

GIS 및 원격탐사를 이용한 2002년 강릉지역 태풍 루사로 인한 산사태 연구(II) -확률기법을 이용한 강릉지역 산사태 취약성도 작성 및 교차 검증

이사로^{1*} · 이명진² · 원중선²

¹한국지질자원연구원 지질자원정보센터, ²연세대학교 지구시스템학과

Study on Landslide using GIS and Remote Sensing at the Kangneung Area (II) -Landslide Susceptibility Mapping and Cross-Validation using the Probability Technique

Saro Lee^{2*}, Mounng-Jin Lee¹ and Joong-Sun Won¹

¹Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

²Department of Earth System Science, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

The aim of this study is to evaluate the susceptibility of landslides at Kangneung area, Korea, using a Geographic Information System (GIS) and remote sensing. Landslide locations were identified from interpretation of satellite image and field surveys. The topographic, soil, forest, geologic, lineament and land cover data were collected, processed and constructed into a spatial database using GIS and remote sensing data. Using frequency ratio model which is one of the probability model, the relationships between landslides and related factors such as slope, aspect, curvature and type of topography, texture, material, drainage and effective thickness of soil, type, age, diameter and density of wood, lithology, distance from lineament and land cover were calculated as frequency ratios. Then, the frequency ratio were summed to calculate a landslide susceptibility indexes and the landslide susceptibility maps were generated using the indexes. The results of the analysis were verified and cross-validated using actual landslide location data. The verification results showed satisfactory agreement between the susceptibility map and the existing data on landslide locations.

Key words : typhoon Rusa, spatial database, susceptibility, cross-validation, Kangneung

본 연구의 목적은 강릉지역에 대해 산사태 취약성을 GIS와 원격탐사를 이용하여 평가하는 것이다. 이를 위해 산사태 위치는 위성영상 해석 및 현지 조사를 통해 확인되었고, GIS와 원격탐사를 이용하여 지형도, 토양도, 지질도, 선구조도, 토지피복도 등이 수집되고, 처리된 후 공간 데이터베이스로 구축되었다. 확률 기법인 빈도비 모델을 이용하여 산사태와 경사, 경사방향, 곡률, 수계, 지형종류, 토질, 토양모재, 토양배수, 유효토심, 임상종류, 임상경급, 임상영급, 임상밀도, 암상, 토지피복도, 선구조도 등 산사태 발생 요인들과의 관계를 계산하여 빈도비를 구하였다. 그리고 이러한 빈도비를 모두 더하여 산사태 취약성 지수를 계산하였으며, 이러한 취약성 지수를 모두 더하여 취약성도를 작성하였다. 그 결과는 실제 산사태 위치자료를 이용하여 검증 및 교차 검증되었고, 그 검증 결과는 산사태 취약성도와 산사태 위치와 밀접한 관계가 있었다.

주요어 : 태풍 루사, 공간 데이터베이스, 취약성, 교차 검증, 강릉

1. 서 론

우리나라는 매년 장마철에 산사태가 집중적으로 발생하고 있다. 빈번히 발생하는 산사태에 의하여 많은 인적

자원 및 재산 피해가 나고 있으며, 이를 복구하는데 많은 시간과 인력을 들이는 경제적인 손실이 발생하고 있다. 이러한 산사태 발생지역에 대한 다각적이고 종합적인 원인 조사 및 이를 위한 취약성도 작성은 산사태의

*Corresponding author: leesaro@kigam.re.kr

발생 가능성 및 위험성을 평가하고 발생시의 피해를 최소화할 수 있다. 이를 위해 지리정보시스템(GIS)을 사용한다면 산사태에 방대한 공간정보 데이터베이스를 계속적으로 수집 및 관리, 분석 할 수 있으며, 빈도비(Frequency Ratio; Lee and Min, 2001)를 통하여 정량적인 산사태의 영향 요인별 등급값을 구하여 산사태 취약성을 분석할 수 있다. 산사태의 취약성 기법이 적용되면 산사태 발생원인을 분석할 수 있으며, 이를 바탕으로 산사태 발생 가능성을 예측할 수 있기 때문에 산사태에 의한 피해 예방과 관리가 가능해진다. 따라서 본 연구의 목적은 확률기법인 빈도비 모델을 강릉시의 2개 지역에 적용하여 취약성도를 작성하고, 검증 및 교차 검증을 통해 취약성도의 정확도를 평가하는 것이다.

기존의 GIS를 이용한 산사태 위험성 평가를 다룬 국내의 많은 연구가 진행되어왔다. 특히 Guzzetti *et al.* (1999)의 논문에 많은 산사태 위험 평가 연구들이 잘 정리되어 있다. 최근에는 GIS를 기반으로 확률기법을 이용한 연구들(Rowbotham and Dudyca, 1998; Parise and Jibson, 2000; Baeza and Corominas, 2001; Lee and Min, 2001; Wu *et al.*, 2001; Clerici *et al.*, 2002; Donati and Turrini, 2002; Lee *et al.*, 2002a, Lee *et al.*, 2002b; Zhou *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2003a; Lee *et al.*, 2004a; Lee *et al.*, 2004b), 로지스틱 회귀 공식을 이용한 연구들(Atkinson and Massari, 1998; Dai and Lee, 2002; Ohlmacher and Davis, 2003), 안전율을 이용한 연구들(Luzi and Pergalani, 1996; Gokceoglu *et al.*, 2000; Luzi *et al.*, 2000; Romeo, 2000; Shou and Wang, 2003; Zhou *et al.*, 2003), 인공지능경망을 이용한 연구들(Lee *et al.*, 2003b; Lee *et al.*, 2003c; Lee *et al.*, 2004c)이 많이 진행되어 왔다.

2. 연구지역 및 공간 데이터베이스

연구지역은 행정구상으로 강원도 강릉시 사천면 사

기막리와 주문진읍 삼교리에 해당한다. 지리 좌표 상으로는 사기막리 지역의 경우는 동경 128°45'00"~128°50'00", 북위 37°45'00"~37°50'00" 이고, 삼교리 지역의 경우는 동경 128°45'00"~128°47'50" 북위 37°52'50"~37°52'80" 에 해당하는 지역이다. 이 가운데에서 상세 연구 대상지역은 사천면 사기막리 지역 일대, 즉 사기막 저수지 지역에서부터 강릉 고속도로 인터체인지 부근까지의 지역이다.

각각의 산사태에 영향을 주었을 공간데이터베이스(Table 1)는 GIS 프로그램을 활용하여 산사태 지역의 1:5,000 축척의 정밀 지형도, 1:25,000 축척의 정밀 토양도, 1:25,000 축척의 임상도, 1:250,000 축척의 지질도를 ARC/INFO 커버리지 형태의 공간데이터베이스로 정리하였다. 토지이용도는 2000년 5월 8일 Landsat TM(Thematic Mapper) 영상을 이용하여 작성하였으며, 영상에서 추출한 선구조를 100 m 간격의 버퍼링을 적용하여 데이터베이스로 구축하였다. 지질요인의 경우는 암상을 추출하여 암상도를 구축하였다. 지형요인의 경우에는 지형도에서 수계를 추출한 후 이를 100 m단위로 버퍼링하여 데이터베이스로 구축을 하였으며, 또한 DEM(Digital Elevation Model)을 생성하여 고도, 경사, 경사방향, 곡률 등의 지형분석을 실시하여 각각을 데이터베이스로 구축하였다. 토양요인의 경우 토양도에 있는 지형종류, 토질, 모재, 배수, 유효토심 등을 데이터베이스로 구축하였다. 임상의 경우에도 임상도에서 임상, 경급, 영급, 밀도 등을 데이터베이스 구축하였다. 이러한 과정을 거쳐서 각각 구축된 데이터베이스는 5×5 m 간격의 격자(ARC/INFO GRID 형태)로 변환하였다. 연구지역의 격자수는 사기막리 지역의 경우에는 행과 열이 1,586×1,209로 총 격자수는 1,917,474이며, 삼교리 지역의 경우에는 행과 열이 505×768로 총 격자수는 387,840이다. 빈도비를 사용하여 각각 구분되어진 요인들이 발생한 산사태에 미치는 등급값을 계산하였다.

Table 1. Spatial database of study area.

Classification	Sub-Classification	Data Type	Scale
Geological Hazard	Landslide	Point coverage	1 : 5,000
	Topographic Map	Line and point coverage	1 : 5,000
Basic Map	Geological Map	Polygon coverage	1 : 250,000
	Lineament Map	Line coverage	1 : 50,000
	Drainage Lineament Map	Line coverage	1 : 5,000
	Soil Map	Polygon coverage	1 : 25,000
	Forest Map	Polygon coverage	1 : 25,000
	Landsat TM	GRID	30 m×30 m
Image Data	Land Use	GRID	30 m×30 m
	Kompsat Satellite Image	GRID	6 m×6 m

이후에 각각 등급값을 활용하여 산사태 취약성도를 작성하였으며, 검증을 위하여 계산되어진 산사태 취약성 지수가 기존 산사태 발생을 설명하는 것을 정량적으로 표현하기 위하여 추정능력(Success rate)을 계산하였다.

3. 산사태 분석 기법 및 단계

산사태 분석방법에는 산사태의 취약성(Susceptibility), 가능성(Possibility) 및 위험성(Risk) 분석이 있다. 이러한 분석 기법들은 대축척, 중축척, 소축척 등으로 나누어 적용된다. 산사태 취약성은 집중호우나 지진과 같은 충격을 받았을 때 산사태가 일어날 수 있는 상대적인 가능성을 의미한다. 이러한 산사태 취약성 분석에는 여러 가지 방법이 있으며 입력 자료의 축척별로 분류되었는데 그 이유는 산사태 분석 기법이 축척에 따라서

다르기 때문이다. 소축척은 1:500,000 이상의 입력 자료를 사용하여 분석하며, 중축척은 1:25,000~1:50,000의 자료를 사용하고, 대 축척은 1:5,000 이상의 자료를 사용하여 분석한다. 이러한 축척에 의한 산사태 취약성 분석 기법은 Table 2와 같다. 본 연구에서는 다변량 확률방법이 주로 사용되었는데, 이 방법은 확률기법에 의하여 각각 요소의 등급값을 정하고 이를 바탕으로 산사태 취약성도를 작성하였다. 산사태와 관련되는 각각의 요인과 산사태와의 관계가 확률적으로 분석하고, 그 결과를 이용하여 산사태 취약성도가 작성된다. 그리고 이러한 산사태 분석에 사용될 수 있는 자료의 종류는 Table 3과 같다.

산사태 분석 단계에서의 취약성은 강우, 지진 등 산사태를 직접적으로 유발시키는 요인이 생겼을 때 그 지역이 얼마나 산사태 발생에 취약한가를 분석하는 것이다. 산사태 가능성은 어떤 지역의 산사태 취약성에

Table 2. Landslide susceptibility analysis technique to map scales (Turner and Schuster, 1996).

Technique	Characteristics	Scale
Landslide distribution analysis	Analyze distribution and classification of landslide	r,m,l
Landslide activity analysis	Analyze temporal changes in landslide pattern	m,l
Landslide density analysis	Calculate landslide density in terrain units or as isopleth map	r
Geomorphologic analysis	Use in-field expert opinion in zonation	r,m,l
Qualitative map combination	Use expert-based weight values of parameter maps	r,m
Bivariate statistical analysis	Calculate importance of contributing factor	m
Multivariate statistical analysis	Calculate prediction formula from data matrix	m
Safety factor analysis	Apply slope stability model	l
Score method	Apply score table	l

(r: regional scale, m: medium scale, l: large scale)

Table 3. Available input data in Korea for landslide susceptibility analysis using GIS (Lee, 1998; Turner and Schuster, 1996)

Type	Layer	Attribute items	Data source	
Landslide	Landslide	Date, type, activity, depth, dimension	Field survey	
	Geomorphological units	Geomorphological description	Topographic map, Soil map	
	Altitude	Altitude	Topographic map	
	Geomorphology	Slope angle	Slope angel	Topographic map
		Slope direction	Slope direction	Topographic map
		Slope length	Slope length	Topographic map
		Curvature	Concavity/convexity	Topographic map
Engineering Geology	Lithology	Lithology, rock strength, discontinuity spacing	Geological map	
	Soil	Material types, depth, USCS, classification, Parent material, soil drainage	Soil map	
	Structural geology	Fault type, length, dip, dip direction, fold axis, lineament length, direction, density	Geological map, Airphoto, Satellite image, Field survey	
	Seismic accelerations	Maximum seismic acceleration	Observation data	
Forest	Forest	Wood type, age, diameter, density	Forest map	
Land Use	Land use map	Land use and cover type	Topographic map Satellite image	
	Meteorological station	Rainfall, temperature, evapotranspiration	Report	
Hydrology	Drainage	Type, order, length, order, size	Topographic map	
	Groundwater table maps	Depth of groundwater table	Report	

경우, 지진 등의 산사태 유발요인의 발생 가능성을 더해 그 지역에서 산사태가 얼마나 잘 일어날 수 있는가를 분석하는 것이다. 그리고 산사태 위험성은 산사태 취약성 혹은 가능성에 인명, 시설물 등 피해요소를 같이 고려한 것으로 산사태로 인해 인명 및 시설물의 피해 가능성이 얼마인가를 분석하는 것이다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{Susceptibility} = f(\text{Landslide, Landslide related factors}) \quad (1)$$

$$\text{Possibility} = f(\text{Susceptibility, Impact factors}) \quad (2)$$

$$\text{Risk} = f(\text{Possibility, Damageable object}) \quad (3)$$

이러한 3단계의 분석 과정 중 본 연구에서는 산사태의 취약성 분석만을 실시하였다.

Table 4. Spatial relationship between landslide and related factors in Sagimakri area.

	Class	Domain (%)	Landslide (%)	Ratio
Slope	0 ~ 5	18	0	0.00
	6 ~ 10	11	0	0.04
	11 ~ 15	16	3	0.18
	16 ~ 20	19	11	0.56
	21 ~ 25	17	20	1.21
	26 ~ 30	11	34	3.03
	31 ~ 35	6	22	3.83
	36 ~ 40	2	6	3.06
	41 ~ 90	1	3	4.58
Aspect	Flat	4	0	0.00
	North	12	7	0.58
	Northeast	15	12	0.81
	East	16	17	1.08
	Southeast	13	11	0.83
	South	9	14	1.58
	Southwest	9	10	1.14
	West	11	17	1.57
	Northwest	12	13	1.06
Curvature	Concave	29	30	1.02
	Flat	41	28	0.69
	Convex	30	42	1.40
Distance from Drainage	Buffer (100 m)	74	72	0.98
	Buffer (200 m)	20	22	1.14
	Buffer (300 m)	5	4	0.82
	Buffer (400 m)	2	2	0.99
	Buffer (endm)	0	0	0.00
Topographic Type	No data	2	0	0.19
	Lower hilly area	0	0	0.00
	Valley area	15	14	0.90
	Mountainous area	77	84	1.10
	Plains area	3	0	0.00
	Valley and alluvial fan	0	0	1.60
	Hilly and Mountainous area	0	0	1.10
	Vally and Piedmont area	1	1	0.76
Lower hilly and Piedmont area	1	0	0.00	
Soil Texture	Sandy loam	915636	61	1.28
	Fine sandy loam	8648	0	0.00
	Gravelly sandy loam	2625	0	1.60
	Loam	35391	1	0.48
	Silt loam	32060	0	0.00
	Gravelly loam	27715	1	0.76
	Overflow area	43180	0	0.19
	Rocky sandy	627654	31	0.94
	Rocky loam	224294	5	0.45
	Gravelly sandy	271	0	0.00

Table 4. Continue.

	Class	Domain (%)	Landslide (%)	Ratio
Soil Drainage	No data	2	0	0.19
	Poorly drained	6	2	0.34
	Somewhat poorly drained	5	6	1.12
	Moderately well drained	1	1	0.66
	Well drained	10	7	0.70
	Excessively drained	76	84	1.11
Soil Material	No data	2	0	0.19
	Colluvium	2	1	0.59
	Valley alluvium	15	14	0.90
	Granite residuum	66	79	1.21
	Fluvial alluvium	3	0	0.00
	Pluton residuum	12	5	0.45
Soil Thickness	No data	2	0	0.19
	Poorly shallow	0	0	0.00
	Shallow	44	36	0.82
	Normal	51	62	1.21
	Deep	2	1	0.57
Forest Type	Non-forest	23	26	1.14
	Borad leaf tree	2	2	1.06
	Pine	54	55	1.03
	Cultivated	3	3	0.90
	Paper pulp	0	0	0.00
	Artificial pine	1	2	2.18
	Larch	4	4	0.90
	Korea nut pine	8	5	0.57
	Artificial rigida pine	0	1	2.31
Mixing tree	5	3	0.67	
Forest Diameter	Non-forest	26	29	1.11
	Very small diameter	14	12	0.87
	Small diameter	46	50	1.09
	Medium diameter	14	9	0.64
Forest Age	Non-forest	26	29	1.11
	1st age	14	12	0.87
	2nd age	31	40	1.30
	3rd age	16	10	0.66
	4th age	13	8	0.61
	5th age	1	1	-1.18
Forest Density	Non-forest	39	40	1.02
	Loose	46	43	0.94
	Moderate	10	12	1.13
	Dense	5	5	1.07
Geology	Grante	99	100	1.01
	Alluvial deposit	1	0	0.00
Distance from Lineament	Buffer (100m)	24	52	2.12
	Buffer (200m)	22	25	1.15
	Buffer (300m)	17	10	0.57
	Buffer (400m)	13	6	0.47
	Buffer (500m)	9	4	0.47
	Buffer (endm)	15	3	0.21
Land Cover	No data	0	0	0.00
	Water	0	0	0.87
	Urban	2	4	2.10
	Forest	89	88	0.95
	Grass	2	1	0.55
	Rice field	6	6	1.07
	Barren	0	0	1.80

Domain : pixels in study area

Domain (%) : domain / total pixels in study area

Landslide : number of landslide occurrences

Landslide (%) : Landslide / total number of landslide occurrences

Ratio : landslide (%) / domain(%)

4. 산사태 취약성도 작성

본 연구지역에 대한 빈도비 값은 기존의 각 요인 및 산사태와의 관계를 분석한 결과를 이용하였다(이명진의, 2004). 빈도비는 각 요인의 등급별 산사태 발생 면적 비율을 각 요인 등급이 전체 면적에서 차지하는 비율로 나눈 것으로서, 이 빈도비가 1이면 평균을 의미하고, 1보다 클수록 산사태 발생과 높은 상관관계를

나타낸다. 즉 산사태 발생 확률이 높다는 것을 의미한다. 그리고 1보다 작을수록 산사태 발생과 낮은 상관관계를 나타낸다. 즉 산사태 발생 확률이 적다는 것을 의미한다. 이러한 빈도비 값은 Table 4와 Table 5와 같으며, 산사태 취약성도 작성을 위해 각 요인에 대해 이러한 빈도비 값을 준 다음, 이를 중첩 분석하여 산사태 취약성 지수(LIS: Landslide Susceptibility Index)를 구하였다. 즉 산사태 취약성 지수는 산사태와 각 요

Table 5. Spatial relationship between landslide and related factors in Samkyori area.

	Class	Domain (%)	Landslide (%)	Ratio
Slope	0 ~ 5	20	0	0.00
	6 ~ 10	11	0	0.00
	11 ~ 15	18	0	0.00
	16 ~ 20	20	1	0.07
	21 ~ 25	17	22	1.31
	26 ~ 30	9	40	4.31
	31 ~ 35	4	28	7.88
	36 ~ 40	1	7	6.33
Aspect	41 ~ 90	0	2	5.90
	Flat	5	0	0.00
	North	12	20	1.66
	Northeast	14	17	1.23
	East	14	18	1.30
	Southeast	13	8	0.64
	South	12	11	0.98
	Southwest	12	11	0.88
Curvature	West	9	10	1.10
	Northwest	10	5	0.48
	Concave	27	32	1.16
Distance from Drainage	Flat	44	30	0.69
	Convex	29	38	1.33
	Buffer (100m)	84	87	1.04
Topographic Type	Buffer (200m)	15	13	0.85
	Buffer (300m)	1	0	0.00
	No data	22	26	1.20
	Lower hilly area	4	1	0.33
	Valley area	17	11	0.68
	Mountainous area,	45	59	1.30
	Plains area	3	0	0.00
	Valley and alluvial fan	0	0	0.00
	Hilly and Mountainous area	6	1	0.11
Soil Texture	Vally and Piedmont area,	1	1	1.57
	Lower hilly and Piedmont area	2	0	0.00
	No data	18	23	1.25
	Sandy loam	47	28	0.60
	Fine sandy loam	1	0	0.00
	Gravelly sandy loam	0	0	0.00
	Loam	7	2	0.30
	Silt loam	0	0	0.00
	Gravelly loam	1	1	1.57
	Overflow area	3	3	0.98
Rocky sandy	22	42	1.93	

Table 5. Continue

	Class	Domain (%)	Landslide (%)	Ratio
Soil Drainage	No data	22	26	1.20
	Poorly drained	5	0	0.00
	Somewhat poorly drained	9	8	0.92
	Moderately well drained	3	1	0.20
	Well drained	10	5	0.54
	Excessively drained	51	59	1.16
Soil Material	No data	22	26	2.75
	Colluvium	3	1	1.02
	Valley alluvium	17	11	1.56
	Granite residuum	55	61	2.51
	Fluvial alluvium	3	0	0.00
Soil Thickness	No data	22	26	1.20
	Poorly shallow	1	0	0.00
	Shallow	22	42	1.93
	Normal	54	30	0.57
	Deep	2	1	0.67
Forest Type	Non-forest	27	13	0.48
	Pine	68	82	1.21
	Artificial broad leaf tree	1	0	0.00
	Cultivated	2	1	0.79
	Korea nut pine	1	2	2.16
	Mixing tree	1	1	1.11
Forest Diameter	Non-forest	29	14	0.49
	Very small diameter	2	2	1.03
	Small diameter	69	81	1.18
	Medium diameter	1	3	3.40
Forest Age	Non-forest	29	14	0.49
	1st age	2	2	1.03
	2nd age	62	68	1.09
	3rd age	6	14	2.08
	4th age	1	3	3.40
Forest Density	Non-forest	22	22	1.03
	Loose	39	55	1.42
	Moderate	9	7	0.75
	Dense	31	16	0.53
Geology	Grainite	100	100	1.00
	Alluvial deposit	0	0	0.00
Distance from Lineament	Buffer (100 m)	38	59	1.57
	Buffer (200 m)	26	24	0.92
	Buffer (300 m)	16	5	0.30
	Buffer (400 m)	8	5	0.63
	Buffer (500 m)	5	3	0.60
	Buffer (endm)	8	4	0.52
Land Cover	No data	0	0	0.00
	Water	0	0	0.00
	Urban	2	1	0.65
	Forest	89	90	1.01
	Grass	3	6	1.85
	Rice field	5	2	0.39
Barren	0	1	2.65	

Domain : pixels in study area

Domain (%) : domain / total pixels in study area

Landslide : number of landslide occurrences

Landslide (%) : Landslide / total number of landslide occurrences

Ratio : landslide (%) / domain(%)

인과의 관계인 빈도비 값을 각 요인에 등급값으로 하여 식 (4)과 같이 각 요인에 대해 가중치를 1로 같이 주고 모두 더한 값이다.

$$LSI = \sum F_{ir} \quad (F_{ir}: \text{각 요인의 종류별 등급값}) \quad (4)$$

이렇게 계산된 산사태 취약성 지수값으로 강릉시 사천면 사기막리와 주문진읍 삼교리지역에 대해 산사태 취약성도를 작성하였다(Fig. 1 and 2). 즉 Fig. 1은 사기막리 지역의 빈도비를 사기막리 지역에 적용한 경우이고, Fig. 2는 삼교리 지역의 빈도비를 삼교리 지역에 적용한 경우이다. 그리고 각각의 빈도비를 상대방에 적용하여 취약성도를 작성하였다(Fig. 3 and 4). 즉 Fig 3은 삼교리 지역 빈도비를 사기막리 지역에 적용한 경우이고, Fig. 4는 사기막리 지역의 빈도비를 삼교리에 적용한 경우이다. 취약성도에서 산사태 취약성 지수값의 구분은 시각적으로 구분이 편리하게 하기 위해 지수값이 분포하는 면적을 같게 하는 방법인 등간격 방법을 사용하였다.

5. 산사태 취약성도 검증 및 교차 검증

취약성도의 값들은 일종의 추정값에 해당되는데, 예측을 위해서는 검증과정이 필요하다. 이러한 검증을 위해 본 연구에서는 사기막리 지역의 산사태 등급값과 삼교리 지역의 등급값을 각각 적용하고, 또한 교차 적

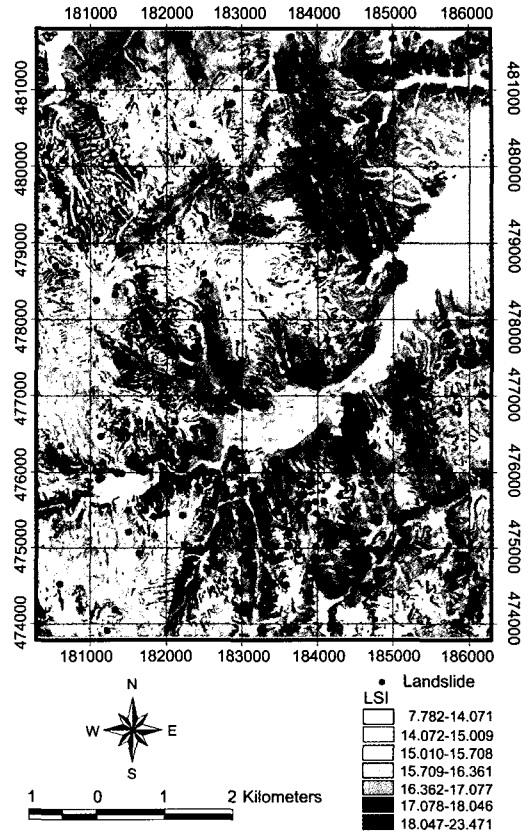


Fig. 1. Landslide susceptibility map by applying frequency ratio of Sagimakri to Sagimakri.

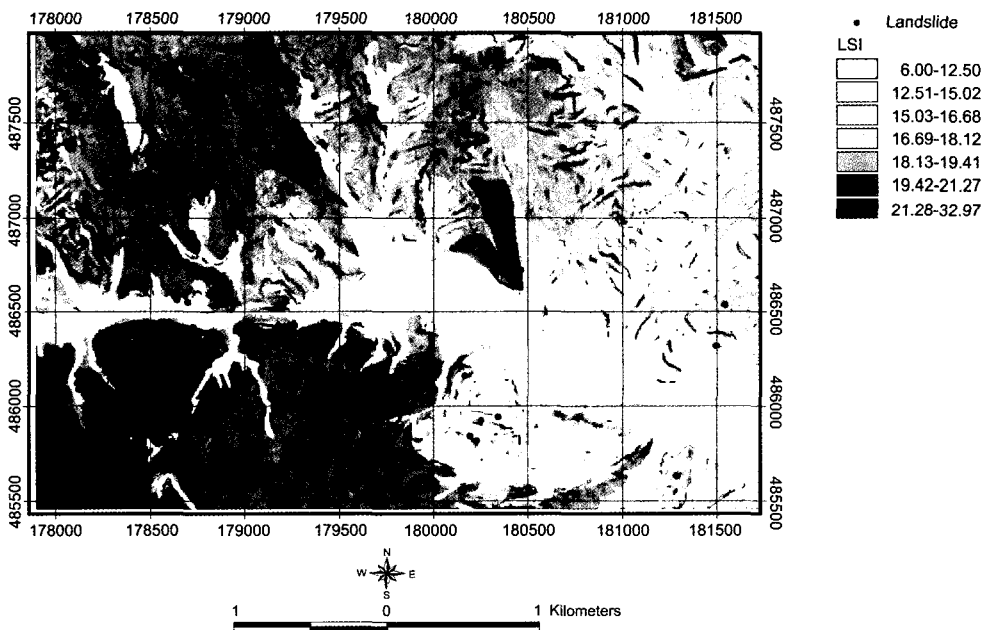


Fig. 2. Landslide susceptibility map by applying frequency ratio of Samgyori to Samgyori.

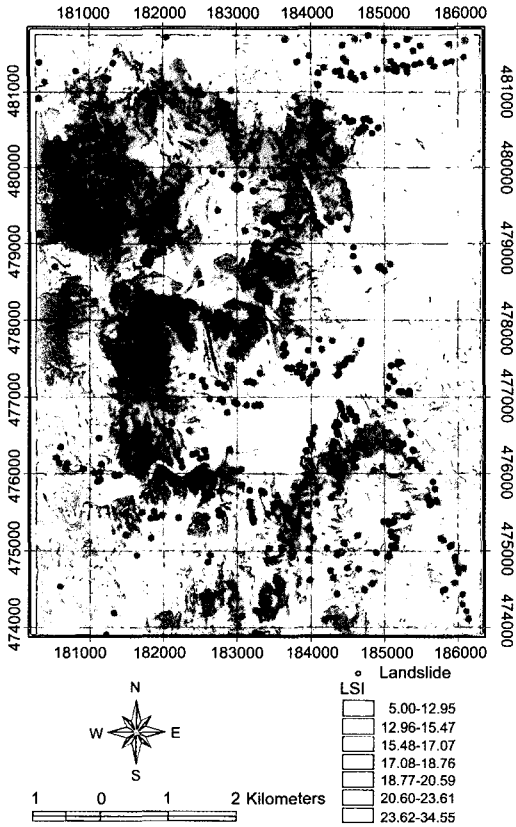


Fig. 3. Landslide susceptibility map by applying frequency ratio of Samkyori to Sagimakri.

용함으로써 각각의 경우의 산사태 등급값이 얼마나 올바른 추정치인지 여부를 검증하였다. 이러한 검증 및 교차 검증은 산사태 취약성도 작성에 사용된 산사태 위치의 정확성, 관련 요인자료들의 적절성, 적용된 기법의 적절성 등을 검증하는데 꼭 필요한 절차이다. 특히 교차 검증을 적용할 경우 적용된 기법의 적절성 뿐만 아니라, 예측 정확도까지 객관적으로 평가할 수 있다.

기존 계산된 산사태 취약성 지수의 기존 산사태 발생을 설명하는 능력을 정량적으로 표현하기 위하여 추정능력을 계산하였다. 추정능력을 계산하기 위하여, 산사태 취약성 지수 값을 그대로 사용하지 않고 상대적 순위(rank)를 계산하여 10% 별로 값을 재분류하여 그 범위에 포함되는 기존 산사태 발생 위치의 셀 수를 계산하여 상대적 비율을 계산하였다. 이와 같이 계산하여, 사기막리 및 삼교리 지역에 대해 분석된 취약성도에서 얻어진 취약성 지수값을 단위 면적당 산사태 발생 비율 값을 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이 그래프는 Y축에는 산사태 취약성에서 작성된 위험성이 높은 지역을 상위 퍼센트로부터 나열한 값이고 X축은 산사태가 발생한 하위 퍼센트 값을 나타낸다. 예를 들어, Y축의 값이 1%일 때 X축의 값이 100%라면 산사태 취약성도에서 위험성이 높게 나타난 1%의 픽셀 안에 산사태가 발생한 모든 위치가 속한다는 것을 의미한다. 상대적 순위를 사용할 경우, 각 범위가 연구지역

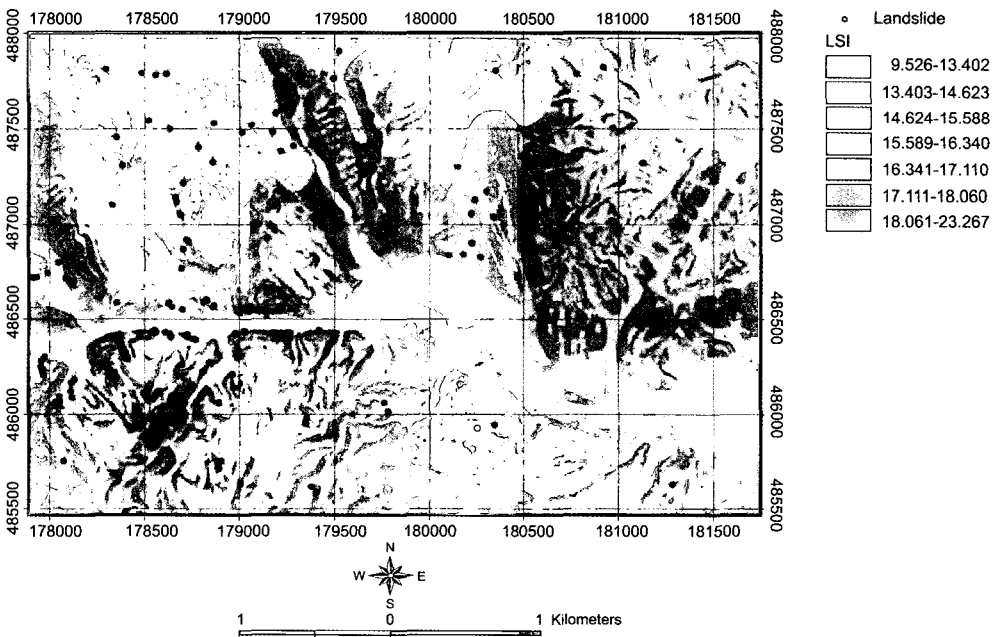


Fig. 4. Landslide susceptibility map by applying frequency ratio of Sagimakri to Samkyori.

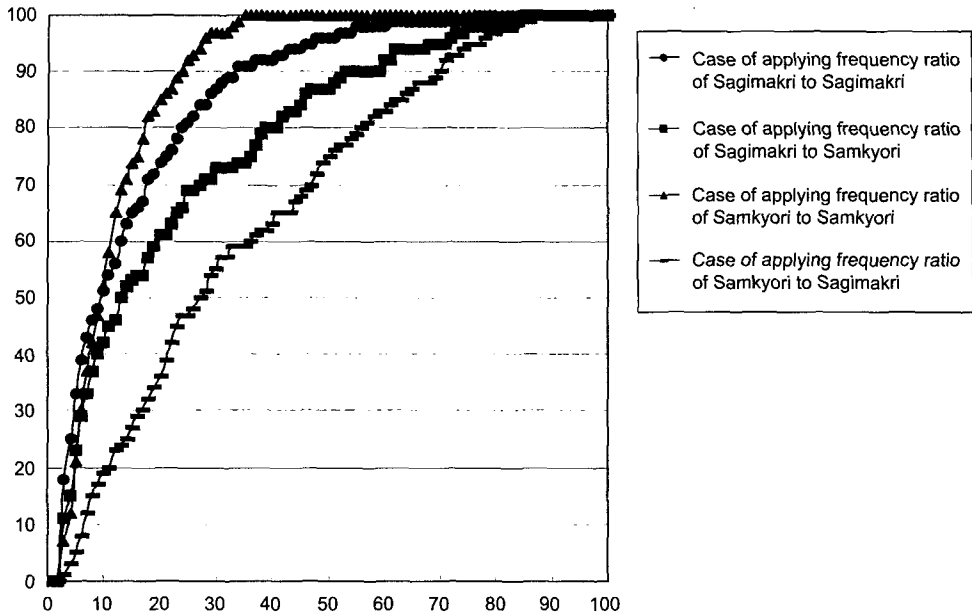


Fig. 5. Success rate curve for each cases.

전체에서 차지하는 비율이 같기 때문에 서로 비교하기 수월하며, 다른 모델을 사용하여 계산된 결과와 비교할 수 있다.

추정능력을 보게 되면(Fig. 5), 산사태 취약성 지수가 높은 경우인, 순위가 높은 부분으로 갈수록 산사태가 많이 발생되었음을 확인할 수 있다. 보다 정량적인 분석을 위해 그래프 아래쪽의 면적을 구하였다. 즉 그래프 아래쪽의 면적이 넓을수록 보다 더 완벽한 검증 결과를 나타내기 때문이다. 만약 결과가 완벽하다면 아래쪽 면적의 비율이 100%가 된다. 즉 아래쪽 면적의 비율을 추정능력으로 볼 수 있다. 이러한 추정능력은 사기막리 지역에서 구한 빈도비를 사기막리 지역에 적용한 취약성도의 경우 85.90%이고, 삼교리 지역에서 구한 빈도비를 삼교리 지역에 적용한 취약성도의 경우 89.11%이다. 사기막리 지역에서 구한 빈도비를 삼교리 지역에 적용한 취약성도의 산사태 추정능력은 78.70%이며, 삼교리 지역에서 구한 빈도비를 사기막리 지역에 적용한 취약성도의 산사태 추정능력은 67.64%로 나타났다. 즉 같은 지역의 빈도비를 적용한 경우는 85% 이상 높게 나타났으며, 다른 지역의 빈도비를 적용한 경우 78.70%, 67.64%로 낮게 나타났다.

6. 결론 및 토의

본 연구에서는 빈도비 방법을 이용한 산사태 발생

취약성을 분석하였으며, 교차 적용을 통하여 사기막리 지역의 등급값을 삼교리 지역에 적용하여 각각의 지역에 대한 전체적인 산사태 위험성을 평가하였다. 분석된 취약성도는 계산된 산사태 취약성 지수를 기존 산사태 발생을 정량적으로 설명 및 표현하기 위하여 추정능력을 계산하여 검증 및 교차 검증을 실시하였다. 그 결과 같은 지역에서 계산된 빈도비를 적용할 경우가 다른 지역에서 계산된 빈도비를 적용할 경우 즉 교차적용의 경우보다 더욱 높은 추정능력을 나타내었다. 즉 삼교리 지역의 빈도비를 삼교리 지역에 적용하였을 때가 가장 높은 추정능력(89.11%)을 나타내었고, 사기막리 지역의 빈도비를 사기막리 지역에 적용했을 때가 두 번째로 높은 추정능력(85.90%)을 나타내었다. 교차 적용에서는 사기막리 지역의 빈도비를 삼교리 지역에 적용한 경우(78.70%)가 그 반대의 경우(67.64%) 보다 높은 추정능력을 나타내었다.

삼교리 지역의 빈도비를 사기막리 지역에 적용하였을 때는 사기막리 지역의 빈도비를 삼교리 지역에 적용한 것 보다 추정능력이 많이 낮게 나왔다. 이는 삼교리 지역과 사기막리 지역의 선정의 크기를 고려해 볼 수 있다. 삼교리 지역은 산사태가 발생한 지역을 좁게 선정하고, 사기막리 지역은 산사태 발생한 지역을 넓게 선정하였다, 그렇기 때문에 사기막리 지역은 삼교리 지역에서는 분류되지 않은 값들도 포함되어 분류되었다, 예를 들어, 토양명에서는 사기막리 지역에서

는 바위가 있는 사양토와 바위가 있는 양토 등이 포함된다, 그러나 삼교리 지역은 연구지역 내에 이러한 분류는 없으며, 토양모재에서는 사기막리 지역에서는 산성화강암 잔적층이 있으나 삼교리는 이러한 토양특성을 포함하지 못한다. 또한 임상종류에서는 사기막리 지역에는 낙엽송림, 제지, 인공 소나무림, 혼효림, 리기다 소나무림 등이 포함되어있지만 삼교리 지역에는 이러한 임상 종류가 포함되지 않으며, 지역이 좁기 때문에 수계추출을 이용한 버퍼링에서도 400 m는 포함되지 않는다. 즉 삼교리 지역에서 구해진 빈도비를 사기막리 지역에 적용할 때 분류가 되지 않은 종류가 많아 이러한 지역은 빈도비 평균값인 1을 주었기 때문에 추정능력이 많이 떨어지는 것으로 사료된다. 그러나 사기막리 지역의 경우 다양한 분류를 포함하기 때문에 이를 삼교리에 적용하였을 때는 삼교리 지역의 분류들은 대부분 빈도비를 가지므로 교차 검증에서 보다 좋은 추정능력을 보여주었다.

본 연구의 결과인 산사태 취약성도 작성이 구체적으로 활용되기 위해서는 전국을 대상으로 산사태가 발생한 지역에 대해 보다 체계적인 적용 및 분석이 이루어져야 할 것이다. 그러기 위해서는 과거 발생한 산사태 발생위치를 과학적이고 체계적으로 DB를 구축하고, 공간분석을 통해 보다 정확한 예측모델이 개발 및 적용되어야 할 것이다. 본 연구에 사용된 지형, 토양, 임상 등의 지형공간정보는 이미 전국을 대상으로 대부분 구축되어 있는 상태이기 때문에 보다 많은 적용 연구가 진행된다면 보다 빠른 시간에 산사태 예측 및 예방에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 이명진, 이사로, 원중선 (2004) GIS와 원격탐사를 이용한 강릉지역 산사태 연구 (I)-산사태 발생 위치와 영향인자와의 상관관계 분석. *자원환경지질*, 37권 4호, p. 425-436.
- Atkinson, P.M. and Massari, R. (1998) Generalized linear modeling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Computer & Geosciences*, v. 24, p. 373-385.
- Baeza, C. and Corominas, J. (2001) Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 26, p. 1251-1263.
- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C. and Vescovi, P. (2002) A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, v. 48, p. 349-364.
- Dai, F.C. and Lee, C.F. (2002) Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, *Lantau Island, Hong Kong. Geomorphology*, v. 42, p. 213-228.
- Donati, L. and Turrini, M.C. (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*, v. 63, p. 277-289.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H. and Ercincoglu, M. (2000) Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altindag (settlement) region in Turkey. *Engineering Geology*, v. 55, p. 277-296.
- Guzzetti, F., Carrarra, A., Cardinali, M. and Reichenbach P. (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, *Central Italy. Geomorphology*, v. 31, p. 181-216.
- Jibson, R.W., Edwin L.H. and John, A.M. (2000) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology*, v. 58, p. 271-289.
- Lee, S. (1998) Analysis of Landslide Susceptibility in Korea using Geographic Information System, *Proceedings of International Symposium on Application of Remote Sensing and Geographic Information System to Disaster Reduction*, p. 141-147.
- Lee, S. and Min, K. (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, v. 40, 1095-1113.
- Lee, S., Chwae, U. and Min, K. (2002a) Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology*, 46, 149-162.
- Lee, S., Chol, J. W., and Min, K. D. (2002b) Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian Probability model. *Environmental Geology*, v. 43 p.120-131.
- Lee, S. and Choi, U.C. (2003a) Development of GIS-based geological hazard information system and its application for landslide analysis in Korea. *Geosciences Journal*, v. 7, p. 243-252.
- Lee, S., Ryu, J., Lee, M. and Won, J. (2003b) Landslide susceptibility analysis using artificial neural network at Boun, Korea. *Environmental Geology*, v. 44, p. 820-833.
- Lee, S., Ryu, J., Min, K.D. and Won, J. (2003c) Landslide Susceptibility Analysis using GIS and Artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 27, p. 1361-1376.
- Lee, S., Ryu, J., Won, J., and Park, H. (2004a) Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, v. 71. p. 289-302.
- Lee, S., Choi, J.W., and Woo, I. (2004b) The effect of spatial resolution on the accuracy of landslide susceptibility mapping: a case study in Boun, Korea. *Geoscience Journal*, v. 8, p. 51-60.
- Lee, S., Choi, J.W. and Min, K.D. (2004c) Landslide Hazard Mapping using GIS and Remote Sensing Data at Boun, Korea. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, p. 2037-2052.
- Luzi, L. and Pergalani F. (1996) Applications of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1 : 50,000 Fabriano geological map sheet). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 15, p. 83-94.
- Luzi, L., Pergalani, F. and Terlien, M.T.J. (2000) Slope vul-

- nerability to earthquakes at subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems. *Engineering Geology*, v. 58, p. 313-336.
- Ohlmacher, G.C. and Davis, J.C. (2003) Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansa, USA. *Engineering Geology*, v. 69, p. 331-343.
- Parise, M. and Jibson, R.W. (2000) A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. *Engineering Geology*, v. 58, p. 251-270.
- Romeo, R. (2000) Seismically induced landslide displacements: a predictive model. *Engineering Geology*, v. 58, p. 337-351.
- Rowbotham, D. and Dudyca, D.N. (1998) GIS modeling of slope stability in Phewa Tal watershed, Nepal. *Geomorphology*, v. 26, p. 151-170.
- Shou, K.J. and Wang, C.F. (2003) Analysis of the Chifengershan landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan. *Engineering Geology*, v. 68, p. 237-250.
- Turner, K.A. and Schuster, R.L. (1996) Transportation research board, National research council, Landslides investigation and mitigation. Special report 247, p. 131-137.
- Wu S., S. L., Wang R., Tan, C., Hu, D., Mei, Y. and Xu, R. (2001) Zonation of the landslide hazards in the fore-reservoir region of the Three Goges Project on the Yangtze River. *Engineering Geology*, v. 59, p. 51-58.
- Zhou, G., Esaki, T., Mitani Y., Xie, M. and Mori, J. (2003) Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Engineering Geology*, v. 68, p. 373-386.
- Zhou, C.H., Lee, C.F., Li, J. and Xu, Z.W. (2002) On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, v. 43, p. 197-207.

2004년 7월 21일 원고접수, 2004년 9월 30일 게재승인.