

GIS와 원격탐사를 이용한 강릉지역 산사태 연구(I)- 산사태 발생 위치와 영향 인자와의 상관관계 분석

이명진¹ · 이사로^{2*} · 원종선¹

¹연세대학교 지구시스템학과, ²한국지질자원연구원 지질기반정보연구부 지질자원정보센터

Study on Landslide using GIS and Remote Sensing at the Kangneung Area (I) -Relationship Analysis between Landslide Location and Related Factors

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

¹Department of Earth System Science, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

The purpose of this study is to analyze the spatial relationship between the landslides occurred by typhoon, Rusa in 2002 and geospatial dataset. Landslide locations were detected using satellite image and field survey. Topography, soil, forest, geology and land use data sets were constructed as a spatial database in GIS. From the database, slope, aspect, curvature, water system, type of topography, texture, material, drainage, effective thickness of soil, type, age, diameter, density of wood, lithology, lineament of geology, land use and lineament were used as the landslide occurrence factors. Using a frequency ratio model, the spatial relationships between the landslides and the factors were extracted. The spatial relationships is helpful to explain the characteristics of the landslide, and to make landslide susceptibility map.

Key words : Typhoon Rusa, Spatial Database, Change Detection, Frequency Ratio, Kangneung

본 연구의 목적은 2002년 태풍 루사로 인해 강릉지역에서 발생한 산사태와 관련 요인들 간의 공간적 관계를 분석하는 것이다. 산사태 위치는 위성영상 및 현지조사를 실시하여 탐지하였다. 지형도, 토양도, 임상도, 지질도, 토지피복도 등을 GIS를 이용하여 공간 데이터베이스로 구축되었고, 이러한 데이터베이스로부터, 경사, 경사방향, 곡률, 수계, 지형종류, 토질, 토양모재, 토양배수, 유효토심, 임상종류, 임상경급, 임상영급, 임상밀도, 암상, 토지피복도, 선구조도 등이 산사태 발생요인으로 이용되었다. 빈도비 모델을 이용하여 산사태와 발생 요인 간의 공간적 관계를 추출하였다. 그 결과 인 공간적 상관관계는 2002년 루사로 인한 산사태의 특성을 설명하고, 산사태 취약성도를 작성하는데 이용될 수 있다.

주요어 : 태풍 루사, 공간 데이터베이스, 변화탐지, 빈도비, 강릉

1. 서 론

산사태로 인한 인명피해와 재산피해를 줄이고 예방하기 위하여 산사태의 과학적인 분석기술 개발이 필요한 실정이다. 그러나 산사태를 분석하기 위해 필요한 각종 공간정보를 현장조사를 통하여 획득하기 위해서는 많은 시간과 인력, 비용을 소비하여야 한다. 원격탐사를 활용하면 산이라는 지리적 특성에서 발생하는 현

장조사의 어려움을 줄일 수 있으며 넓은 지역에 대한 지표면의 형태적, 물리적 공간정보의 획득을 용이하게 할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 산사태 및 관련 요인 간의 상관관계를 정량적으로 분석하면 산사태를 예측하는데 기본 자료로 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2002년 태풍 루사에 의해 발생한 산사태 위치를 인공위성 영상을 사용하여 변화탐지(Change Detection)와 현상조사를 통해 파악하고, 이러한 산사

*Corresponding author: leesar@kigam.re.kr

태와 공간 데이터베이스의 상관관계를 분석하였다. 이러한 연구는 국내에서 용인, 장흥, 보은 지역에 대해서 연구가 진행되어 왔다(이사로, 2000; 이사로와 민경덕, 2000; Lee and Min 2001; Lee *et al.*, 2002a; Lee *et al.*, 2002b).

강릉지역은 지리적으로 태백산맥 동쪽에 위치하였으며 동해와 직접적으로 인접한 해안도시이다. 2002년 8월 20일에서 8월 31일이 사이에 태풍 루사에 의하여 집중호우와 강풍이 강릉을 비롯한 동해, 양양, 삼척, 고성 의 5개 지역에 막대한 영향을 주었다. 태풍 루사는 그동안 피해규모가 컸던 태풍들과 비슷한 규모와 강도를 갖고 있지만, 라미순 태풍 등에 의하여 이어져 오던 집중호우에 의하여 지반 등이 약해졌고, 침수피해가 복구되기도 전에 찾아와 피해규모가 커졌다. 특히

본 연구지역인 강릉지방에는 일일 강수량으로는 최고 기록인 609 mm의 폭우가 쏟아졌으며, 시간당 최고 80 mm를 기록하였다, 산사태의 잇단 발생으로 인하여 동해안 지역에서의 인명피해는 266명이었으며, 8조원의 재산피해가 발생하였다. 특히 산사태와 절개지 붕괴로 전체 인명피해 중 30%인 81명이 사망하고 부상자와 재산피해도 상당히 많았다(한겨레신문, 2002년 9월 7일자). 강원도청이 조사한 자료에 의하면 태풍루사에 의해 삼교리 지역에서 가장 많은 산사태가 발생하였고, 사기막리 지역은 그 다음으로 산사태가 많이 발생한 지역이다. 두 지역의 공통적인 특징은 산악지역으로 폭 2~3m 정도의 하천 옆에 있으며, 동쪽으로 지속적인 하천이 있으며, 소규모의 평지 논이 존재하는 지역이다(Fig. 1).

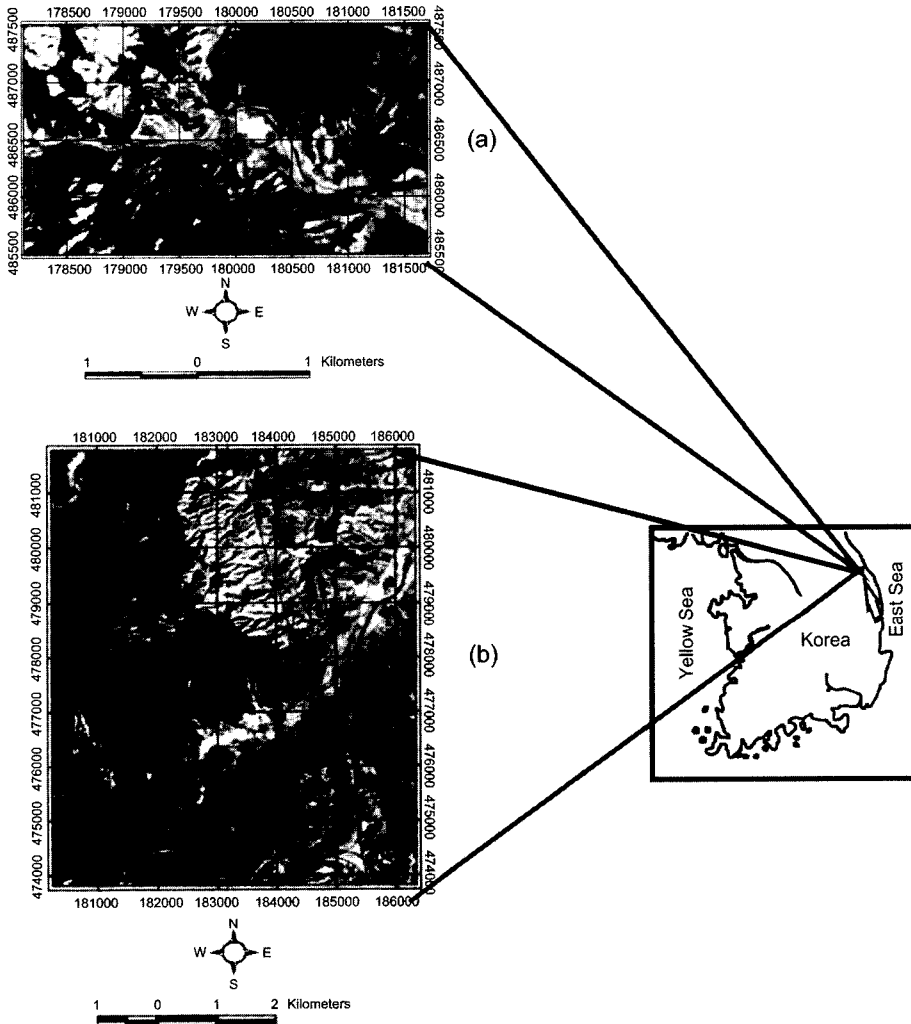


Fig. 1. The study areas and KOMSAT 1 images ((a) Samkyori landslide; (b) Sagimak landslide).

연구지역인 강원도 사천면 사기막리 지역에 대한 산사태 발생 이전의 영상인 2001년 12월 7일 아리랑1호(KOMPSAT EOC) 위성영상과 산사태 발생 이후인 2002년 12월 14일에 촬영한 영상을 사용하여 변화탐지를 실시하여 산사태 발생 위치를 파악하였으며 현장에서는 GPS를 이용하여 발생위치를 정밀하게 획득하였다. 이후 이것을 데이터베이스로 구축하였다. 그리고 산사태에 영향을 줄 수 있는 영향인자를 포함하는 1:5,000 정밀지형도, 1:25,000 정밀토양도, 1:25,000 임상도, 1:250,000 지질도를 GIS 프로그램을 활용하여 공간데이터베이스로 구축하였다. 토지피복도는 2000년 5월 8일 Landsat TM 영상을 이용하여 작성하였으며, 영상에서 추출한 선구조를 100m 간격의 버퍼링을 적용하여 데이터베이스로 구축하였다. 지질 요인의 경우는 암상을 지질도로부터 추출하여 암상도를 구축하였다. 지형 요인의 경우에는 지형도의 등고선을 이용하여, DEM을 생성하고, 고도, 경사, 경사방향, 곡률 등의 지형 분석을 실시하여 각각을 데이터베이스로 구축하였고, 수계를 추출한 후 100m로 버퍼링하여 데이터베이스로 구축하였다. 토양 요인의 경우 토양도에 있는 지형종류, 토질, 모재, 배수, 유효토심 등을 데이터베이스로 구축하였다. 임상의 경우에도 임상도에서 임상, 경급, 영급, 밀도 등을 데이터베이스로 구축하였다. 이러한 과정을 거쳐서 각각 구축된 데이터베이스는 5x5m 간격의 ARC/INFO GRID로 변환하였다. 그리고 변환된 자료를 이용하여 산사태와의 교차분석을 이용하여 상관관계를 구하였다.

2. 산사태 위치 파악

본 연구를 위해 연구지역인 강릉 지역의 산사태 분석에 필요한 관련 자료로서, 우선적으로 산사태 발생 위치를 파악하기 위하여 강원도청에서 실시한 태풍 루사 피해조사 자료를 분석하였다. 또한 산사태 발생 이전의 2001년 12월 7일과 2002년 12월 14일 아리랑1호 영상에서의 변화탐지를 실시하였다.

인공위성을 이용한 변화탐지는 다양한 시기에 촬영된 영상을 시간변화에 따른 픽셀 값의 변화를 강조하여 나타낼 수 있다. 이러한 정보는 데이터베이스화되어 지표 변화를 감시하는데 사용될 수 있다. 변화탐지를 위해서는 영상의 위치 보정이 가장 중요하다. 비교되는 2개의 영상 중 하나의 영상을 수치지형도 등을 사용하여 정밀한 기하보정을 실시하고, 다른 영상은 기하보정을 실시한 영상을 바탕으로 영상 대 영상(Image

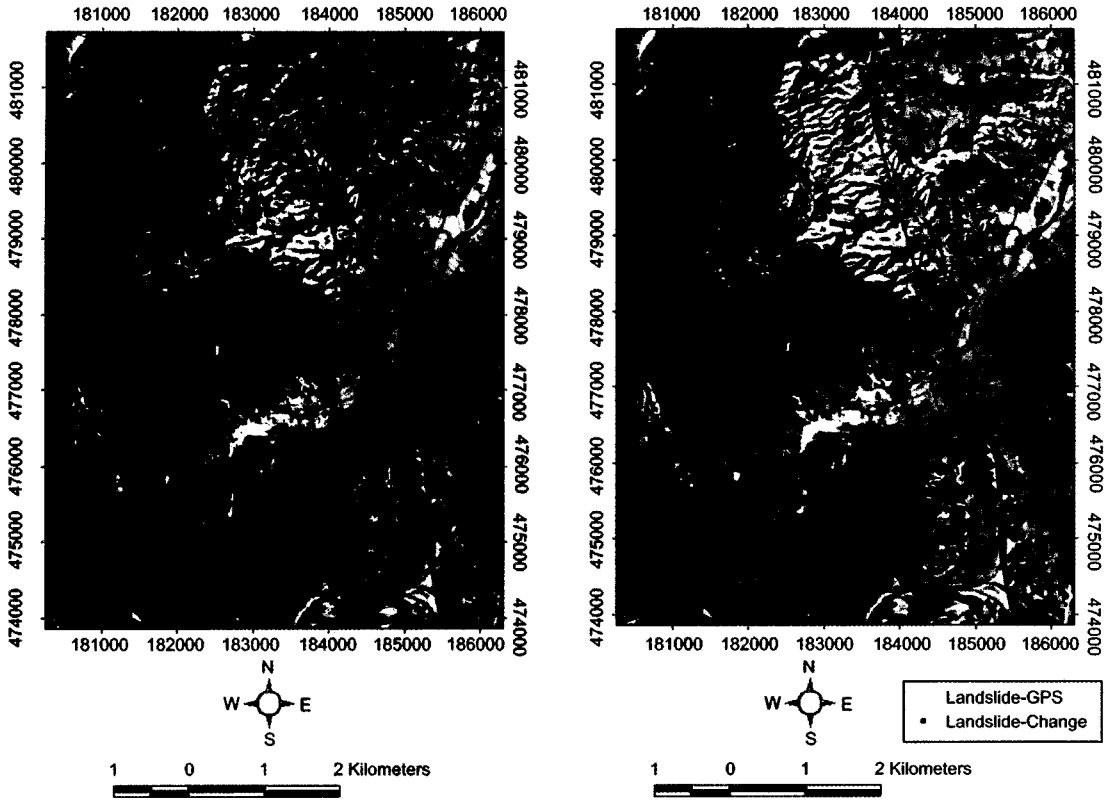
to Image) 보정 방법을 적용하였다. 가장 효율적인 비교를 위해서는 두 영상은 대기보정의 단계를 거쳐야 한다. 두 영상은 이상적으로는 같은 해 같은 시간에 찍은 영상이어야 한다. 왜냐하면 픽셀 값의 차이를 일으킬 수 있는 대기의 요인에 의해서 일어날 수 있기 때문이다. 만약 하나의 영상의 대기가 스모그나 안개 등에 의한 영향을 받은 영상이라면 그 영상의 픽셀 값은 그러한 영향을 받을 것이다. 이러한 방법 중에서 영상 촬영날짜에 대한 대기 상황의 자료 없이 사용가능한 방법이 영상기반 모델(Image-based Model)이다. 전체 자료에 대한 대기 효과는 동일하다는 가정 하에 이루어지는 영상기반 대기 보정 모델들은 흑체의 존재와 표면이 Lambertian면임을 가정하며, 위성의 고도, 태양각, 획득 시각 등의 자료와 영상내의 처리과정을 거쳐 대기보정이 수행된다. 변화 탐지 방법의 적용에 있어서 다른 전 처리는 히스토그램 매칭 방법이다. 맑은 지역과 안개 낀 지역의 반사 히스토그램이 같다는 가정에서 시작하는 것으로, 2개의 영상의 히스토그램을 이동하여 같은 형태를 나타내게 만든다. 이 방법은 매우 간단하고 사용하는데도 수월하다. 그러나 서로 다른 물체들의 상대적인 혼합체와 그들의 스펙트럼 반사도가 다르다면 이 방법의 주요 가정이 맞지 않게 된다. 또한 에어로졸의 공간분포가 극적으로 변화하게 되면 이 방법은 잘 맞지 않는다(Liang, 2001).

변화탐지 영상의 생성을 위한 간단한 방법에는 밴드 비율(Band Ratio), 주성분 분석(Principal Components Analysis), 적색/녹색 차이 영상(Red Green Difference Image) 등의 방법이 있다. 이러한 방법 중에 적색/녹색 차이 영상 방법은 많이 사용되는 기법이고 특히 변화된 지역을 직접적으로 볼 수 있다는 장점이 있으며, 픽셀 값이 감소하는 부분을 적색으로 증가하는 부분을 녹색으로 나타낸다. 만약 픽셀의 밝기에서의 증가나 감소가 중요하다면, 최근의 영상을 적색 층으로 사용하는 것이 좋다. 이 기법은 수확된 논 혹은 작물의 성장에서의 변화 같은 큰 변화가 예상되는 지역에 효과적이다. 본 연구에서는 이러한 적색/녹색 차이 영상을 사용하였으며, 산사태는 픽셀 값(DN)의 증가요인이 되기 때문에, 녹색 영상만이 나타나게 하여 사용하였다.

이러한 변화 탐지에 의하여 산사태 발생 지역으로 추정되는 곳과 지적도에 의거하여 산사태 피해와 복구 공사가 있었던 지역을 중첩하여 우선적으로 산사태가 많이 발생한 지역으로 선정하였다. 선정된 지역에 대한 현장조사를 실시하였다. 산사태 발생지역을 현지 답

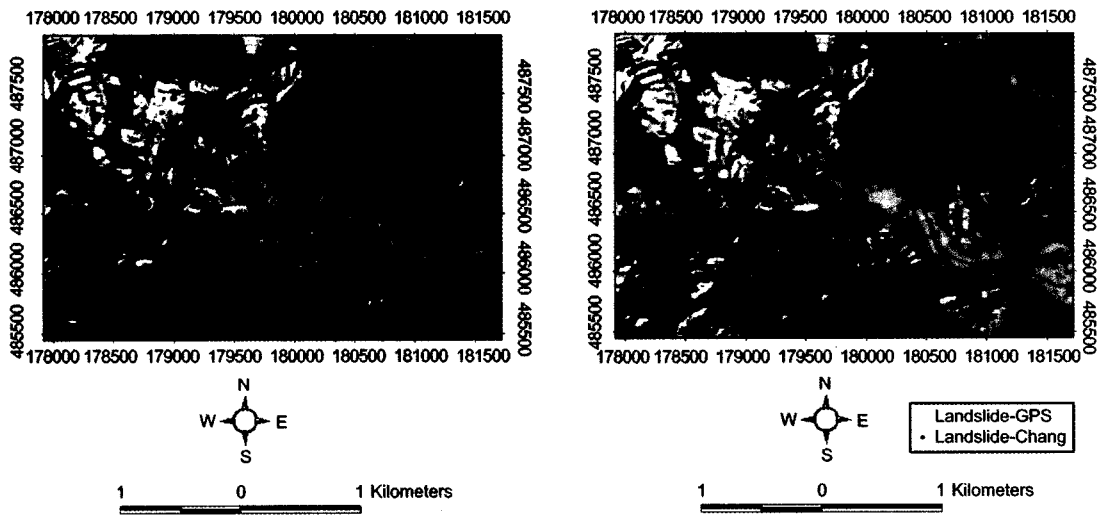
사하여 그 결과를 지도에 표시하는 방법이 가장 정확한 방법이다. 그러나 처음에 산사태 발생지역을 찾을 때 시간과 비용이 많이 들고, 또한 접근이 어려운 산

악 지역에서는 현지답사가 어렵거나 불가능하다. 그래서 도로 주변 및 접근 가능한 지역만 조사만 하는 경우가 있다. 또한 매핑에 있어서도 실제 측량을 하지



(a) Sagimak change detection

(b) Sagimak landslide



(c) Samkyori change detection

(d) Samkyori landslide

Fig. 2. Detection of Landslide.

않는 대략적인 지도상의 매핑은 정확도가 떨어진다. 이러한 단점을 극복하기 위해 GPS를 이용하고, 1:5,000 지형도와 비교함으로써 정확도와 정밀도를 높이려 하였다.

이러한 산사태 발생위치 파악은 강원도청에서 작성한 태풍 루사 피해조사 자료와 위성영상을 이용한 변화탐지 기법을 분석하여 일차적으로 탐지하였고, 탐지된 산사태 발생위치의 정확성을 판단하기 위하여 현지답사를 통한 GPS 측량을 수행하여 산사태 위치도를 작성하였다. 작성결과 산사태가 일어난 개소는 강릉 사기막리 지역의 경우에는 GPS측정에서는 337개소이었으며, 변화탐지에 의해서는 456개소이며, 삼교리 지역의 경우에는 GPS측정에 의해서는 115개소이며, 변화탐지에 의해서는 148개소이다(Fig. 2).

3. 공간 데이터베이스 구축

연구지역을 대상으로 한 데이터베이스 설계 및 구축은 GIS 프로그램인 ARC/INFO를 이용하였으며, ARC/INFO의 기본 자료 구성은 점, 선, 면으로 구분된다. GIS의 데이터베이스는 공간(위치)과 속성(주제) 두 가지 형태의 자료를 포함해야 한다. 본 연구에서 산사태 분석에 이용된 각각의 자료들은 Table 1과 같다. 좌표계는 우리나라 지형도에 활용되고 있는 TM (Tarnverse Mercator)의 지역좌표인 129도에 맞추어 사용하였으며, 타원체는 Bessel을 사용하였다.

지형자료로서는 1:5,000 수치지형도를 자료변환 후 내삽의 과정을 거쳐 수치표고모델(DEM)을 작성하였다. 이렇게 작성된 수치표고모델로부터 경사도, 경사방향도, 곡률도를 작성하였으며, 경사도는 지형의 기울기를 나타내며, 경사방향도는 지형사면의 경사방향을 나타낸다. 곡률도의 경우, 0을 기준으로 음의 값으로 갈수록 경사면의 형태가 오목한 것을 나타내며, 양의 값으로 갈수록

경사면의 형태가 볼록한 것을, 0은 경사면의 형태가 평탄한 것을 나타낸다. 1:5,000 수치지형도 수계만을 추출하여 수계도를 작성하였다. 수계도는 연구지역에서의 수계의 분포를 나타낸다. 토양자료로는 1:25,000 정밀 토양도로부터 지형종류도, 토질도, 토양 배수도, 토양 모재도, 유효토심도 등을 작성하였다. 지형은 토양이 분포한 지역의 지형에 의해 분류된 것이며, 토질은 토양 입자크기에 의하여, 모재는 토양이 어떤 암상으로부터 형성되었는가를, 배수는 물의 배수정도를, 유효토심은 토양의 유효두께를 각각 나타낸다. 또한 1:25,000 임상도로부터 임상 종류도, 임상 경급도, 임상 영급도, 임상밀도도 등을 구축하였다. 임상종류도는 나무의 종류를 나타내며, 임상 경급도는 나무의 지름을, 임상 영급도는 나무의 수령을, 임상 밀도도는 나무의 밀도를 각각 나타낸다. 지질자료는 1:250,000 지질도로부터 암상분포도를 구축하였으며, 기존의 지질도상의 단층자료와 Landsat TM 영상으로부터 선구조를 육안판독을 통해 추출하여 선구조도와 토지피복도를 추출하였다.

모든 자료의 공간해상도는 5×5m으로 구성되었으며, 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.

4. 산사태와 공간 데이터베이스와의 상관관계

강릉 지역을 대상으로 구축된 데이터베이스와 파악된 산사태 위치를 이용하여 산사태와 지형, 지질, 토양, 임상, 토지이용 등 산사태 발생에 관련되는 요소들과의 관계를 빈도비 방법을 이용하여 분석하였다. 빈도비를 이용한 상관관계 분석은 각 요인의 등급별 산사태 발생 면적 비율을 각 요인 등급이 전체 면적에서 차지하는 비율로 나눈 것으로써, 이 빈도비가 1이면 평균을

Table 1. Data layer 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
	Image Data	Landsat TM	GRID
Land Use		GRID	30m×30m
Kompsat Satellite Image		GRID	6m×6m

Table 2. Spatial relationship between landslide and related factors in Sagimakri area.

	Class	Domain (%)	Landslide(%)		Ratio	
			GPS survey	Change detection	GPS survey	Change detection
Slope	0~5	18	0	0	0.00	0.00
	6~10	11	1	0	0.06	0.04
	11~15	16	4	3	0.24	0.18
	16~20	19	14	11	0.72	0.56
	21~25	17	23	20	1.38	1.21
	26~30	11	29	34	2.53	3.03
	31~35	6	20	22	3.51	3.83
	36~40	2	6	6	2.86	3.06
	41~90	1	4	3	5.78	4.58
Aspect	Flat	4	0	0	0.00	0.00
	North	12	5	7	0.45	0.58
	Northeast	15	12	12	0.76	0.81
	East	16	17	17	1.06	1.08
	Southeast	13	10	11	0.76	0.83
	South	9	16	14	1.82	1.58
	Southwest	9	10	10	1.17	1.14
	West	11	17	17	1.55	1.57
	Northwest	12	14	13	1.16	1.06
Curvature	Concave	29	29	30	1.01	1.02
	Flat	41	27	28	0.66	0.69
	Convex	30	44	42	1.46	1.40
Distance from Drainage	Buffer(100m)	74	72	72	0.97	0.98
	Buffer(200m)	20	22	22	1.12	1.14
	Buffer(300m)	5	4	4	0.92	0.82
	Buffer(400m)	2	2	2	1.15	0.99
	Buffer(400m<)	0	0	0	0.00	0.00
Topographic Type	No data	2	1	0	0.26	0.19
	Lower hilly area	0	0	0	0.00	0.00
	Valley area	15	14	14	0.91	0.90
	Mountainous area	77	84	84	1.10	1.10
	Plains area	3	0	0	0.00	0.00
	Valley and alluvial fan	0	0	0	2.17	1.60
	Hilly and Mountainous area	0	0	0	0.00	1.10
	Vally and Piedmont area	1	1	1	0.82	0.76
	Lower hilly and Piedmont area	1	0	0	0.00	0.00
Soil Texture	Sandy loam	48	67	61	1.41	1.28
	Fine sandy loam	0	0	0	0.00	0.00
	Gravelly sandy loam	0	0	0	2.17	1.60
	Loam	2	0	1	0.16	0.48
	Silt loam	2	0	0	0.00	0.00
	Gravelly loam	1	1	1	0.82	0.76
	Overflow area	2	1	0	0.26	0.19
	Rocky sandy	33	27	31	0.82	0.94
	Rocky loam	12	3	5	0.28	0.45
	Gravelly sandy	0	0	0	0.00	0.00
Soil Drainage	No data	2	2	0	0.26	0.19
	Poorly drained	6	8	2	0.41	0.34
	Somewhat poorly drained	5	21	6	1.22	1.12
	Moderately well drained	1	1	1	0.22	0.66
	Well drained	10	21	7	0.62	0.70
	Excessively drained	76	284	84	1.11	1.11

Table 2. Continued.

	Class	Domain (%)	Landslide(%)		Ratio	
			GPS survey	Change detection	GPS survey	Change detection
Soil Material	No data	2	1	0	0.26	0.19
	Colluvium	2	1	1	0.66	0.59
	Valley alluvium	15	14	14	0.91	0.90
	Granite residuum	66	81	79	1.24	1.21
	Fluvial alluvium	3	0	0	0.00	0.00
	Pluton residuum	12	3	5	0.28	0.45
Soil Thickness	No data	2	1	0	0.26	0.19
	Poorly shallow	0	0	0	0.00	0.00
	Shallow	44	30	36	0.69	0.82
	Normal	51	68	62	1.32	1.21
	Deep	2	1	1	0.62	0.57
Forest Type	Non-forest	23	31	26	1.40	1.14
	Borad leaf tree	2	2	2	1.27	1.06
	Pine	54	52	55	0.96	1.03
	Cultivated	3	3	3	0.93	0.90
	Paper pulp	0	0	0	0.00	0.00
	Artificial pine	1	2	2	2.95	2.18
	Larch	4	3	4	0.74	0.90
	Korea nut pine	8	4	5	0.55	0.57
Forest Diameter	Artificial rigida pine	0	0	1	0.00	2.31
	Mixing tree	5	1	3	0.30	0.67
	Non-forest	26	34	29	1.34	1.11
	Very small diameter	14	10	12	0.76	0.87
	Small diameter	46	48	50	1.05	1.09
	Medium diameter	14	7	9	0.47	0.64
	Non-forest	26	34	29	1.34	1.11
	1st age	14	10	12	0.76	0.87
Forest Age	2nd age	31	39	40	1.26	1.30
	3rd age	16	9	10	0.60	0.66
	4th age	13	5	8	0.38	0.61
	5th age	1	2	1	1.60	1.18
	Non-forest	39	45	40	1.14	1.02
Forest Density	Loose	46	39	43	0.86	0.94
	Moderate	10	13	12	1.22	1.13
	Dense	5	3	5	0.72	1.07
Geology	Grainte	99	100	100	1.01	1.01
	Alluvium	1	0	0	0.00	0.00
Distance from Lin- eamment	Buffer(100m)	24	65	52	2.66	2.12
	Buffer(200m)	22	26	25	1.18	1.15
	Buffer(300m)	17	7	10	0.39	0.57
	Buffer(400m)	13	2	6	0.19	0.47
	Buffer(500m)	9	0	4	0.03	0.47
	Buffer(500m<)	15	0	3	0.00	0.21
Land Cover	No data	0	0	0	0.00	0.00
	Water	0	0	0	1.18	0.87
	Urban	2	2	4	2.55	2.10
	Forest	89	85	88	0.95	0.95
	Grass	2	2	1	0.75	0.55
	Rice field	6	7	6	1.23	1.07
	Barren	0	1	0	2.43	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(%)

Table 3. Spatial relationship between landslide and related factors in Samkyori area.

	Class	Domain (%)	Landslide(%)		Ratio	
			GPS survey	Change detection	GPS survey	Change detection
Slope	0~5	20	0	0	0.00	0.00
	6~10	11	0	0	0.00	0.00
	11~15	18	0	0	0.00	0.00
	16~20	20	2	1	0.09	0.07
	21~25	17	23	22	1.42	1.31
	26~30	9	39	40	4.23	4.31
	31~35	4	27	28	7.48	7.88
	36~40	1	6	7	5.71	6.33
	41~90	0	3	2	7.59	5.90
Aspect	Flat	5	0	0	0.00	0.00
	North	12	23	20	1.92	1.66
	Northeast	14	15	17	1.08	1.23
	East	14	14	18	0.99	1.30
	Southeast	13	9	8	0.69	0.64
	South	12	11	11	0.96	0.98
	Southwest	12	11	11	0.92	0.88
	West	9	11	10	1.23	1.10
Northwest	10	6	5	0.62	0.48	
Curvature	Concave	27	31	32	1.14	1.16
	Flat	44	30	30	0.67	0.69
	Convex	29	39	38	1.37	1.33
Distance from Drainage	Buffer(100m)	84	90	87	1.07	1.04
	Buffer(200m)	15	10	13	0.63	0.85
	Buffer(300m<)	1	0	0	0.00	0.00
Topographic Type	No data	22	27	26	1.23	1.20
	Lower hilly area	4	2	1	0.43	0.33
	Valley area	17	10	11	0.62	0.68
	Mountainous area,	45	59	59	1.31	1.30
	Plains area	3	0	0	0.00	0.00
	Valley and alluvial fan	0	0	0	0.00	0.00
	Hilly and Mountainous area	6	0	1	0.00	0.11
	Vally and Piedmont area,	1	2	1	2.02	1.57
Lower hilly and Piedmont area	2	0	0	0.00	0.00	
Soil Texture	No data	18	23	23	1.23	1.25
	Sandy loam	47	25	28	0.53	0.60
	Fine sandy loam	1	0	0	0.00	0.00
	Gravelly sandy loam	0	0	0	0.00	0.00
	Loam	7	2	2	0.26	0.30
	Silt loam	0	0	0	0.00	0.00
	Gravelly loam	1	2	1	2.02	1.57
	Overflow area	3	4	3	1.26	0.98
	Rocky sandy	22	44	42	2.04	1.93
Soil Drainage	No data	22	27	26	1.23	1.20
	Poorly drained	5	0	0	0.00	0.00
	Somewhat poorly drained	9	8	8	0.88	0.92
	Moderately well drained	3	0	1	0.00	0.20
	Well drained	10	6	5	0.60	0.54
	Excessively drained	51	59	59	1.15	1.16
Soil Material	No data	22	27	26	1.23	2.75
	Colluvium	3	2	1	0.58	1.02
	Valley alluvium	17	10	11	0.62	1.56
	Granite residuum	55	61	61	1.10	2.51
	Fluvial alluvium	3	0	0	0.00	0.00

Table 3. Continued.

	Class	Domain (%)	Landslide(%)		Ratio	
			GPS survey	Change detection	GPS survey	Change detection
Soil Thickness	No data	22	27	26	1.23	1.20
	Poorly shallow	1	0	0	0.00	0.00
	Shallow	22	44	42	2.04	1.93
	Normal	54	27	30	0.50	0.57
	Deep	2	2	1	0.86	0.67
Forest Type	Non-forest	27	17	13	0.61	0.48
	Pine	68	80	82	1.17	1.21
	Artificial borad leaf tree	1	0	0	0.00	0.00
	Cultivated	2	1	1	0.51	0.79
	Korea nut pine	1	3	2	2.78	2.16
	Mixing tree	1	0	1	0.00	1.11
Forest Diameter	Non-forest	29	17	14	0.61	0.49
	Very small diameter	2	3	2	1.33	1.03
	Small diameter	69	77	81	1.12	1.18
	Medium diameter	1	3	3	4.38	3.40
Forest Age	Non-forest	29	17	14	0.61	0.49
	1st age	2	3	2	1.33	1.03
	2nd age	62	59	68	0.95	1.09
	3rd age	6	17	14	2.68	2.08
	4th age	1	3	3	4.38	3.40
Forest Density	Non-forest	22	17	22	0.80	1.03
	Loose	39	57	55	1.46	1.42
	Moderate	9	6	7	0.68	0.75
	Dense	31	20	16	0.65	0.53
Geology	Grainte	100	100	100	1.00	1.00
	Alluvium	0	0	0	0.00	0.00
Distance from Lineament	Buffer(100m)	38	70	59	1.83	1.57
	Buffer(200m)	26	23	24	0.89	0.92
	Buffer(300m)	16	3	5	0.22	0.30
	Buffer(400m)	8	2	5	0.23	0.63
	Buffer(500m)	5	2	3	0.38	0.60
	Buffer(500m<)	8	0	4	0.00	0.52
Land Cover	No data	0	0	0	0.00	0.00
	Water	0	0	0	0.00	0.00
	Urban	2	2	1	0.83	0.65
	Forest	89	89	90	0.99	1.01
	Grass	3	8	6	2.38	1.85
	Rice field	5	2	2	0.33	0.39
	Barren	0	0	1	0.00	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(%)

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. 각 요인별 산사태와의 관계는 Table 2와 Table 3과 같다.

4.1. 산사태와 지형과의 관계

산사태와 지형, 즉 경사, 경사방향, 곡률과의 관계 (Table 2, Table 3)를 살펴보면, 경사의 경우, 사기마리 지역과 삼교리 지역에서의 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 각각의 경우 모두 경사각이 클수록 빈도비가 크게 나타난다. 빈도비를 보

면 5도 이하에서는 빈도비가 0으로 나타났으며, 41도 이상에는 빈도비가 가장 크게 나타났다. 빈도비가 경사에 따라 점진적으로 증가한다는 것은 산사태가 경사도에 의한 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다.

경사방향의 경우, 사기막리 지역과 삼교리 지역에서의 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 각각의 경우 사기막리 지역에는 남쪽과 서쪽, 삼교리 지역에서는 북쪽과 서쪽이 빈도비가 높게 나타났으며, 사기막리 지역에서는 북쪽과 북동쪽이, 삼교리 지역에서는 북서쪽과 남동쪽이 빈도비가 낮게 나타났다. 이러한 결과는 바람의 방향은 수시로 바뀌지만 바람에 방향을 동쪽을 기준으로 보았을 때 바람의 방향은 서쪽을 향하는 것을 알 수 있으며, 결과적으로는 서쪽을 포함하는 지역에 산사태가 많이 발생 확률이 높음을 예상할 수 있고, 연구결과와 일치함을 볼 수 있다.

곡률의 경우, 평지를 기준으로 음의 값으로 갈수록 경사면의 형태가 오목한 것을 나타내며, 양의 값으로 갈수록 경사면의 형태가 볼록한 것을 나타낸다. 사기막리 지역과 삼교리 지역에서의 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 각각의 경우 모두 음의 값보다는 양의 값에서 빈도비가 높은 것으로 나타났다. 특히 평탄한 곳은 4가지 경우 모두 1보다 작은 값을 나타냈으며, 이는 평탄한 것은 산사태 발생의 가능성이 매우 적다는 것을 의미한다.

산사태와 수계도의 관계는 사기막리 지역과 삼교리 지역에서는 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 각각의 경우 버퍼링에 상관없이 비슷한 값을 나타낸다. 이것은 연구지역 자체가 산간마을로서 주변에 많은 수계를 가지고 있으며, 수계의 영향이 산사태 발생에 전반적인 영향을 주고 있음을 나타낸다.

지형종류의 경우, 사기막리 지역과 삼교리지역의 경우 GPS 현장조사와 변화탐지에서 저 구릉지와 저 구릉 산록경사지의 경우에는 산사태 발생확률이 공통적으로 낮게 나타났으며, 사기막리 지역에서는 곡간 및 선상지의 빈도비가 2이상의 값을 나타내고, 삼교리에서는 곡간 및 산록경사지와 산악지가 빈도비 2정도의 값을 나타내고 있으므로 산사태 발생확률이 높은 것으로 나타났다. 이는 지형의 종류가 경사각과 관계가 있으므로 경사각에 영향을 받은 결과라고 할 수 있다.

4.2. 산사태와 토양과의 관계

산사태와 토양 관련 요인 즉, 지형, 토질, 배수, 모

재, 유효토심과의 관계(Table 2, Table 3)를 살펴보면 토질의 경우, 사기막리 지역의 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 자갈이 있는 사양토, 삼교리 지역의 GPS 현장조사와 변화탐지에서는 바위가 있는 사양토에서 빈도비가 2에 가까운 값들을 나타냈으며 나머지의 경우에는 빈도비가 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 토양 배수와 연관지어 생각할 수 있으며, 토양배수가 잘될수록 물을 흡수한 토양은 매질의 단위중량을 증가시켜 사면붕괴로 이어진다고 볼 수 있다.

토양배수의 경우, 배수가 잘 될수록 산사태 발생 확률이 높게 나타난다. 이러한 현상은 흙 입자의 크기가 클수록 입자와 입자사이의 공극이 크게 형성되고, 이 사이로 물이 침투하여 매질의 단위 중량을 증가시켜 결국 산면이 파괴되는 현상이 발생한다고 볼 수 있다. 하지만 연구지역의 경우에는 배수가 좋지 않은 경우에도 산사태가 발생하였다는 것은 짧은 시간에 내리는 집중호우 시에는 입자와 입자사이에 공극이 작아 물이 침투할 만한 시간적 여유가 없어 사면붕괴로 발전하지 않을 수 있지만, 태풍 루사에 의한 피해의 경우에는 수일간 물을 흡수한 토양은 계속되는 폭우로 인해 하부 지하수 수위증가 및 단위중량이 증가되어 결국 사면 붕괴로 이어진다고 볼 수 있다.

토양 모제의 경우, 사기막리 지역과 삼교리 지역의 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 두 지역 모두 화강암 잔적층의 빈도비가 가장 높게 나타났으며, 이것은 화강암이 풍화될 경우 풍화가 심부까지 뻗어 마사토화 되며, 마사토화 된 화강암은 그 배수 능력이 매우 양호하여 집중 호우시에 지하수위 증가 및 매질의 단위중량을 증가시켜 사면붕괴에 영향을 준다고 사료된다.

유효 토심의 경우, 사기막리 지역의 경우에는 GPS 현장조사와 변화탐지에 의한 산사태와의 비교 결과는 보통 깊이의 지역에서 빈도비가 1보다 높게 나타났으며, 삼교리 지역에서는 얇은 지역이 빈도비가 2보다 크게 나타났다.

4.3. 산사태와 임상과의 관계

산사태와 임상 관련 요인 즉, 임상, 영급, 경급, 밑도와의 관계(Table 2, Table 3)를 살펴보면, 임상의 경우에는, 사기막리 지역에서는 2가지 경우 모두에서 소나무 인공림의 빈도비가 2를 넘는 값을 나타냈으며, 삼교리의 경우에는 잣나무림에서 빈도비가 2를 넘는 값을 나타냈다. 칩엽수들은 뿌리가 얇고 빨리 자라지만

쉽게 죽고, 활엽수들은 성장이 느리지만 뿌리의 부착은 양호한 특징을 보인다. 이러한 차이는 산사태 발생에 영향을 주며, 실제 임상도에서의 산사태 발생 위치는 대부분 침엽수지역에 집중된다.

경급의 경우에는, 사기막리 경우에는 비 산림지역의 빈도비가 높게 발생됨을 알 수 있었다. 이는 산사태가 기존의 나무의 직경이 클수록 발생확률이 낮다는 것과 일치하는 것이다. 그러나 삼교리의 경우에는 중경목 지역에서 2가지 경우 모두 산사태가 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과를 이해하기 위하여 지형도로부터 추출한 DEM과 DEM으로부터 추출한 경사도를 중첩해 보았다. 그 결과 조경목과 치수는 낮은 고도인 평지에 분포하는 경우가 많았으며, 중경목의 경우에는 산지에 분포하고 있는 경우가 많았다. 결과적으로 경사도와 비교해 볼 때 중경목에서 산사태 발생 확률이 높게 나타날 수 있음을 확인 할 수 있었다.

영급의 경우, 사기막리 지역은 2가지의 방법에 대해 모두 5영급이 가장 높은 빈도비를 나타냈으며, 삼교리의 경우에도 4영급이 가장 높은 산사태 발생확률을 나타내었다. 이러한 경우는 영급이 작을수록 산사태가 많이 발생 할 것 이라는 가정과 반대되는 현상으로, 결과를 이해하기 위하여 지형도로부터 추출된 DEM과 DEM으로부터 추출한 경사도를 중첩시켜 보았다. 그 결과 1에서 3영급은 평지에 분포하고 있었으며, 산사태가 발생한 지역에는 4영급과 5영급이 분포하는 지역이었다.

밀도의 경우, 사기막리 경우에는 밀도가 중에 해당하는 지역에서 산사태 발생 확률이 높은 것으로 나타났다. 이것은 연구지역 자체에 밀도가 중간 정도인 지역이 많기 때문으로 생각되며, 삼교리의 경우에는 밀도가 낮은 지역에서 산사태 발생확률이 높은 것으로 나타났고, 이 결과는 나무의 밀도가 산사태 발생 확률과 관련성이 높다는 것을 증명한다.

4.4. 산사태와 지질과의 관계

산사태와 지질관련 요인, 즉 암상과 선구조부터의 거리와의 관계(Table 2, Table 3)를 살펴보면, 산사태와 암상의 경우 본 연구지역은 1:250,000의 지질도를 사용하기 때문에 지질의 구분이 세분화 되지 못하였다. 사기막리와 삼교리 지역의 GPS 현장조사와 변화탐지 조사에서 공통적으로 화강암 지역에서 거의 모든 산사태가 발생하였으며, 빈도비가 화강암에서 1에 해당하게 된다. 화강암은 풍화되면 배수능력이 매우 양호해서 집중 호우 시에 지하수위 증가 및 매질의 단위중량

을 증가시켜 사면 붕괴에 영향을 준다고 사료된다.

산사태와 선구조부터의 거리의 경우 사기막리 지역과 삼교리 지역의 GPS 현장조사와 변화탐지 조사에서 공통적으로 버퍼링이 100m인 지역에서 빈도비가 가장 높게 나타나고 있다. 이러한 결과는 산사태가 선구조의 대략 100 m 이내에 있음을 확인할 수 있다.

4.5. 산사태와 토지피복도와의 관계

산사태와 토지이용도의 관계(Table 2, Table 3)는 사기막리 지역의 경우는 GPS 현장조사와 변화탐지 조사에서 공통적으로 2이상의 빈도비를 나타내고 있는데 이것은 이 지역은 산사태가 발생하여 민가를 덮친 곳이 많은 지역으로 실제 산사태가 주택의 바로 뒤쪽에서 발생하였다. 그렇기 때문에 토지피복도를 만들면 산사태가 도시지역에서 발생한 것으로 인식된다. 삼교리의 경우에는 실제 산사태가 산속에서 많이 발생한 지역으로 도시에 대한 산사태 발생 확률이 낮으며, 산속의 작은 경작지 바로 위쪽이나 묘지의 상부 등에서 발생한 산사태가 많기에 목초지에서의 발생 확률이 높게 나타났다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 산사태 발생 관련 요인들에 대한 데이터베이스 구축을 하고, 이를 이용하여 빈도비 방법을 이용한 산사태와 관련 요인 간의 관계를 정량적으로 분석하였다. 산사태 발생 확률인 빈도비를 보면 경사에서는 사기막리 지역과 삼교리 지역 모두 31~35도의 경사도가 가장 높게 나타났으며 사면 방향의 경우에는 사기막리 지역에서는 남쪽이, 삼교리 지역에서는 북쪽이 가장 높게 나타났으며, 곡률의 경우에는 사기막리 지역과 삼교리 지역이 공통적으로 양의 값에서 빈도비 즉 산사태 발생 확률이 높게 나타났다. 지형종류의 경우에는 사기막리 지역과 삼교리 지역은 공통적으로 곡간지가 산사태 발생확률이 높았으며, 토양자료의 경우에도 사기막리 지역과 삼교리 지역이 공통적으로 배수가 잘될수록 산사태 발생 확률이 높게 나타났으며, 임상자료의 경우에서도 사기막리 지역과 삼교리 지역이 공통적으로 수종이 소나무나 잣나무일 경우 높게 나타났다. 또한 두 지역 모두 경급과 영급이 높을수록 산사태는 발생 확률이 높게 나타났다. 이는 식생이 산사태 발생에 밀접한 관련이 있지만, 그 분포 여하에 따라 결과는 반대로 나타날 수 있음을 보여준다. 밀도의 경우에는 두 지역 모두 값이 낮은 곳에서 산사

태가 많이 발생 하였고, 이 결과는 나무의 밀도가 산사태 발생 확률과 관련성이 높다는 것을 보여준다. 지질의 경우에는 사기막리 지역과 삼교리 지역 모두 배수 능력이 양호한 화강암에서 대부분의 산사태가 발생하였다. 선구조의 경우에는 사기막리 지역과 삼교리 지역 모두 버퍼링 100 m 이내의 지역에서 높은 산사태 발생 확률이 높게 나타났다. 토지피복도의 경우에는 사기막리 지역의 경우에는 도심으로 구분하는 지역에서 산사태 발생 확률이 높게 나타났는데, 그 이유는 사기막리 지역의 경우 산사태가 민가의 바로 뒤편에서 발생하여 민가를 덮친 경우가 많았기 때문이다. 삼교리 지역의 경우에는 목초지에서의 산사태 발생확률이 높게 나타났다. 수계추출도의 경우에는 사기막리 지역과 삼교리 지역에서 공동적으로 버퍼링 지역에 상관없는 산사태 위험 발생확률을 나타내는데, 이는 연구지역의 특성상 산간 마을이고 수변에 많은 수계를 가지고 있기 때문에 수계가 산사태 발생에 전반적인 영향을 주고 있는 것으로 사료된다.

본 연구를 통하여 산사태와 관련 요인 간의 관계를 파악할 수 있었으며, 연구의 결과가 보다 구체적으로 활용되기 위해서는 보다 많은 대상으로 산사태가 발생한 지역에 대한 사례분석이 이루어져야 하며, 이에 따른 결과가 향후 산사태 예측지의 판단을 위하여 데이터베이스화될 필요성이 있다. 또한 산사태 분석에 중요한 부분을 차지하는 정확한 산사태 발생 위치를 파악하는 기술도 선행되어 개발되어야 한다. 그러기 위해서는 넓은 지역과 접근이 용이 하지 못한 지역에서의 산사태 발생시에 이를 효과적으로 파악할 수 있는

원격탐사 기술의 개발이 필수적이며, 최근 제공되고 있는 고해상도 위성영상의 활용을 통하여 산사태 예측에 중요한 자료인 산사태 발생위치를 보다 정확하고, 정밀하게 구분할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 산사태 자료의 지속적인 수집 및 데이터베이스 구축과 관리 및 분석을 효율적으로 할 수 있는 GIS 기술을 활용하여야 한다. 본 연구에서의 상관관계 분석결과는 산사태 취약성도 작성에 기본 자료로 이용될 수 있다.

참고문헌

- 이사로 (2000) 지리정보시스템(GIS)을 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구. 연세대학교 박사 학위 논문, 163p.
- 이사로, 민경덕 (2000) 공간데이터베이스를 이용한 1991년 용인지역 산사태 분석. 자원환경지질, 33권, 4호, p. 321-332.
- Lee, S. and Min, K. (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, v. 40, p. 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*, v. 46, p. 49-162.
- Lee, S., Choi, J. and Min, K. (2002b) Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, v. 43, p. 120-131.
- Liang, S. (2001) Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, v. 76, p. 213-238

2004년 2월 25일 원고접수, 2004년 7월 1일 게재승인.