

# GIS 기법 및 발생자료 분석을 이용한 산사태 위험지도 작성

윤홍식<sup>1</sup> · 이동하<sup>2</sup> · 서용철<sup>3\*</sup>

## Preparation of Landslide Hazard Map Using the Analysis of Historical Data and GIS Method

Hong-Sik YUN<sup>1</sup> · Dong-Ha LEE<sup>2</sup> · Yong-Cheol SUH<sup>3\*</sup>

### 요 약

본 연구에서는 국내 산사태 발생이력 자료를 기반으로 GIS 기법을 적용하여 산사태 위험도 분석을 수행하였다. 이를 위해 한국도로공사에서 조사한 3년 동안의 총 596개 산사태 발생이력 자료와 산사태 발생요인 정보(기상정보, 지형정보, 토질정보)를 기초로 산사태 발생과 발생요인 간의 통계적 분석을 수행하여 상관관계를 산출하였다. 그 후 산출된 상관관계 토대로 총 6개의 래스터 레이어에 대한 가중치 및 위험도 인덱스를 도출하고, 최종적으로는 가중치를 적용한 래스터 계산 기법을 통해 산사태 위험지도를 작성하였다. 본 연구의 적용 결과 산사태 위험도 산출을 위해 GIS 기법을 적용할 경우, 산사태 위험지도 작성을 위한 다양한 발생요인의 통합과 분석을 보다 손쉽고, 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단되었다.

주요어 : 산사태 발생자료, 통계분석, 위험도 분석, 래스터 계산 기법, 산사태 위험지도

### ABSTRACT

In this study, we performed a GIS-based landslide hazard analysis by employing historical landslide data in Korea, coupling with geomorphological, geological, climatic and rainfall data. Based on 596 landslide data from 2001 to 2003, the correlations between landslide occurrence and various factors (elevation, slope angle, slope aspect, soil type and rainfall) that affect the occurrence were estimated by the statistical analysis, zonal statistics. The weights and hazard indices of 6 raster layers were derived from the estimated correlations in order to generate a landslide hazard map by applying raster calculation technique. As a result of this study, GIS technique can be used effectively to incorporate the landslide hazard contributions from various data sets simultaneously.

*KEYWORDS : Landslide Historical Data, Statistical Analysis, Hazard Analysis, Raster Calculation, Landslide Hazard Map*

2009년 11월 11일 접수 Received on November 11, 2009 / 2009년 12월 3일 수정 Revised on December 3, 2009 / 2009년 12월 11일 심사 완료 / Accepted on December 11, 2009

1 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사 Dept. Civil, Architectural and Environment System Engineering, Sungkyunkwan University

2 성균관대학교 공과대학 겸임교수 College of Engineering, Sungkyunkwan University

3 부경대학교 위성정보공학과 교수 Dept. of Geoinformatics Engineering, Pukyung National University

\* 연락처자 E-mail : suh@pknu.ac.kr

## 서론

산사태는 낙석, 암석슬라이드, 토석류, 지면슬립(soil slip), 암석사태, 이류(mudflow) 등의 다양한 형태로 발생하며, 이러한 산사태 중 일부는 1920년 지진에 의해 발생하여 200,000명의 인명피해를 유발한 중국 감숙성의 황토류(loess flow)와 같이 대규모의 참사를 발생시키기도 한다. 보다 최근인 1962년에는 페루의 네바도스 산에서 지진에 의한 산사태가 발생하여 4,000여명의 막대한 사망자가 발생하기도 하였다(Hansen, 1984). 또한 국토의 70%가 산지인 우리나라에서는 산사태로 인한 인명 및 재산피해가 현재까지도 끊임없이 발생하고 있는 추세로서, 소방방재청(2006)에 의하면 1993년 이후 15년 동안 통계에 따르면 사면붕괴로만 인해 약 300명 이상이 사망한 것으로 알려져 있다. 특히 2002년 태풍 루사 발생 시 사망·실종 1,232명 및 약 5조 8,000억 원의 재산 피해가 발생하였으며, 2003년 태풍 매미 시에는 사망·실종 1,157명 및 약 4조 6,000억 원의 재산 피해, 2006년 태풍 에위니아 시에는 사망·실종 849명 및 약 1조 8,000억 원의 재산 피해 등이 발생하여, 통계적으로 최근 10년간 우리나라에서는 산사태로 매년 연평균 22명의 인명과 156억 원의 재산피해가 발생한 것으로 알려져 있다(조남춘 등, 2006).

실제로 산사태의 경우 상기의 사례들과 같이 태풍, 지진 등과 같은 강력한 기상 및 지구물리적 현상에 동반하여 발생하는 만큼 규모로 광범위하게 발생하며, 이러한 이유로 인해 산사태의 발생 자체를 억제하는 것은 매우 어려운 일이다(Chau 등, 2004). 따라서 산사태로 인한 인명 및 재산피해를 방재할 수 있는 최선의 방법은 급경사지 주변에 마을이나 도시를 위치시키지 않는 것이지만, 이는 인구의 급격한 증가 및 도시 재건축에 따르는 막대한 비용 등의 이유로 인하여 실현이 불가능하다(Chau 등, 2004). 따라서 최근 들어 좀 더 지

역적이고 국소적인 산사태 위험도 분석 및 관리가 도시 계획에 있어서 중요한 사항으로 대두되고 있다. 일반적으로 도시 등에 대한 지역적인 산사태 위험도 분석은 그 지역 주변의 산악 지역의 분포 및 형상을 기초로 하여 수행되며, 이로 인해 위험도 분석 결과는 위험지도(hazard map)의 형태를 필수적으로 나타내게 된다. 또한 지역적으로 작성된 산사태 위험지도는 그 지역에 대한 산사태 위험을 계산, 관리 및 경감시키는데 매우 유용하게 활용될 수 있다(Anbalagan 등, 1993; Kienholz, 1978, PIARC, 1997).

가장 이상적인 형태의 산사태 위험지도의 작성은 다양한 산사태 유발원인에 대한 지형학적, 공학적 분석 및 과거의 산사태 발생이력 분석을 통해 산출된 적절한 가중치를 이용하는 것이다. 결국 산사태 위험도 분석의 주요한 부분은 크게 지형학적, 공학적 및 발생이력 분석으로 정의될 수 있으며, 이러한 각각의 분석을 위해서는 실제 산사태 발생자료, 지질학적 자료 및 시뮬레이션 자료 등이 포함된 대용량의 관련 자료의 운영 및 해석이 수행되어야 한다. 또한 대규모 자료를 다루는 각 분석의 특성 상 컴퓨터를 이용한 적절한 정보처리 기술(information technology)을 필수적으로 활용해야 할 필요가 있다. 따라서 이러한 산사태 위험도 분석을 위해서 1980년대 중반부터 GIS(geographical information system) 기법이 활발하게 이용되고 있다(Carrara 등, 1999; 이진덕 등, 2002).

본 연구의 주요 목적은 국내 산사태 발생자료를 기반으로 GIS 기법을 적용하여 우리나라의 산사태 위험도 분석을 수행하는 것에 있다. 이를 위해 한국도로공사에서 조사한 고속도로 주변의 총 3년 동안의 산사태 발생이력 자료를 기초로 산사태 발생과 관련된 다양한 발생요인(기상정보, 지형정보, 토질정보)을 속성자료로 구축하여 활용하였다. 그 후 구축된 자료를 통해 GIS 기반의 산사태 위험지도를 효율

적으로 작성하기 위하여 산사태 발생 및 발생요인에 대한 통계적 분석을 수행하였으며, 이를 통해 산사태 발생과 밀접한 연관을 가지는 강수량, 토질 및 지형정보(표고, 경사각, 경사방향)와 산사태 발생 간의 상관관계를 도출하였다. 또한 도출된 상관관계에 다중회귀분석을 적용하여 각 발생요인이 산사태 발생에 미치는 영향을 가중치 및 위험도 인덱스의 형태로 추정하였다. 최종적으로는 추정된 위험도 인덱스를 토대로 각 자료별 래스터 레이어를 산출하고, 가중치를 도입한 래스터 계산(raster calculation) 기법을 적용하여 우리나라의 산사태 위험도를 분석한 산사태 위험지도를 작성하였다.

## 산사태 관련 자료를 이용한 통계 분석

본 연구에서는 산사태 발생이력 자료, 강우자료 및 지형 정보 등을 이용하여 지역별 산사태 위험지도를 작성하기 위하여 2001년부터 2003년까지 총 3년 동안에 걸쳐 한국도로공사에서 조사한 고속도로 주변의 산사태 발생이력 자료(그림 1)를 이용하였으며, 그 후 산사태 발생 시점과 일치하는 강우량 자료를 기상청에서 획득하여 DB(database)화 하였다. 또한 산사태 발생에 대한 발생요인 중 사면의 기하학적 구조에 관련된 자료로서 환경부에서 1:50,000 수치지형도를 기반으로 제작한 30m 해상도의 DEM을 이용하여 계산된 산사태 발생 지점의 경사도, 경사향, 표고값을 DB화 하였다. 이와 더불어 산사태 발생의 주요한 요인으로 간주되는 토질정보를 정밀토질조사를 통해서 제작된 1:25,000 정밀토양도에서 취득하여 DB화 하였다. 그 후 구축된 산사태 자료를 이용하여 GIS 기법을 적용한 산사태 위험지도 작성을 수행하였으며, 산사태 자료의 DB 구축 및 위험지도 제작을 위해서 미국 ESRI 사의 ArcView 3.2 소프트웨어를 모든 과정에 이용하였다.

## 1. 산사태 발생정보

산사태 자료를 GIS 기법을 통해 다루기 위해서는 먼저 정확하게 조사된 산사태 발생지점을 지도상에 형상정보로서 표현하고, 이를 기준으로 발생 피해량, 각 발생지점의 경사도, 경사향 및 표고, 그리고 발생지점의 토질 등으로 대변되는 산사태 유발요인을 속성정보로 구축하여야 한다.

산사태 발생현황 자료는 한국도로공사에 의해서 제공된 것으로 2001년부터 2003년까지 총 3년간의 고속도로 주변에서 발생한 산사태를 직접 현장 조사한 자료이다. 산사태 발생지점의 위치는 고속도로 기점에서부터의 0.1km 단위의 거리로 표현되고 있으며, 산사태 발생유형은 다음의 총 10 가지로 구분하여 조사되었다(표 1 및 그림 1).

TABLE 1. 산사태 발생유형별 Index Number

피해내용	Index No.	피해내용	Index No.
법면유실	1	그린네트설치	6
구조물파괴	2	도로파괴	7
토사유입	3	낙석	8
인장파괴	4	파괴	9
침수	5	기타	10

각 년도 별로 산사태 발생현황을 분석한 결과, 2001년도에는 총 94건의 산사태가 발생하였으며, 발생유형은 법면유실이 총 76건으로 약 80%를 차지하였으며, 구조물 파괴가 9건으로 약 10% 정도를 나타내었다. 그 외 침수와 도로파괴, 낙석 토사유입 등이 소량 발생하였으며, 인장파괴, 그린네트 설치, 파괴 등은 발생하지 않은 것으로 나타났다. 또한 이러한 노선별 산사태 발생 현황을 행정구역 별로 정리해 보면 경기도 및 경상남도에서 17, 16건이 각각 발생하여 전체 발생 수에 대하여 각각 18% 정도의 발생률을 보이고 있었으며, 충청남도, 경상북도 및 전라도에서도 각각 14건과 13건 등으로 상대적으로 높은 산사태 발생 수를 보였다. 전체적으로 대도시 지역에서 산사태 발생건수가 비교적 낮게 나타났으며, 강원

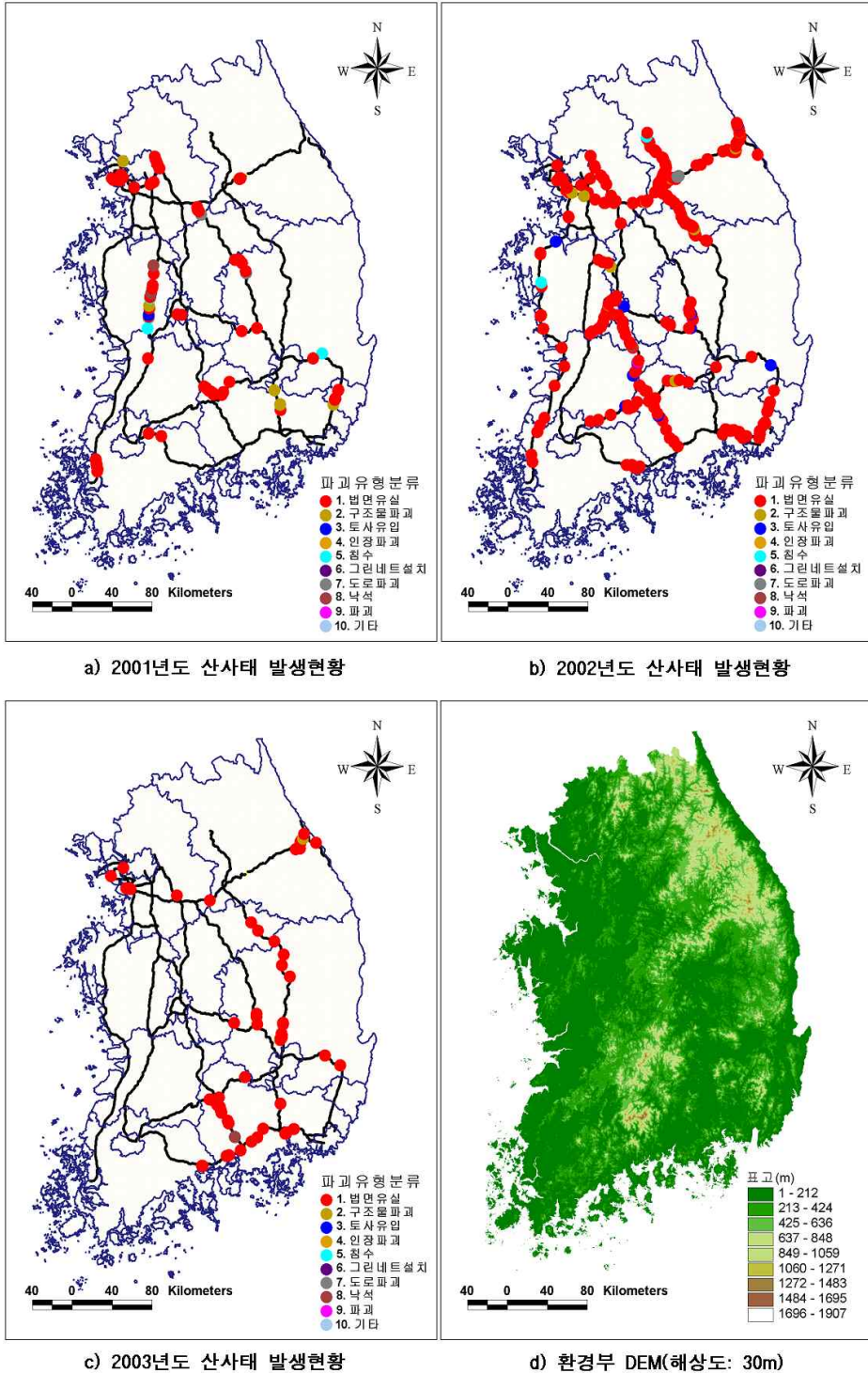


FIGURE 1. 연구에 활용된 산사태 발생 자료 및 DEM

도, 전라북도, 충청북도에서 아주 작은 수의 산사태가 발생한 것으로 나타났다. 특히 부산광역시와 대구광역시, 광주광역시에서는 산사태가 한 건도 일어나지 않았음을 알 수 있으며, 산지가 많은 강원도에서는 산사태가 3건 정도밖에 발생하지 않은 것으로 나타났다.

2002년도의 경우에는 총 430건의 산사태가 발생하여, 2001년과 2003년에 비하여 상대적으로 많은 산사태가 발생한 것으로 분석되었다. 발생유형으로는 법면유실이 총 393건으로 약 91%를 차지하였으며, 구조물 파괴가 15건으로 약 3% 정도로 나타났다. 그 외 침수와 도로파괴, 낙석 토사유입, 파괴 등이 역시 소량 발생하였으며, 인장파괴, 그린네트 설치 등은 발생하지 않았다. 또한 행정구역별 발생 현황은 강원도에서 164건이 발생하여 전체 발생 수에 대하여 40% 정도의 발생률을 보이고 있었으며, 이는 2002년도에 강원도에 산사태가 특히 많이 발생했음을 나타내고 있다. 또한 경상남도, 충청북도 및 경기도에서도 각각 61건과 44건, 41건 등으로 다른 행정구역과 비교하여 상대적으로 높은 산사태 발생 빈도를 보였다. 전체적으로 대전광역시를 제외한 대부분의 대도시 지역에서 3건 이하의 비교적 낮은 산사태

발생건수를 나타냈으며, 도별로는 경상북도, 전라도에서 아주 작은 수의 산사태가 발생했음을 알 수 있다. 특히, 광주광역시와 대구광역시에서는 산사태가 거의 일어나지 않았음을 알 수 있었다. 이러한 지역별 발생빈도와 그 격차는 2002년 발생하여 강원도 지역에 막대한 산사태 피해를 유발시킨 태풍 루사(RUSA)의 이동경로와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다.

2003년도의 경우에는 총 72건의 산사태가 발생하여, 2001년과 2002년에 비하여 상대적으로 적은 산사태가 발생한 것으로 나타났으며, 발생유형은 법면유실이 총 69건으로 약 96%를 대부분을 차지하였다. 행정구역별 발생현황은 경상남도과 경상북도에서 각각 24, 23건이 발생하여 전체 발생 수에 대하여 65% 정도의 발생률을 나타내었으며, 강원도에서는 총 13건이 발생한 것으로 나타났다. 전체적으로는 인천광역시에서 단 1건의 산사태가 발생한 경우를 제외하고 대부분의 대도시 지역에서 산사태가 발생하지 않았으며, 도별로는 전라남도과 충청북도에서 2건으로 두 지역에서는 산사태가 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다.

TABLE 2. 연도별/유형별/행정구역별 산사태 발생현황 (한국도로공사, 2004)

행정구역	2001년도										2002년도										2003년도										총계			
	발생유형별 산사태 발생수										조	발생유형별 산사태 발생수										조	발생유형별 산사태 발생수										조	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8		9		10
서울특별시	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	5	
부산광역시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	2	
인천광역시	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1	10	
대구광역시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1	
울산광역시	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	8	
광주광역시	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	
대전광역시	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	14	1	2	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	19	
강원도	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	3	155	6	1	-	1	-	2	-	-	-	164	12	1	-	-	-	-	-	-	-	13	180	
경기도	18	1	-	-	-	-	-	-	-	-	17	99	2	-	-	-	-	-	-	-	-	41	7	-	-	-	-	-	-	-	-	7	65	
경상남도	11	5	-	-	-	-	-	-	-	-	16	58	2	1	-	-	-	-	-	-	-	61	22	-	-	-	-	-	-	1	-	23	100	
경상북도	11	-	-	-	1	-	1	-	-	-	13	15	-	8	-	-	-	-	-	-	-	19	23	1	-	-	-	-	-	-	-	24	55	
전라남도	18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	27	
전라북도	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	26	-	4	-	-	-	-	-	1	1	32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	33	
충청남도	7	1	1	-	3	-	-	2	-	-	14	27	-	1	-	1	-	-	-	-	-	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	43	
충청북도	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	2	41	3	-	-	-	-	-	-	-	-	44	2	-	-	-	-	-	-	-	-	2	45	
합계	77	8	1	0	4	0	2	2	0	0	94	399	13	12	0	2	0	2	1	1	0	430	69	2	0	0	0	0	0	1	0	0	72	595

## 2. 산사태 관련 지형정보

산사태 유발에 관계된 지형정보는 산사태가 발생하는 사면의 기하학적 구조로 정의될 수 있으며, 이는 산사태 발생에 있어 매우 밀접한 발생요인으로 알려져 있다(Chau 등, 2004). 이러한 사면의 기하학적 구조를 나타내는 여러 인자 중 산사태와 발생과 가장 밀접한 인자는 사면의 표고, 경사각, 경사방향으로 본 연구에서는 30m 해상도의 환경부 DEM 자료를 이용하여 산사태 발생지점 별 표고, 경사각 및 경사방향을 속성자료로 입력하였다.

사면의 경사도와 경사향은 ArcView 소프트웨어에 구현되어 있는 표준 알고리즘을 이용한 유한차분(finite difference)을 통해 계산되었으며(Burrough 등, 1998), DEM 상 임의의 격자점에서의 수평면과 근방 8점에서 계산되는 근사평면으로 이루어지는 각을 이용하여 계산된다. 경사도는 지표면의 기울어진 정도를 파악하는데 이용되는 지표로서 토지의 이용에 있어 매우 중요한 요소이다. 실제로 지표면의 경사도가 낮을수록 토지의 이용성을 다양화하는 것이 가능하다. 한 지점의 경사각은 0부터 90도의 값으로 나타내거나 거리의 차이에 대한 표고차이의 비율(%)로 나타낼 수 있다. 경사방향은 DEM의 위쪽에 해당하는 정북 방향과 구한 평면의 법선 벡터를 수평면에 투영한 벡터와의 각을 뜻하며, 0° ~ 360°의 값을 갖는다.

사면의 기하학적 구조를 나타내는 표고, 경사각, 경사방향 정보를 기존에 산사태가 발생한 지점의 정확한 위치에 입력한다면, 사면의 기하학적 구조에 관련된 요인이 실제의 산사태와 어떠한 상관관계를 가지고 있는지에 대한 통계적 분석이 가능하다. 본 연구에서는 산사태 발생과 사면의 기하학적 구조 간의 상관관계만을 분석하기 위하여 산사태 발생유형은 고려하지 않았으며, 산사태 발생수의 총량만을 이용하여 상관관계를 도출하였다.

TABLE 3. 산사태 발생지점별 표고값

표고분포(m)	2001년	2002년	2003년	총 계
1~100	70	230	43	343
100~200	10	85	15	110
200~300	11	46	8	65
300~400	3	28	3	34
400~500	-	18	1	19
500~600	-	9	1	10
600~700	-	7	1	8
700~800	-	7	-	7
800~900	-	-	-	0
900~1000	-	-	-	0
합 계	94	430	72	596

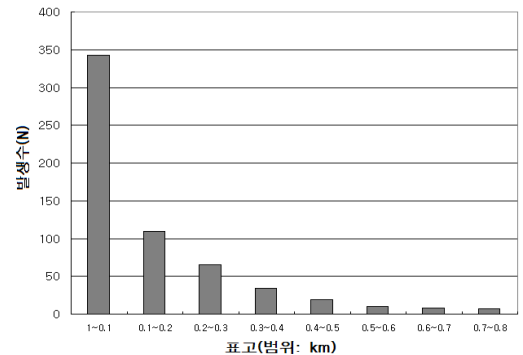


FIGURE 2. 표고별 산사태 발생빈도 분석 (2001~2003년)

TABLE 4. 산사태 발생지점별 경사각

경사각(Deg.)	2001년	2002년	2003년	총 계
0~5	-	1	-	1
5~10	2	13	4	19
10~15	11	84	18	113
15~20	53	148	19	220
20~25	20	131	26	177
25~30	8	37	3	48
30~35	-	6	-	6
35~40	-	10	-	10
40~45	-	-	2	2
45~50	-	-	-	0
합 계	94	430	72	596

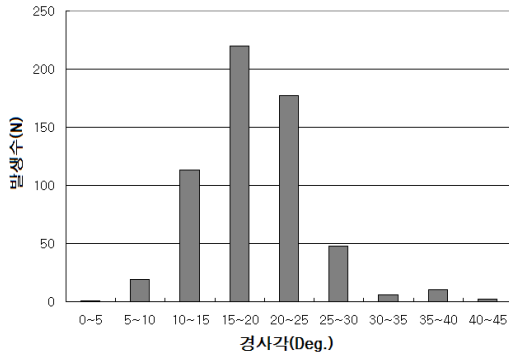


FIGURE 3. 경사각별 산사태 발생빈도 분석 (2001~2003년)

TABLE 5. 산사태 발생지점별 경사방향

경사방향(Deg.)	2001년	2002년	2003년	총 계
Flat (F)	3	1	-	4
North (N)	15	50	7	72
Northeast (NE)	18	58	11	87
East (E)	19	67	11	97
Southeast (SE)	10	57	16	83
South (S)	6	41	6	53
Southwest (SW)	9	45	2	56
West (W)	7	62	12	81
Northwest (NW)	7	49	7	63
합 계	94	430	72	596

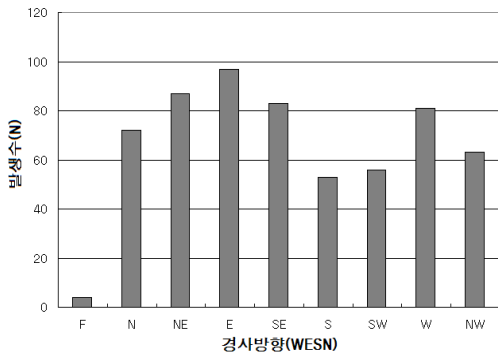


FIGURE 4. 경사방향별 산사태 발생빈도 분석 (2001~2003년)

표 3~5는 산사태 발생지점에 대한 사면의 기하학적 구조를 정리한 것이며, 그림 2~4는 사면의 기하학적 구조와 산사태 발생과의 상관관계를 도출하기 위하여 표고, 경사각, 경사방향에 대한 산사태 발생빈도를 각각 분석한 것이다. 표고와 산사태의 상관관계를 분석한 결과 표고값의 증가에 따라 산사태 발생수가 감소하는 양상을 보이고 있었으며, 경사각의 경우 가장 발생빈도가 높은 경사각 15° ~ 20°를 기준으로 좌우로 점차 발생수가 감소하는 종모양의 형태를 나타내는 것으로 분석되었다. 하지만 경사방향의 경우 발생수와 특별한 상관관계를 나타내지는 않았으며, 전체적으로 북쪽 방향(N, NE, NW)에 위치한 사면에서 산사태 발생수가 나머지 방향의 발생수보다 다소 적은 경향만을 나타내었다.

### 3. 산사태 관련 기상정보

강수량은 산사태의 발생에 있어 사면의 기하학적 구조와 더불어 가장 밀접한 발생요인으로서, 정확한 산사태 위험지도 구축을 위해서는 실제 산사태 발생자료를 기준으로 그 상관관계를 분석할 필요가 있다(조명희 등, 2009). 본 연구에서는 실제 산사태 발생 당시의 강수량을 직접 획득하였으나, 이는 단순히 발생지점에 대한 자료로서 각 지점별 강수량 변동이 오차로 작용하여 강수량과 산사태의 통계적인 상관관계의 도출에는 적합하지 못한 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 강수량에 의한 상관관계 도출 시 지점별 관측오차로 인한 비정상적인 효과(abnormal effect)를 제거하기 위하여 기상청에서 제공하는 월별 평균강수량 및 평균기온 자료를 추가로 획득하였으며, 이를 통해 월별 평균강수량 및 평균기온에 따른 산사태 발생빈도를 분석하고 그 상관관계를 분석하였다.

그림 5는 월별 평균강수량 및 평균기온의 변동과 이에 따른 산사태 발생수를 함께 표현

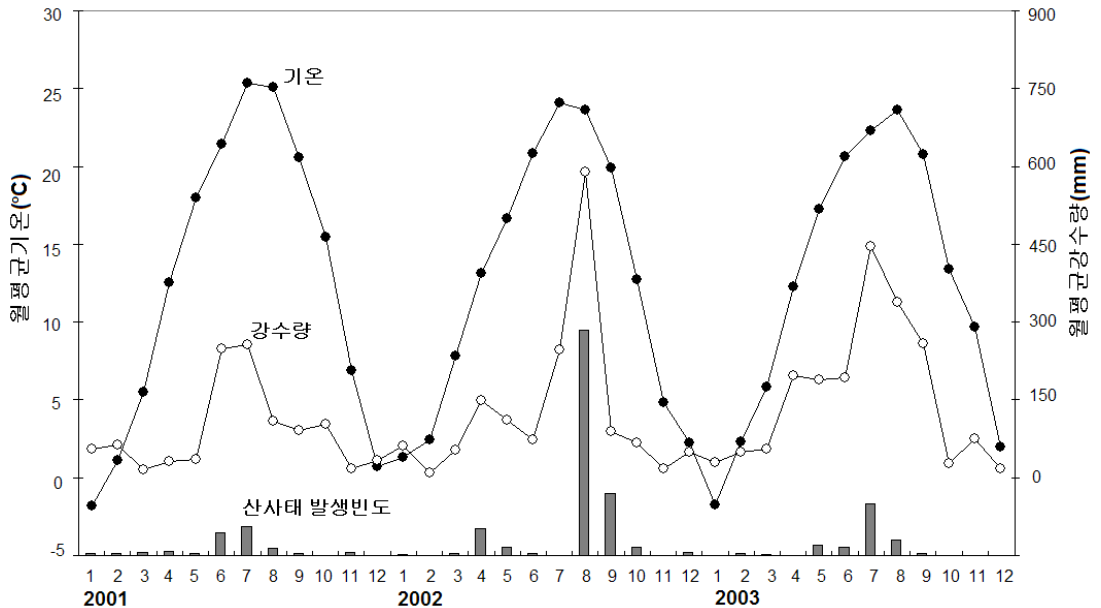


FIGURE 5. 월별 평균강수량 및 평균기온에 대한 산사태 발생빈도 분석

한 것으로 이를 분석한 결과 산사태 발생이 강수량과 기온에 매우 명확한 상관관계를 가지는 것을 알 수 있었다.

실제로 대부분의 산사태 발생은 강수량이 집중되는 7월~8월 사이에 발생하였으며, 이 시기 대부분의 평균강수량이 200mm 이상의 값을 나타내었다. 또한 가장 많은 강수량을 보인 2002년 8월에 가장 많은 산사태가 발생하였음을 알 수 있었다. 대부분의 산사태가 평균강수량 100mm 이상을 나타내는 시기에 발생하였으며, 300mm 이상의 높은 평균강수량에서의 산사태는 전체의 약 45%정도를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 산사태 관련 토질정보

산사태가 발생한 지점의 토질 역시 산사태의 발생에 있어 밀접한 발생요인이 된다. 본 연구에서는 산사태 발생과 발생지점의 토질과의 상관관계를 분석하기 위하여, 전국에 대하여 제작된 1:25,000 정밀토양도를 산사태 발생지점과 중첩하여 산사태 발생지점 별 토질을

속성자료로서 획득하였다.

사용된 정밀토양도는 정밀토양조사에 의하여 1998년에 제작되었으며, 정밀토질조사는 일반적으로 소지역 즉, 군 단위 정도의 범위에 대한 농장설계 및 영농설계 등에 사용하고자 실시하는 조사이다. 정밀토양도에서 토질의 분류단위는 세부정밀토양도와 같이 토양통, 작도 단위는 토양구와 토양상이며, 토질을 표기하는 최소면적이 1.56ha로서 이를 통해 산사태 발생과 토질 간의 상관관계를 정밀하게 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

각 년도별 산사태 발생지점에 대하여 획득된 토질정보를 정리한 결과는 다음의 TABLE 6과 같으며, 총 20개의 대표적인 토질 종류를 확인할 수 있었다. 특히 SgE2 토질에서는 총 209건의 산사태가 발생하였는데, SgE2 토질은 토양통명으로 삼각이며, 삼각통은 사양질계 암쇄토로서 미농무성의 분류방법에 의하면 'Coarse Loamy, Mesic Family of Typic Distochrepts'에 속한다. 이러한 토양의 표토는 갈색의 사양토이고 심토는 진갈색이나 황갈색의 사양토이며 기층은 매우 두꺼운 갈황



TABLE 6. 산사태 발생지점별 토질정보

토질	2001년	2002년	2003년	총계	토질	2001년	2002년	2003년	총계
ArC	6	16	3	25	MqE2	2	24	1	27
BeC	3	7	0	10	Ng	0	2	3	5
CaE2	4	18	5	27	OnD2	3	40	3	46
De	5	12	8	25	PaD	2	7	4	13
EgB	1	5	2	8	RCS	1	6	2	9
Gy	2	19	5	26	SgE2	21	169	19	209
Hd	8	15	2	25	TaE2	0	2	0	2
ImC	1	2	1	4	UoB	1	3	0	4
JiB	17	30	1	48	WjE	1	32	8	41
KzE2	2	0	1	3	YaD2	14	21	4	39
소계	49	124	28	201	소계	45	306	44	395

색의 풍화모질물인 사양토 내지 양질사토이다. 토양의 모재는 화강암의 잔적층으로 구릉지 및 산악지에 분포하는 것으로 알려져 있다. 즉, 사면부에 다량 분포하는 사암질의 토질인 SgE2에서 산사태가 다수 발생하였으며, 이는 총 발생건수에 대해 약 35% 정도의 발생율을 보이는 것이다. 또한, JiB와 WiE, OnD2, YaD2 등의 사암질 토질에서도 발생건수가 48건, 41건, 46건 및 39건 등으로 상대적으로 많은 산사태가 발생하였다. 반면에 EgB, ImC, JiB, KzE2, Ng, TaE2, UoB 등과 같은 점성토질에서는 산사태가 거의 발생하지 않았음을 알 수 있다.

## GIS 기법을 적용한 산사태 위험도 분석

본 연구의 최종적인 목적은 산사태 위험을 효율적으로 방재하기 위한 산사태 위험지도를 작성하는데 있다. 이러한 산사태 위험지도(hazard map)를 작성하는 가장 쉬운 방법 중의 하나는 단순히 기존의 산사태 발생자료만을 이용하는 것이다. 이를 위해서는 대상지역에 대한 특정한 간격의 격자를 생성하고, 이 격자의 셀(cell)에 산사태 발생수를 속성값으로 주어 전체 대상지역에 대한 산사태 발생위험도의

공간적 분포를 산출하게 된다(Chau 등, 2003; Cardinali 등, 2002). 하지만 이 방법의 경우 격자별로 산출된 산사태 발생위험도가 단순히 산사태 발생수에 의존하게 되어, 산사태 조사 대상지역 전체에 걸쳐 균질하게 수행되지 않는 경우 결과의 신뢰성이 매우 떨어지게 된다(Chau 등, 2004). 따라서 정확한 산사태 위험지도 제작을 위해서는 산사태 발생자료뿐 아니라, 산사태 발생의 역학적 과정, 지형, 기상, 토질, 식생, 인간활동 등의 다양한 산사태 발생요인을 필수적으로 고려할 필요가 있다.

이를 위해 본 연구에서는 산사태와 밀접한 관계를 가지는 지형, 기상 및 토질정보를 통합하여 산사태와의 상관관계를 산출하고, 이를 통해 산사태 위험도를 분석하였다. 산사태 위험도를 통계적이고 효율적으로 분석 및 표현하기 위해 래스터 계산(Chau 등, 2004)과 같은 특정한 GIS 기법을 적용하였으며, 이를 통해 보다 관련 자료 분석과 다양한 산사태 발생요인의 영향을 평가할 수 있었다(Van 등, 1999; Dhakal 등, 2000).

### 1. 상관관계 분석을 통한 위험도 인덱스 산정

GIS 기법을 통해 다양한 산사태 발생요인을 통합하여 위험도를 추정하기 위해서는 먼저 이

러한 산사태 발생요인과 실제 산사태 발생과 상관관계를 생성하여야 한다. 여기서는 상관관계의 생성을 위한 대표적인 GIS 기술인 대역분석(zonal statistics)을 적용하여 산사태와 발생요인 간의 상관관계를 도출하였다(국립방재연구소, 2003; Chau 등, 2004). 대역분석 기능은 기준이 되는 래스터 레이어(zone layer)에 설정된 임의의 지역(zone)별로 분석 대상이 되는 레이어(value layer)의 통계값을 계산하는 기능이다.

본 연구에서는 대역분석을 위한 기준 레이어의 격자크기를 사용된 DEM의 해상도와 동일한 해상도로 설정하고, 그 후 각 레이어의 격자에 각 자료별 속성을 일정한 범위의 값으로 분할하여 할당하였다. 각 자료별의 속성값의 범위는 표 3~6에 표현된 범위와 동일하다. 하지만 산사태 발생정보 및 기상정보의 경우 연속성이 없는 점(point) 단위의 자료이므로 래스터 형태의 연속성을 가지는 레이어를 생성하기 위하여 기준격자를 기반으로 각 격자의 속성으로 발생횟수와 강수량을 취득하였다. 다음의 그림 6은 기준격자를 이용하여 산사태 발생정보 및 강수량을 래스터 레이어로 생성

한 결과이다.

최종적으로 생성된 6개의 래스터 형태의 인덱스 레이어(그림 7(a) 참조)를 이용한 다중회귀분석(multi-dimensional regression analysis) 방법(Chau 등, 2004)을 통하여 산사태 발생에 대한 각 관련 자료범위에 따른 가중치( $W_j$ ) 및 위험도 인덱스( $H_{ji}$ )를 산출하였다. 다음의 표 7은 본 연구를 통해 최종적으로 산출된 위험도 인덱스를 정리한 것이다.

모든 래스터 레이어에 동일하게 위험도 인덱스의 최대값으로 1의 값을 주었으며, 이를 기준으로 도출된 상관관계에 따라 속성값의 범위별 위험도를 표준화하였다. 위험도 표준화를 위한 기준으로 Evans 등(1999)이 제안한 표고, 경사각, 토질 등에 대한 인덱스를 이용하였으며, 이 연구에서는 경사각에 의한 위험도 표준화를 위하여 산사태 발생이 가장 많이 일어나는  $34^{\circ} \sim 39^{\circ}$  범위를 기준으로 정규화(normalized)를 통해 위험도 인덱스를 산출하였다. 강수량에 대한 위험도 인덱스의 경우에는 최대 강수량이 나타난 격자를 최대값으로 하고, 각 격자에 배정된 강수량이 이와 선형의

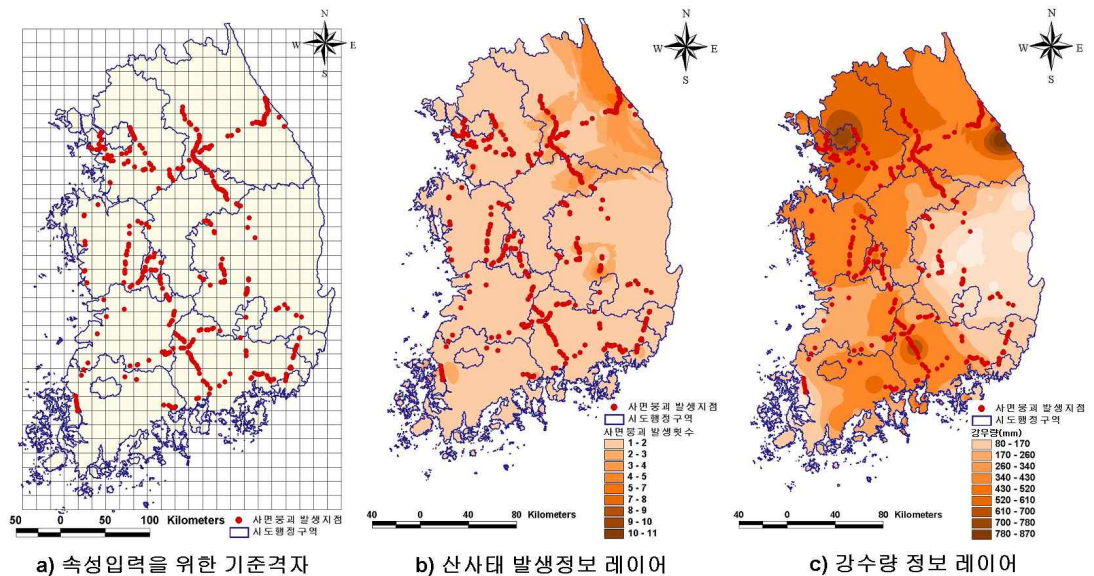


FIGURE 6. 기준 격자를 이용한 산사태 발생정보 및 강수량 정보 레이어 생성

TABLE 7. 각 래스터 레이어별 가중치 및 위험도 인덱스

구분(No.)	자료	레이어( $j$ )	가중치( $W_j$ )	범위( $C_i$ )	위험도 인덱스( $H_{ij}$ )
1	DEM	표고	0.5	0~100m	1.0000
2				100~200m	0.9191
3				200~300m	0.8383
4				300~400m	0.7574
5				400~500m	0.6766
6				600~700m	0.5957
7				> 800m	0.5149
8	경사도	경사각	2.0	0~10°	0.0000
9				10~15°	0.1681
10				15~20°	0.5136
11				20~25°	1.0000
12				25~30°	0.8045
13				> 30°	0.2182
14	경사향도	경사방향	0.3	Flat	0.0000
15				N	0.5000
16				S	0.6000
17				ArC	0.1196
18				BeC	0.0478
19				CaE2	0.1292
20				De	0.1196
21				EgB	0.0383
22				Gy	0.1244
23				Hd	0.1196
24				ImC	0.0191
25				JiB	0.2297
26				KzE2	0.0144
27				MqE2	0.1292
28				Ng	0.0239
29				OnD2	0.2201
30				PaD	0.0622
31	RCS	0.0431			
32	SgE2	1.0000			
33	TaE2	0.0096			
34	UoB	0.0191			
35	WjE	0.1962			
36	YaD2	0.1866			
37	그 외	0.0000			
38	산사태 조사자료	발생정보	2.0	$N$ (격자별)	$N/11$
39	기상자료	강수량	1.0	강수량(mm)	격자 강수량/최대 강수량

비례관계를 가지는 것으로 표준화하여 산출하였다. 산사태 위험도 표준화에 대한 보다 자세한 내용은 Evans 등(1999) 및 Chau 등(2004)을 참조할 수 있다.

레이어별로 적용된 가중치는 Evan 등(1999)이 제시한 방법에 따라 산출된 것으로, 이 방법에 의하면 위험도 산정을 위한 적절한 가중치는 각 레이어 속성값의 분포가 정규분포(normal

distribution)에 얼마나 근접하는가에 따라 경험적으로 결정된다. 실제로 Evan 등(1999)은 표고와 산사태 발생 간의 상관관계는 매우 약하다고 주장하였으며, 본 연구에서도 산사태 발생과 표고 간에는 상관관계가 거의 존재하지 않는 것으로 분석되었다(그림 2 참조). 이에 따라 산사태 위험지도 산출을 위한 표고 레이어의 가중치는 0.5로 결정되었다. 또한 경사방향의 경우에도 산사태 발생과의 상관관계가 거의 존재하지 않았으며, 이를 통해 경사방향 레이어의 가중치는 가장 작은 값인 0.3으로 결정되었다.

하지만 사면의 경사각과 과거 산사태 발생 이력에는 2.0의 가중치가 적용되었는데, Evan 등(1999)에 따르면 두 레이어는 지역적인 지형 및 토질 환경에 강하게 연관되어 산사태 발생에 매우 민감하게 작용하기 때문이다. 그 외의 토질 및 강수량 레이어에는 모두 1.0의 가중치가 일률적으로 적용되었다. 하지만 표 7에 제시된 이러한 가중치 및 위험도 인덱스의 유효성에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요하며, 보다 많은 자료 또는 토질, 식생, 토지이용 등의 발생요인에 대한 새로운 레이어가 추가된다면 좀 더 정확한 가중치 및 위험도 인덱스를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 산사태 위험지도의 작성

특정한 지점  $x$ (30m의 기준 격자)에 대한 최종적인 산사태 위험도는 표 7의 가중치 및

인덱스를 이용한 래스터 계산 기법에 의하여 다음과 같이 결정된다(Chau 등, 2004).

$$Hazard(x) = F(x) \sum_{j=1}^6 [W_j H_{ij}(x)] / \sum_{j=1}^6 \quad (1)$$

여기서,  $F(x)$ 는 다음과 같이 정의되는 필터 함수(filter function)이다.

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } \theta < 15^\circ \text{ and } H_{j25} = 0 \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

상기의 식 (1)은 우변의 가중치의 합에 의하여 크기가 제한되기 때문에, 위험도  $Hazard(x)$ 의 크기는 1.0을 넘지 않는다. 또한 필터 함수  $F(x)$ 는 사면과 멀리 떨어진 평지에서 산사태 위험도가 산정되는 경우를 방지하기 위하여 이용된다. 실제로 대상지역이 평지인 경우에는 향후 산사태가 발생할 가능성이 거의 없기 때문에, 이 경우 표고, 강수량, 토질 레이어에 의해 산출된 모든 산사태 위험도는 제거되게 된다.

다음의 그림 7(b)는 표 7의 가중치 및 위험도 인덱스를 적용한 식 (1) 및 (2)의 래스터 계산 기법을 통해 최종적으로 계산된 산사태 위험지도이며, 다음의 표 8은 산정된 산사태 위험도에 따른 위험도별 대상면적을 나타낸 결과이다.

그림 7(b)에서 표현된 것처럼 본 연구를 통해 산출된 산사태 위험도는 우리나라 전역에 걸쳐 최소 0.117에서 최대 0.796의 분포를 보였으며, 0.5이상의 높은 위험도는 대부분 산지

TABLE 8. 산사태 위험도별 대상면적 분석

위험도	격자 수(천개)	면적(100km <sup>2</sup> )	면적비(%)	누가면적(100km <sup>2</sup> )	누가면적비(%)
0.1~0.2	634.72	571.25	59.46	571.25	59.46
0.2~0.3	87.45	78.70	8.19	649.95	67.66
0.3~0.4	256.91	231.22	24.07	881.16	91.73
0.4~0.5	65.49	58.94	6.14	940.11	97.86
0.5~0.6	19.32	17.39	1.81	957.50	99.67
0.6~0.7	2.87	2.58	0.27	960.08	99.94
0.7~0.8	0.64	0.58	0.06	960.66	100.00
합계	1067.40	960.66	100.00	-	-

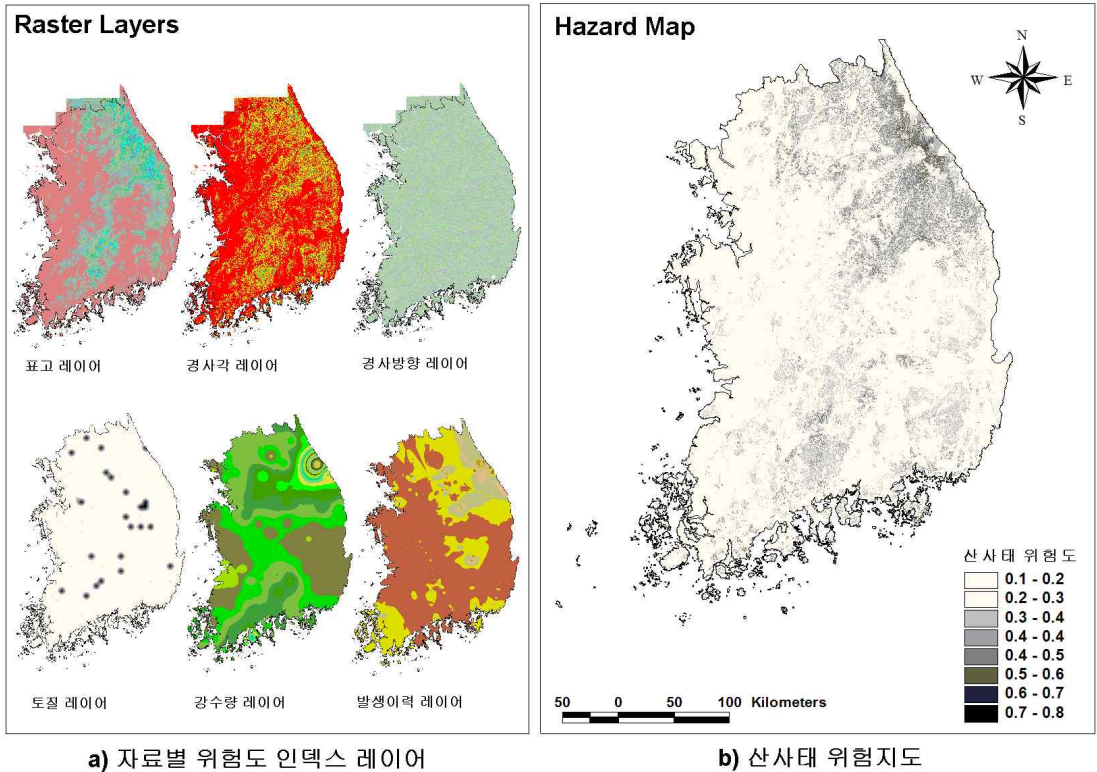


FIGURE 7. 산사태 관련 정보를 이용하여 산출된 산사태 위험지도

가 많은 강원도 지역 및 지리산 일원에 분포하는 것으로 나타났다. 그 외의 대부분의 지역은 0.1~0.3정도의 비교적 낮은 산사태 위험도를 나타내어 산사태 발생위험이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 또한 높은 산사태 위험도가 강원도 일대에 집중된 결과는 2002년도 산사태 발생정보에 태풍 루사(RUSA)로 인한 산사태 발생자료가 다수 포함된 것이 주요한 원인으로 분석되었다.

산출된 산사태 위험도별 대상면적을 분석한 결과(표 8 참조), 산사태 발생 가능성이 거의 없는 위험도 0.1~0.2 사이에 분포하는 지역은 전체 면적의 60% 정도를 나타내었으며, 비교적 높은 위험도인 0.4 이상에 포함되는 면적은 전체면적 대비 약 8% 정도로 나타났다. 또한 산사태 발생 가능성이 매우 높은 0.7 이상의 고위험도 지역은 전체의 약 0.06%로 총 58km<sup>2</sup>

면적을 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 수치는 산지가 많은 우리나라의 특성에 비추어 다소 작은 수치로 인식되지만, 이러한 고위험도 지역에서도 다양한 인간 활동이 이루어지는 경우에는 산사태로 인한 막대한 피해가 유발될 수 있다. 따라서 향후 이러한 고위험도 지역에 대해서는 다양한 방법을 통한 산사태 방재 및 피해예방이 필요할 것으로 판단된다.


## 결론

본 연구에서는 국내 산사태 발생 이력을 기반으로 GIS 기법을 적용하여 우리나라 지역에 대한 산사태 위험도 분석을 수행하였다. 이를 위해 한국도로공사에서 조사한 고속도로 주변의 총 3년 동안의 산사태 발생이력 자료와 관련 발생요인 정보(기상정보, 지형정보, 토질정

보)를 기초로 산사태 발생 및 피해 분포에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 이러한 통계적 분석 결과를 토대로 산사태와 강수량, 토질 및 지형정보(표고, 경사각, 경사방향) 간의 상관관계를 도출하고, 이를 통해 산사태 위험지도 작성을 위한 각 자료별 가중치 및 위험도 인덱스를 추정하였다. 그 후 생성된 래스터 형태의 위험도 인덱스 레이어를 산사태 발생 자료의 공간적 분포를 기준으로 중첩하였으며, 최종적으로는 가중치를 적용한 래스터 계산 기법을 통해 우리나라 산사태 위험도를 분석한 산사태 위험지도를 작성하였다.

본 연구의 적용 결과 산사태 위험도 산출을 위해 GIS 기법을 적용할 경우, 산사태 위험지도 작성을 위한 다양한 발생요인의 통합과 분석을 보다 손쉽고, 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 판단되었다. 하지만 산출된 산사태 위험지도의 경우 적은 수의 산사태 발생자료만을 이용하였으며, 산사태 발생과 밀접한 관계를 가지는 다양한 발생요인을 모두 고려한 결과는 아니다. 따라서 위험지도 산출을 위해 적용된 가중치 및 위험도 인덱스의 정확도를 높이기 위한 노력이 필요하며, 이를 위해서는 본 연구에 이용된 자료 이외에 지질, 식생, 토지이용 등의 추가적인 정보를 이용하여 산사태 발생 및 발생요인 간의 상관관계를 보다 정확하게 산출할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3111)의 지원으로 수행되었습니다. 

## 참고 문헌

국립방재연구소. 2003. 지리정보시스템을 이용한 사면붕괴 재해연구.  
소방방재청. 2006. 2006년 재해연보.

이진덕, 연상호, 김성길, 이호찬. 2002. 산사태의 발생가능지 예측을 위한 GIS의 적용, 한국지리정보학회지 5(1): 38-47.

조남춘, 최철웅, 이창우. 2006. RS와 GIS를 이용한 산사태 탐지 및 특성분석. 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집. 246-249쪽.

조명희, 조운원. 2009. 기상과 지형자료를 통합한 산사태 위험지 예측 기법 개발 : 울진지역을 대상으로. 한국지리정보학회지 12(2): 1-10.

한국도로공사 도로교통기술원. 2004. GIS를 이용한 홍수 시 고속도로 사면붕괴 특성평가 연구. 138쪽.

Anbalagan, R., L. Sharma and S. Tyagi. 1993. Landslide hazard zonation (LHZ) mapping of a part of Doon valley, Garhwal Himalaya, India. In: Chowdhury, R.N., Sivakumar, M. (Eds.), Environmental Management Geo-water and Engineering Aspects, Balkema, Rotterdam, pp.253-260.

Burrough, P.A. and R.A. McDonnell. 1998. Principles of Geographic Information System, Oxford University Press, New York. 333pp.

Cardinali, M., P. Reichenbach, F. Guzzetti, F. Ardizzone, G. Antonini, M. Galli, M. Cacciano, M. Castellani and P. Salvati. 2002. A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy. Natural Hazards and Earth System Sciences 2(1):57-72.

Carrara, A., F. Guzzetti, M. Cardinali and P. Reichenbach. 1999. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. Natural Hazards 20(2-3):117-135.

Chau, K.T., R.H.C. Wong, J. Lui and C.F. Lee. 2003. Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory. Rock Mechanics and Rock Engineering 36(5):383-408.

Chau, K.T., Y.L. Sze, M.K. Fung, W.Y.

- Wong, E.L. Fong and L.C.P. Chan. 2004. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computer & Geosciences* 30(4):429-443.
- Dhakal, A.S., T. Amada and M. Aniya. 2000. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: an investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing* 66(8):981-989.
- Evans, N.C., S.W. Huang and J.P. King. 1999. The natural terrain landslide study phases I and II. GEO Report No. 73, GEO, CED, Hong Kong SAR Government.
- Hansen, A. 1984. Landslide hazard analysis. In: Brunsten, D., Prior, D.B. (Eds.), *Slope Instability*. Wiley, New York, pp.523-602.
- Kienholz, H. 1978. Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland: scale 1:10,000. *Arctic and Alpine Research* 10(2):169-184.
- PIARC World Road Association 1997. Landslides-techniques for evaluating hazard. PIARC Technical Committee on Earthworks, Drainage, Subgrade (C12), pp.1-17.
- Van Westen, C.J., Seijmonsbergen, A.C. and Mantovani, F. 1999. Comparing landslide hazard maps. *Natural Hazards* 20(2):137-158. **KAGIS**