technology -. *Forest Techniques* 439: 23-26.
- Woo, C.S., Lee, C.W., and Jeong, Y.H. 2008. Study on Application of Topographic Position Index for Prediction of the Landslide Occurrence. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 11(2): 1-9.

(2013년 11월 6일 접수; 2014년 5월 8일 채택)