

# GIS를 이용한 토석류 발생유역 위험성분석에 관한 연구

전계원 · 오채연<sup>†</sup>

강원대학교 방재전문대학원

(2011. 2. 10. 접수 / 2011. 4. 11. 채택)

## Study on Risk Analysis of Debris Flow Occurrence Basin Using GIS

Kye-Won Jun · Chae-Yeon Oh<sup>†</sup>

Graduate School of Disaster prevention, Kangwon University

(Received February 10, 2011 / Accepted April 11, 2011)

**Abstract** : Annually, many parts of the Korea have been damaged from the localized heavy rain and/or typhoons which peak between June and September, which result in extensive financial and human loss. Especially, because the most area of Gangwon province is composed of the steep slope mountains, the damages by the debris flow or land-sliding are more frequent and the frequency has been increased. To analyze the characteristics and causes of these debris flow disasters, lots of study are recently being conducted through database of weather, hydrologic, soil etc using a GIS or remote sensing. In this study, we applied GIS method to analyze the risk of the debris flow area. With the statistical analysis and infinite slope stability model(SINMAP), the debris flow risk level of the mountain slope was generated. As a result, the GIS statistical analysis showed high correlation that former model of SINMAP in determining the debris flow risk area.

**Key Words** : debris flow, GIS, remote sensing, SINMAP, statistical analysis

### 1. 서론

우리나라는 매년 6~9월 사이에 내리는 국지적 집중호우나 태풍 등의 영향으로 자연재해가 발생하고 있으며, 또한 인명과 재산의 피해정도도 해마다 늘어나고 있는 실정이다. 특히, 강원도 지역의 경우 대부분이 급경사의 산악지로 구성되어 있어 산사태나 토석류로 인한 피해의 규모가 커지고 있으며 횡수 또한 증가하고 있다. 해마다 발생하는 산사태나 토석류 피해에 효과적으로 대처하기 위해서는 산사태나 토석류의 발생 가능성이 높은 지역에 대한 정확한 예측을 위한 재해지도나 위험평가 시스템이 개발되어야 한다. 이러한 토사재해의 특성과 요인을 분석하기 위해 최근 GIS 및 원격탐사를 이용하여 기상, 수문, 토양등의 데이터베이스화를 통한 많은 연구들이 진행되고 있다. 산림청과 지질자원연구소(산사태재해 예측 및 저감기술 개발, 2009)국립방재연구소 등에서 산사태 재해 예측지도를 작성하였으며 예측지도를 토대로 산사태를 좀

더 정확하게 예측하고 인명피해를 저감할 수 있는 실용적인 연구의 필요성이 강조되고 있다.

GIS 기술을 이용하여 사면의 안정성과 산사태 위험성을 평가하는 대표적인 방법으로 Montgomery and Dietrich<sup>1)</sup>는 무한사면안정모델(infinite slope stability model)을 통해서 사면의 경사와 집수지역을 기반으로 하는 사면안정등급을 정의하고, Wu and Sidle<sup>2)</sup>는 무한사면안정모델에 동적인 수리 모델링(dynamic modeling of hydrology)을 접합시킨 더욱 정교한 모델을 제시하였으며, Pack 등<sup>3)</sup>은 수리적 모델을 무한사면안정모델과 결합하여 사면안정분석을 위한 SINMAP을 개발하였다. Sanjit K. Deb 등<sup>4)</sup>은 산사태의 민감성 평가를 위해 SINMAP과 hydrological model을 적용하여 연구하였으며, 또한 국내에서는 김정태 등<sup>5)</sup> GIS 및 RS기법을 활용한 산사태 취약성 평가, 김기홍 등<sup>8)</sup>은 강릉지역 국도의 재해위험성 평가와 장현익 등<sup>7)</sup>은 영동 고속도로 토석류의 SINMAP해석에 대해 연구하였으며, 배민기 등<sup>9)</sup> 환경정보시스템을 이용한 산사태 발생위험 예측도 작성 및 국립산림과학원<sup>10)</sup> 토석류 발생 특성과 피해규모 예측기법 개발연구를 수행하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
cyoh@kangwon.ac.kr

본 연구에서는 산지에서 발생하는 재해중 하나인 토석류에 대한 특성을 이해하고 토석류 발생지역에 대한 위험성을 분석하기 위해 GIS기법을 적용하였다. 분석방법은 통계적 기법과 결정론적 기법으로 구분되며 각각의 기법을 이용하여 산사태 및 토석류 발생가능지역을 예측할 수 있는 재해지도를 작성하고 재해위험지도의 정확성을 검증하기 위해 토석류가 발생한 지역의 실제 현장영상과 비교, 분석을 수행하였다.

## 2. 연구지역 및 방법

### 2.1. 연구대상지역

본 연구는 Fig. 1과 같이 강원도 인제군 인제읍 가리산 일대의 지역을 대상으로 선정하였으며, 이 지역은 2006년 7월 태풍 에위니아와 빌리스에 의한 집중호우로 토사재해가 크게 발생하였으며 토석류가 발생한 유역을 중심으로 대상지역을 선정하였다.

### 2.2. 재해지도 제작방법

산지에서 발생하는 재해에 관련된 재해지도 제작 방법에는 통계적 기법과 결정론적 기법이 주로 사용되고 있다. 통계적 기법은 연구대상지역을 대상으로 산사태 및 토석류위험에 사용되는 7개 인자(경사도, 모암, 산림상태, 경사길이, 경사위치, 사면형태, 토심)에 대하여 GIS DB를 구축하고 Table 1

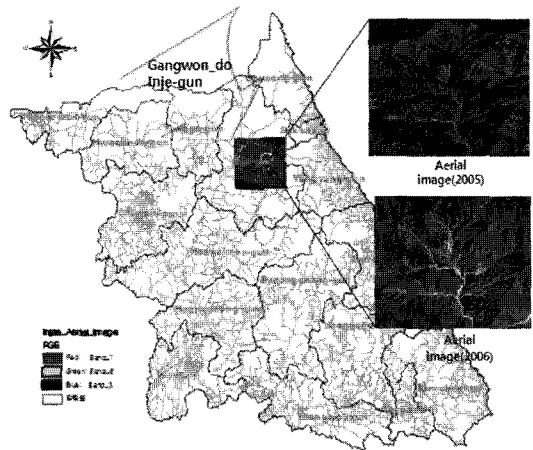


Fig. 1. Location of study area and Aerial image.

의 사방기술교본에 나와 있는 점수표에 따라 인자별로 점수를 매겨 GIS 지도대수 연산을 통하여 최종 산사태 및 토석류 위험지도를 작성하였다. 결정론적 기법은 물리기반의 모델링 SINMAP을 이용하여 분석하였다. SINMAP은 DEM을 기본으로 수치계산하게 되며 입력된 DEM의 정확도에 따라 사면의 방향 및 흐름도, 경사도 등이 계산되어진다.

1:5000의 수치지형도를 이용하여 1 m × 1 m의 격자를 만들어 분석하였으며 항공영상에서 디지털이징한 산사태 및 토석류 발생 위치를 입력하여 정확성을 추정하였다.

Table 1. Score Table for Prediction of Landslide-susceptible Area

구분	위험요인별 점수				
경사도 (°)	41 이상	26~40 미만	25 이하		
	0	9	16		
모암	퇴적암	화성암 (화강암류, 기타)	변성암 (천매암, 점판암 기타)	편마암 및 편암	반암류 및 안산암
	0	5	12	19	56
산림상태	활엽수림 또는 혼효림	침엽수림의 치수림 또는 소경목림	침엽수림(중경목, 대경목), 활엽수림, 혼효림(치수림)		
	0	18	26		
경사길이 (m)	50	51~100	101~200	201 이상	
	0	19	36	74	
경사위치	5/10 미만	5/10 이상 7/10 미만	7/10 이상		
	0	9	26		
사면형태	상승사면	평행사면	하강사면	복합사면	
	0	5	12	23	
토심 (cm)	20 이하	20~100	100 이상		
	0	7	21		

2.2.1. 통계적 기법

GIS의 통계적 기법은 산사태 및 토석류발생에 많은 영향을 미치는 각종 환경, 지질, 지형, 수문, 임상 인자들을 래스터 자료로 구축하여 각종 인자들의 상관관계에 따라 위험도를 구분하는 기법으로 입력된 래스터 자료의 값을 통계적으로 계산하여 위험지수를 산정한다. Fig. 2는 7개 인자(경사도, 모암, 산림상태, 경사길이, 경사위치, 사면형태, 토심)에 대해 각각 래스터 데이터의 형태로 구축한 DB이며, 위험지수는 산림청에서 제공하는 Table 1의 산사태 위험지 판정기준의 점수표에 따라 가중치를 계산하여 위험지수에 의해 위험 지도를 작성하였다.

2.2.2. 결정론적 기법

결정론적 방법의 하나인 SINMAP(Stability Index MAPping)은 Pack 등(1998)이 수리적 모델을 무한 사면안정 모델과 결합하여 영역의 안정성을 평가하고 도시화하는 프로그램으로서 지표에서 발생하는 토석류에 적용된다. SINMAP의 사면안정등급은

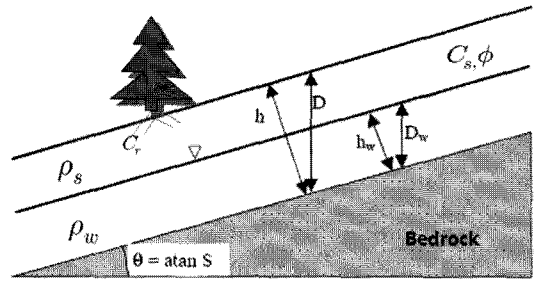


Fig. 3. The geometry of the assumed infinite slope stability model and parameters involved in the safety factor.

Table 2의 안정지수(STABILITY INDEX: SI)로서 도출되며, 이 값들은 해석 영역 내 각 지점에서의 안전성을 표현해 준다. 안정지수는 수치적으로 정확하게 해석된 절대값이라기 보다는 상대적인 위험성을 표현하는 지표이다. Fig. 3에 나타난 변수를 이용한 모델의 안전율(Factor of Safety)은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w] \tan\phi}{D\rho_s g \sin\theta \cos\theta} \quad (1)$$

여기서,  $C_r$ 는 뿌리의 점착력,  $C_s$ 는 흙의 점착력,  $D$ 는 토양의 깊이,  $D_w$  토양층 내 지하수면의 수직깊이,  $\rho_s$ 는 토양의 밀도,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $\theta$ 는 사면의 경사,  $g$ 는 중력가속,  $\phi$ 는 토양의 내부마찰각이다.

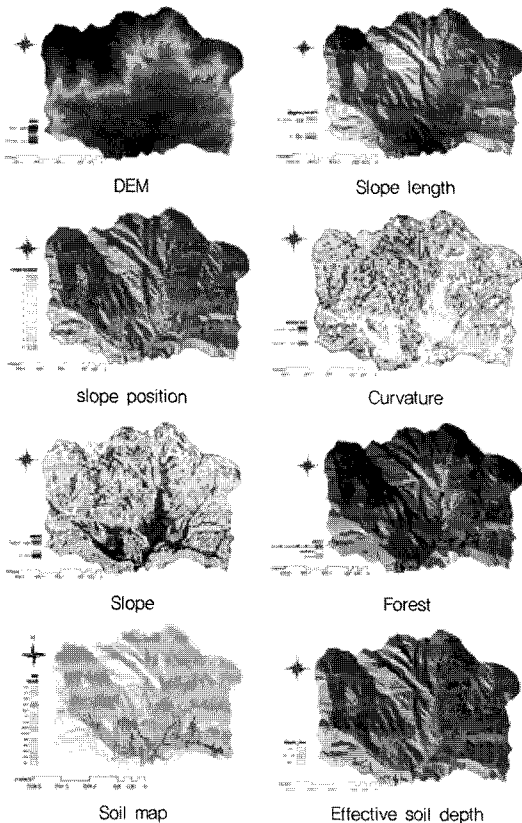


Fig. 2. Raster data DB of study area.

Table 2. Classes of slope stability based on value of the Stability Index(SI)

Condition	Class	Predicted state	Parameter range	Possible influence of factors not modeled
$SI > 1.5$	1	Stable slope zone	Range cannot model instability	Significant destabilizing factors are required for instability
$1.5 > SI > 1.25$	2	Moderately stable slope zone	Range cannot model instability	Moderate destabilizing factors are required for instability
$1.25 > SI > 1.0$	3	Quasi-stable slope zone	Range cannot model instability	Minor destabilizing factors could lead to instability
$1.0 > SI > 0.5$	4	Lower threshold slope	Pessimistic half of range required for instability	Destabilizing factors are not required for instability
$0.5 > SI > 0.0$	5	Upper threshold slope	Optimistic half of range required for stability	Stabilizing factors may be responsible for stability
$0.0 > SI$	6	Defended slope zone	Range cannot model instability	Stabilizing factors are required for stability

식 (1)에서 토양의 깊이 D를 토양 두께 h로 변환하여 변형시키면 식 (2)와 같다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - wr]\tan\theta}{\sin\theta} \quad (2)$$

여기서,  $w = Dw/D = hw/h$  : 상대적 습윤지수(relative wetness),  $C = (Cs + Cr)/(hpsg)$  : 복합 점착력(combined cohesion),  $r = \rho_w/\rho_s$  (토양 밀도에 대한 물 밀도의 비)이며, 안전율 식에서 상대 습윤도를 사면의 배수특성과 연관시켜 변형시켜주면 식 (3)과 같다. 이식은 SINMAP에서 사면 안정계수(Stability Index, SI)를 정의하기 위하여 사용되어진다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - \min(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1)r]\tan\phi}{\sin\theta} \quad (3)$$

SINMAP 분석시 사용되는 물성치 및 토양조건은 현장조사와 실험을 통한 값을 사용하지 않고 SINMAP에서 제공하는 Table 3과 같이 'Default Value'를 사용하였다.

### 2.2.3. 항공영상분석

대상구역의 토석류 발생 전후의 항공영상자료를 이용하여 보정 및 중첩 분석을 통하여 토석류 발생영역을 추출하고, 1:5000 수치지형도를 이용하여 수치표고모형(DEM)을 생성하고 구간별로 피해영역을 비교하고 조사하기 위해 Fig. 4와 같이 디지털화 하였다. 영상자료에 의해 추출된 전체 구역 면적은 13,228,637 m<sup>2</sup>로 나타났으며 산정된 구역의 평균 경사도는 Fig. 5와 같이 27°를 나타내고 있으며, 전체구역중에서 토석류가 발생한 면적은 726,500 m<sup>2</sup>으로서 전체구역면적의 약 5.1%로 분석되었다.

Table 3. Initial setting of SINMAP modeling hydrological and geotechnical parameter values(Pack et al., 1998)

	Default Value	Unit
Gravity Constant	9.81	m/s <sup>2</sup>
Water Density	1,000	kg/m <sup>3</sup>
Ratio of Transmissivity	lower bound	2,000
	upper bound	3,000
Soil Cohesion	lower bound	0.0
	upper bound	0.25
Soil Friction Angle	lower bound	30
	upper bound	45
Soil Density	2,000	kg/m <sup>3</sup>

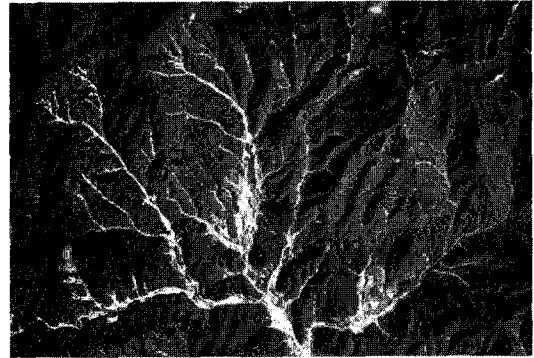


Fig. 4. Image analysis and digitizing.

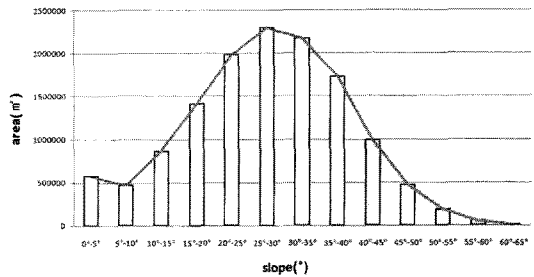


Fig. 5. Slope distribution of study area.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 현재 국내 여건에서 이용할 수 있는 여러 가지 지형, 지질, 수문 관련 GIS자료를 활용하여 통계적 기법과 SINMAP의 분석기법에 의한 재해위험지도를 작성하였다. 이후 영상자료를 기반으로 GIS분석기법 중 중첩분석을 통하여 토석류 위험지역을 추출하고 디지털화한 토석류 발생지역과 위치 비교를 통해서 가시적인 검증수행을 실시하였다. 재해지도는 정확성을 평가하기 위해 고도의 영향을 고려하여 영역을 Zone A와 Zone B로 나누어 분석하였으며 Fig. 6은 통계적 분석 기

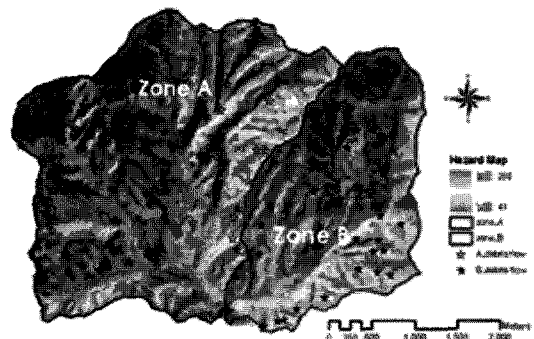


Fig. 6. Statistics analysis Disaster Map.

Table 4. Statistics analysis Risk Index Map Results

Classification		Area (m <sup>2</sup> )	Zone A (%)	Zone B (%)
Value	Zone			
0~60	Low susceptibility	1303	0	0
61~120	Moderate susceptibility	2556342	16 (17)	11 (30)
121~180	High susceptibility	10396638	79 (83)	26 (70)
181~200	Very High susceptibility	74730	0	0

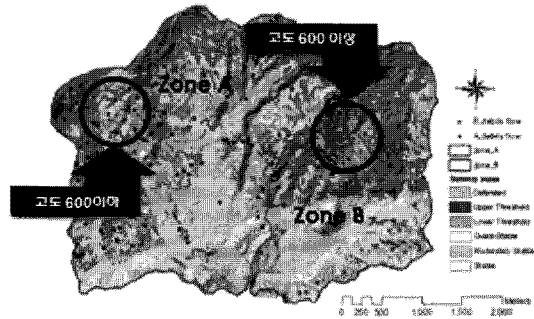


Fig. 7. Stability Index Map.

법을 적용한 재해지도로 산사태 발생위험에 사용되는 7개 인자 경사도, 모암, 산란상태, 경사길이, 경사위치, 사면형태, 토침에 대하여 래스터 데이터를 구축하고 각 인자의 중첩분석과 Map Algebra 연산을 통하여 최종 통계적 기법의 재해지도를 작성하였으며 분석결과 디지털이징한 영상자료의 산사태 및 토석류 발생 포인트와 비교하였을 때 Zone A는 총 발생 포인트 95개 중 79개 약 83%가 value 값이 121~180인 위험성이 높은 지역에 포함되었으며, Zone B는 총 발생 포인트 37개 중 26개(약 70%)가 위험성이 높은 지역에 포함되었다. 결과는 Table 4와 같으며 value 값이 121~180의 높은 위험지수의 면적이 80% 이상으로 가장 높게 나타났다.

SINMAP을 통한 토석류 사면의 안정성평가는 Table 5와 같으며 안전하다고 판명된 지역(SI > 1.5)이 전체 연구대상지역 중 약 50.2%를 차지하고 있었다. 토석류 발생이 의심되는 지역은 SINMAP의 SI 지수가 0에서 1.0인 지역이 49.8%(약 6.5 km<sup>2</sup>)의 면적을 차지하고 있었으며 전체적인 토석류의 발생위험이 높은 것으로 나타났다. 연구대상지역의 고도는 500~1,510 m에 걸쳐 분포하고 있으며 Fig. 7은 SINMAP의 위험성 평가 결과로 위험도와 토석류의 실제 발생 포인트를 비교하였을 때, 고도가

600 m 이상인 B지역은 비교적 위험도가 정확하게 분석되었으나, 고도가 600 m 이하인 A지역은 토석류가 발생하였음에도 불구하고 위험도가 낮게 분석되었다. 그 이유는 SINMAP 해석 시 고도에 따른 경사가 가장 큰 인자로 작용하기 때문이라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 토석류재해지역을 분석하기 위해 GIS를 이용한 통계적 기법과 결정론적 기법을 적용하여 위험성 분석을 수행하였다.

위험성을 평가하기 위해 실제 토석류발생 지역을 대상으로 영상데이터와 GIS를 이용하여 각 인자의 상관관계를 도출하고 인자별 가중치 및 위험도 인덱스를 산정하여 보다 정확한 토석류 위험지도를 작성하고자 하였다. 통계적 분석 기법과 무한사면안정모델을 이용하여 토석류 발생에 대한 산사면의 위험정도를 도출하였다. 분석결과 GIS를 이용한 통계적 분석기법이 기존 모형인 SINMAP에 비해 토석류 위험지역을 판단하는데 높은 상관성을 나타냈다. 향후 본 연구를 토대로 토석류, 산사태 등 산지재해를 관리하기 위해 기존의 지형인자 뿐만 아니라 기상인자를 고려할 수 있는 추가 연구가

Table 5. Classes of slope stability based on value of the Stability Index(SI)

	Stable	Moderately Stable	Quasi-Stable	Lower Threshold	Upper Threshold	Defended	Total
Area(km <sup>2</sup> )	2.71	1.39	2.54	6.15	0.44	0.003	13.23
% of Region	20.46	10.52	19.22	46.48	3.29	0.026	
Debris-flow	21	23	31	63	3	0	
% of Debris-flow	14.89	16.31	21.99	44.58	2.13	0	100
zone A	16	13	26	37	3	0	95
zone A(%)	17.02	13.83	27.66	38.95	3.19	0	100
zone B	2	5	8	21	1	0	37
zone B(%)	5.41	13.51	21.62	56.76	2.70	0	100

필요하다고 판단된다.

### 참고문헌

- 1) Montgomery, D.R., Dietrich, W.E., "A physically Based Model for the Topographic control on Shallow Landsliding", *Water Resources Research* 30, pp. 1153~1171, 1994.
- 2) Wu, W. and Sidle, R. C., "A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Watersheds", *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 8, pp. 2097~2110, 1995.
- 3) Pack, R. T., "Statistically-based terrain stability mapping methodology for the Kamloops Forest Region, British Columbia. Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference", Canadian Geotechnical Society, Vancouver, B.C., 1995.
- 4) Sanjit K. Deb, Aly I. El-kadi, "Susceptibility assessment of shallow landslides on Oahu, Hawaii, under extreme-rainfall events", *Geomorphology*, 108, pp. 219~233, 2009.
- 5) 산림청, "산사태위험판정기준표" (제5조관련).
- 6) 김경태, 정성관, "GIS 및 RS기법을 활용한 산사태 취약성 평가", *한국지리정보학회지*, 제8권, 제1호, pp. 75~87, 2005.
- 7) 장현익, 김경석 외, "영동 고속도로 토석류의 SINMAP해석", *대한토목학회 정기학술대회*, 2008.
- 8) 김기홍, 원상연 외, "강릉지역 국도의 재해위험성 평가", *한국지형공간정보학회지*, 제16권, 제4호, pp. 33~39, 2008.
- 9) 배민기, 정구원 외, "환경정보시스템을 이용한 산사태 발생위험 예측도 작성:경상북도를 중심으로", *한국환경학회지*, 제18권, 제11호, pp. 1189~1197, 2009.
- 10) 국립산림과학원, "토석류 발생특성과 피해규모 예측기법 개발", 2009.
- 11) 지질자원연구소, "산사태재해 예측 및 저감기술 개발", 2009.