

지질별 산사태 발생 정량적 예측모델

Quantitative Prediction Model of Landslide dependent on Lithology

채 병 곤	한국지질자원연구원 환경지질연구부
김 원 영	한국지질자원연구원 환경지질연구부
조 용 찬	한국지질자원연구원 환경지질연구부
김 경 수	한국지질자원연구원 환경지질연구부
이 춘 오	한국지질자원연구원 환경지질연구부
최 영 섭	한국지질자원연구원 환경지질연구부
이 문 세	한국지질자원연구원 환경지질연구부

서 론

산사태는 형태나 생성 메카니즘에 의하여 여러 종류로 분류된다. 이를 형태(type)에 따라 분류할 때 대체로 낙반(fall), 토폴(topple), 슬라이드(slide), 측면퍼짐(lateral spread), 유동(flow)으로 분류하고(UNESCO Working Party, 1990, EPOCH, 1993), 파괴면의 모양(form)에 의하여 분류할 때는 평면(planar), 쐐기(wedge), 계단(stepped), 원호(circular), 준원호(semi-circular) 등으로 분류할 수 있다. 또한 이들의 생성이 복합적인 작용에 의한 것인가 아닌가에 따라 단일(single) 또는 복합(multiple) 이라는 용어를 사용하기도 한다(Hutchinson, 1988).

국내에서 발생하는 산사태는 대부분 토석류(debris flow)에 해당하며, 7, 8월에 집중되는 호우에 기인되는데 우리나라의 연 평균 강수량 1,200mm 중의 절반 이상이 7, 8에 집중되고 최근 3~4년간 경기도 일대에서 측정된 강우자료에 의하면 2~3일간에도 최대 600mm 이상이 기록된 바도 있다(김원영 외, 2000). Olivier(1994)는 24시간 동안의 강우량이 연 평균 강우량의 20%를 초과할 경우 대형 산사태가 일어날 수 있다고 보고한 바 있고, Brand(1984)와 Premchitt(1986)는 짧은 시간에 내리는 집중강우는 지질조건이나 수문지질 조건과 관계 없이 대형 산사태를 일으킬 수 있다고 보고한 바 있는데, 이는 집중강우가 지표물질을 완전히 포화시킬 수 있는 상태의 강우량을 의미한다.

그러나, 집중강우가 산사태의 가장 직접적인 원인이지만 동일강우 지역 내에서 지질요소의 특성에 따라 산사태 발생빈도와 양상이 달라진다. 그러므로, 산사태 발생을 예측하기 위해서는 지질요소별 특성을 파악하고 그에 적합한 산사태 예측모델을 설정할 필요가 있다. 이 연구에서는 최근 수년간 수행해 온 산사태 예측연구를 통해 설정한 지질별 정량적 산사태 예측모델을 제시하고자 한다.

연구지역

지질별로 적용가능한 산사태 예측모델을 설정하기 위해 국내에 가장 넓게 분포하는 대표 암석종류를 설정하였다. 경기도를 중심으로 편마암으로 대표되는 변성암류, 경기도 일부지역과 경북 일부지역에 분포하는 화강암, 경북 포항을 중심으로 한 제3기 퇴적암류와 화산암류를 대상으로 산사태 예측모델을 개발하고자 하였다. 또한, 이 지역들은 지난 수년간 산사태 발생이력이 가장 많은 곳으로서 막대한 재산과 인명의 피해가 발생하였다.

변성암과 화강암 분포지를 대상으로 경기북부와 남부지역을 대상으로 1,700여개의 산사태를 조사하고, 경북 상주일대에서 99개의 산사태를 추가 조사하였다. 퇴적암 및 화산암 분포지에서는 283개의 산사태를 대상으로 산사태 및 산사면의 기하양상과 토양시료 채취를 통한 실내 물성시험을 수행하였다.

변성암 및 화강암 분포지 산사태 예측모델 개발

변수선정 및 가설설정

통계적 분석 기법을 사용하여 사태 발생을 예측하는데 있어 가능성과 타당성을 검토해 보기 위해 경기도 용인·안성 지역의 77개 지점에서 수집된 15개 변수(건조밀도, 암질, 입도분포(gravel, sand, silt), 액성한계, 습윤도, 소성지수, 소성한계, 투수계수, 간극율, 포화도, 간극비, 습윤밀도, 포화밀도, 사면경사, 고도)를 사용하여 사전 분석을 실시한 결과, 통계적 분석 방법이 그 동안 지질학적인 측면에서 논의되어 왔던 가설을 만족하면서 유의한 결론을 도출해 낼 수 있다는 가능성을 확인하고 다음과 같은 분석을 실시하였다.

그 동안의 사전 분석 및 타당성 검토를 통해, 산사태 발생에 영향을 주는 요인들로서 토질자료로는 암질, 간극율, 건조밀도, 입도분포, 투수계수를, 지형자료로는 고도, 사면방향, 사면경사, 사면 상부경사를 각각 선정하였다. 직관적으로 산사태 발생에 직접적인 영향을 주는 요인은 강우량으로 생각된다. 그러나, 이 연구에서는 강우의 영향을 제외하고 지질요인들 중 산사태에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 경기지역 내 강우량이 동일한 지역을 대상으로 정밀 분석을 실시하였다.

산사태에 영향을 미치는 변수들의 상호연관성과 이 변수들이 산사태 발생에 직접적인 관련성이 있는지를 통계적 접근 방법을 통해 분석해 보고, 더 나아가 산사태 발생을 확률적으로 예측하는데 있어 다음과 같은 연구가설을 세웠다.

[가설 I] 토질은 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.

[I-1] 암질(Lithology)은 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.

[I-2] 간극율(Porosity)은 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.

[I-3] 건조밀도(Dry density)는 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.

[I-4] 입도분포(USCS)는 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.

- [I -5] 투수계수(Permeability)는 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.
- [가설 II] 지형은 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.
 - [II-1] 고도(Elevation)는 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.
 - [II-2] 사면방향(Slope dip direction)은 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.
 - [II-3] 사면경사(Slope angle)는 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.
 - [II-4] 사면 상부경사(Slope top angle)는 산사태 발생에 유의적인 영향을 미친다.

자료의 특성 및 분석방법

산사태 발생예측을 위한 자료는 경기북부 지역의 총 표본수 116개로 산사태가 발생한 지점 79개소, 산사태 미발생 지점 37개소를 대상으로 분석하였다. 또한, 화강암 지역에 동시에 적용하기 위한 모델개발을 위해 경기남부 자료 외에 경북 상주지역을 대상으로 산사태가 발생한 지점 29개, 산사태 미발생 지점 29개 등 총 표본수 58개를 부가하여 분석을 실시하였다. 그리고, 위에서 보는 바와 같이 산사태에 영향을 미치는 변수로 총 9개의 변수가 선정되었다. 9개의 변수 중 입도분포와 암질은 수치 데이터가 아닌 명목형 데이터이며, 그 외 7개의 변수는 모두 수치 데이터이다. 먼저 변수들의 상호 연관성 및 구조적 특징을 파악하기 위하여 '주성분 분석'을 실시하고, 주성분 분석을 통하여 몇 개의 주성분을 판별변수로 이용할 수 있을 지를 점검해 보았다. 이 분석의 궁극적인 목적은 통계적으로 산사태에 유의한 영향을 미치는 변수들을 찾아내고, 이 변수들을 토대로 산사태 발생 여부를 예측하는데 있다. 그러나, 주성분 분석을 통하여 몇 개의 주성분을 판별변수로 이용하는 방법은 해석이 어려워지고, 또한 서로 상관관계가 아주 높은 변수도 사면경사와 사면 상부경사 뿐이므로 산사태 예측에 있어 그다지 효율적인 방법이 아니었다. 그러므로, 산사태 예측을 위한 모델을 개발하기 위해 통계기법의 하나인 '로지스틱 회귀분석'을 통하여 단계적으로 유의한 변수들을 선택하고 선택된 변수들로 이루어진 하나의 판별함수를 구해 보았다.

로지스틱 회귀분석(Logistic Regression)

회귀분석은 산사태와 관련 있는 다른 요인들을 이용하여 향후 발생가능한 산사태를 예측하려는 시도에 적용 가능한 통계분석 방법이다. 예측하려는 변수 즉, 산사태의 발생가능성을 '종속변수'라 하고 산사태를 예측하기 위해 사용하는 다른 요인을 '독립변수'라 한다. 산사태 발생여부를 예측하기 위해서는 종속변수가 '산사태 발생함', '산사태 발생 안함'의 단 두 개 뿐이므로 일반적인 회귀분석을 그대로 적용할 수는 없고 이 때 사용하는 분석방법이 바로 '로지스틱 회귀분석'이다. 즉, 로지스틱 회귀분석은 단지 두 개의 값만을 가지는 종속변수와 다양한 값을 갖는 독립변수들 사이의 관련성을 분석하는 통계기법이다. 또한, 로지스틱 회귀분석은 산사태가 발생할 경우와 발생하지 않을 경우를 예측하기보다는 그 지역에 산사태가 발생할 확률을 계산해 준다는 점에서 산사태 분석에 있어 가장 이상적인 통계 분석방법이라

할 수 있다.

상관성 분석에서 선택된 모든 변수를 이용한 로지스틱 회귀분석 결과 유의수준 $\alpha=0.05$ 에 서 각 추정된 회귀계수들 중 통계적으로 유의하지 않은 변수들이 있으므로, 단계적 변수 선택법(Stepwise method)을 통해 산사태에 영향을 미치는 유의한 변수만 선정하여 회귀모형 을 추정해 보았다.

단계적 변수 선택법은 유의한 변수를 선정하여 가장 최적의 회귀모형을 추정 해 주는 방 법으로서, 이 방법을 통해 선택된 산사태에 통계적으로 유의하게 영향을 미치는 변수는 토 질자료로는 암질, 건조밀도, 입도분포, 투수계수와 지형자료로는 고도, 사면경사가 선택되었 다. 따라서 이 6개의 변수를 이용하여 산사태 예측을 위한 회귀모형을 추정해 볼 수 있으 나, 지질학적인 관점에서 간극을 또한 산사태 발생에 중요한 영향을 미치는 변수라고 사료 되어 이를 포함하여 총 7개의 변수를 이용하여 로지스틱 회귀모형을 추정해 보면 다음과 같 다(Table 1).

$$\begin{aligned} \text{LOGIT} = & 1.4068 \times \text{Lithology 1} + 0.1135 \times \text{Lithology 2} + 0.0823 \times \text{Porosity} \\ & + 6.6785 \times \text{Dry Density} - 10.3138 \times \text{USCS 1} - 10.0153 \times \text{USCS 2} \\ & - 11.5952 \times \text{USCS 3} - 11.5204 \times \text{USCS 4} - 1233.79 \times \text{Permeability} \\ & + 0.0087 \times \text{Elevation} + 0.1726 \times \text{Slope angle} - 10.7014 \end{aligned}$$

여기서 산사태 발생 확률은 다음과 같다.

$$\text{산사태 발생 확률} = \frac{\text{EXP}(\text{LOGIT})}{(1 + \text{EXP}(\text{LOGIT}))}$$

Table 1. Result of logistic regression analysis using stepwise method

Variables	Regression Coefficient	Wald statistics	Degree of freedom	P-value
LITHOLOGY		7.1616	2	.0443
LITHOLOGY(1)	1.4068	3.6699	1	.0266
LITHOLOGY(2)	0.1135	.6913	1	.9031
POROSITY	0.0823	.3739	1	.0923
DRY DENSITY	6.6785	3.8878	1	.0140
USCS		5.9514	4	.5233
USCS(1)	-10.3138	.0095	1	.6770
USCS(2)	-10.0153	.0009	1	.6858
USCS(3)	-11.5952	.0048	1	.6398
USCS(4)	-11.5204	.0111	1	.6421
PERMEABILITY	-1233.79	3.9825	1	.0007
ELEVATION	0.0087	4.4712	1	.0819
SLOPE ANGLE	0.1726	11.7587	1	.0000
Constant	-10.7014	.1009	1	.6765

산사태 발생예측모델의 신뢰성

추정된 회귀모형이 얼마나 적합한가를 평가하는 또 한 가지 방법은 예측 및 관측치의 분석결과를 비교하는 것이다. 전체 통계처리 자료 중, 산사태가 일어나지 않은 25개 지역은 모형에 의해 산사태가 일어나지 않을 것이라고 옳게 예측된 것을 알 수 있으며, 마찬가지로 산사태가 일어난 65개 지역은 산사태가 일어날 것이라고 옳게 예측된 결과를 보여주고 있다. 표의 역대각 원소는 얼마나 많은 수의 지역이 잘못 분석되었는가를 말해 준다. 여기에서 모두 9개 지역이 잘못 예측되었다. 따라서, 전체적으로 위 모형을 이용하면 90.74%의 예측률을 가짐을 알 수 있고, 이는 산사태 예측도가 매우 높은 정확성을 가짐을 표시한다.

통계적 측면의 검증 외에 실제 야외조사 자료와 산사태 발생가능성 예측도를 비교해 보았다(Figs. 1 & 2). 예측도가 작성된 두 지역에서 실제 산사태가 발생한 지점이 대부분 75%이상의 발생가능성을 가진 영역에 점시 되었다. 75% 이상의 발생확률을 가진 지점은 실제 지반상태가 매우 불안정한 곳으로서, 산사태 발생 인자간의 미세한 변화가 발생하거나, 약간의 외부 영향만 가해지더라도 쉽게 산사태가 일어날 가능성이 있는 곳이다. 현장에서 관찰한 모든 산사태 시작부의 위치가 예측도상의 발생가능성이 높은 불안정영역과 일치함을 통해 이 연구에서 선정한 산사태 발생인자와 그 인자별 가중치의 부여가 정확하였음을 알 수 있다. 이러한 정확성은 현장에서 획득한 산사태 미발생지점의 위치가 발생가능성이 낮은 지점에 표시됨을 통해서도 다시 한번 입증된다.

		예 측		판별력
		발생안함	발 생 함	
관 찰	발생안함	25	4	85.71%
	발 생 함	5	65	93.15%
		전 체		90.74%

변성암 및 화강암 분포지 산사태 예측모델 개발

변수선정 및 자료특성 분석방법

퇴적암 및 화산암 분포지에서의 산사태 발생예측모델을 개발하기 위하여 먼저 산사태 발생에 영향을 주는 요인들로서 암질, 간극율, 건조밀도, 습윤밀도, 포화밀도, 흙의 분류(자갈, 모래, 점토), 투수계수, 고도, 사면경사, 비중, 습윤도, 간극비, 포화도, 액성한계, 소성한계, 소성지수, 점성, 마찰각을 각각 선정하였다.

이 자료는 총 표본수 123개로 산사태가 발생한 지점은 81개, 산사태 미발생 지점은 42개

이다. 그리고 위에서 보는 바와 같이 산사태에 영향을 미치는 변수로 총 20개의 변수가 선정되다. 20개의 변수 중 흙의 분류와 암질은 수치 데이터가 아닌 명목형 데이터이며, 그 외 18개의 변수는 모두 수치 데이터이다. 본 분석의 궁극적인 목적은 통계적으로 산사태에 유의한 영향을 미치는 변수들을 찾아내고, 이러한 변수들을 토대로 산사태 발생 여부를 예측하는데 있다. 따라서 그러한 예측을 위한 데이터마이닝 기법의 하나인 로지스틱 회귀분석을 통하여 단계적으로 유의한 변수들을 선택하고 선택된 변수들로 이루어진 하나의 판별함수를 구한다.

자료 분석 및 결과

각 변수별로 산사태에 영향을 미치는 변수를 찾아내기 위해 T-Test를 실시하였다. 그 중 영향을 미치는 것으로 판단된 변수는 고도, 사면경사, 공극율, 건조밀도, 포화밀도, 습윤도, 간극비, 포화도, 자갈 구성비, 모래 구성비 그리고 마찰각이다.

T-test 결과와 로지스틱 회귀분석을 통해 퇴적암 지역에 적용가능한 모델을 설정하였다. T-test 결과를 토대로 영향인자로 판명된 것을 이용하여 다양한 모델을 구성하였으며, 이중 가장 적합성이 좋은 모델을 다음과 같이 설정하였다(Table 2).

$$\text{LOGIT} = 83902.0 \times \text{Dry density} - 71.7306 \times \text{Sand proportion} + 268.5 \times \text{Slope angle} - 197.1 \times \text{Friction angle} - 135232 \times \text{Saturation density} + 140355$$

산사태에 통계적으로 유의하게 영향을 미치는 변수는 Dry density, Sand proportion, Slope angle, Friction angle 그리고 Saturation density가 선택되었다. 따라서, 퇴적암이 주로 분포하는 포항지역에서는 이 5개의 변수를 이용하여 산사태 예측을 위한 회귀모형을 추정해 볼 수 있다.

Table 2. Result of logistic regression analysis

Variables	Regression Coefficient	Wald statistics	Degree of freedom	P-value
Dry density	83902.0	245484.50	1	<.0001
Sand proportion	-71.7306	64.30	1	<.0001
Slope angle	268.5000	314.34	1	<.0001
Friction angle	-197.1000	68.80	1	<.0001
Saturation density	-135232		1	<.0001
Constant	140355	5984.44	1	<.0001

추정된 로지스틱 회귀모형의 적합성 검정

모형이 관측한 데이터를 얼마나 잘 분류했는지 결과에 대한 정확성을 살펴보는 것은 매우 중요하다. 이를 설명해 주는 것이 예측 및 관측치의 분석결과를 비교하는 것이다.

산사태가 일어나지 않은 42개 지역 중 39개 지역이 모형에 의해 산사태가 일어나지 않을 것이라고 예측된 것을 알 수 있으며 마찬가지로 산사태가 일어난 39개 지역 중 37개 지역이 산사태가 일어날 것이라고 예측된 결과를 보여주고 있다. 따라서, 전체적으로 위 모형을 이용하여 조사된 데이터를 재평가하면 93.8%의 정확도를 갖고 산사태를 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이 모델을 이용하여 현재 포항지역에 대한 산사태 발생가능성도를 작성 중에 있다.

		예 측		판별력
		발생안함	발 생 함	
관찰	발생안함	39	3	92.8%
	발 생 함	2	37	94.8%
		전 체		93.8%

개발한 모델의 적용가능성 검토

통계기법을 이용하여 변성암 및 화강암 지역, 퇴적암 및 화산암 지역에 적용할 수 있는 산사태 예측모델을 개발하였다. 이 모델들은 적합도 검증에서 볼 수 있듯이 상당히 높은 예측율을 가지는 것으로서 그 신뢰성이 높음이 주목할 만 하다. 실제로 이 모델을 적용하여 산사태 발생가능성도를 작성한 결과를 보면 실제 산사태가 발생한 지점이 대부분 75%이상의 발생가능성을 가진 영역에 점시되었으며, 현장에서 관찰한 모든 산사태의 시작부 위치가 예측도상의 발생가능성이 높은 불안정영역과 일치함을 통해 이 연구에서 선정한 산사태 발생인자와 그 인자별 가중치의 부여가 정확하였음을 알 수 있었다.

따라서, 위에서 구한 회귀모형을 이용하여 다른 지역의 산사태 발생여부를 예측하는 작업에 신뢰성을 가지고 접근해 볼 수 있는 계기를 마련하게 되었고, 이 회귀모형을 통한 예측 기술은 향후 퇴적암 분포지에서의 산사태 예측에 큰 기여를 할 것이다. 또한, 통계적 측면과 지질학적 측면이 더욱 조화를 이루어 이 모델을 바탕으로 산사태 영향인자들 간의 민감한 관련성과 가중치 등에 대한 심도 깊은 연구와 모델개선도 꾸준히 요망된다

사 사

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가 연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개

발사업으로 수행된 것이다.

참고문헌

김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지 기술 연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09.

UNESCO Working Party on Landslide Inventory, 1990, A suggested method for reporting a landslide, Bull. of IAEG, no. 41, p.5-12.

EPOCH(European Community Programme), 1993, Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. 3 Volumes, Contract no. 90 0025.Brunsdon, 1985,

Hutchinson, J. N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology, In Landslides Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, vol. 1, p.3-35.

Olivier, M. Bell, F. G. and Jemy, C. A., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, Proceedings 7th intern. Cong. IAEG vol. 3, p.1629-1636.

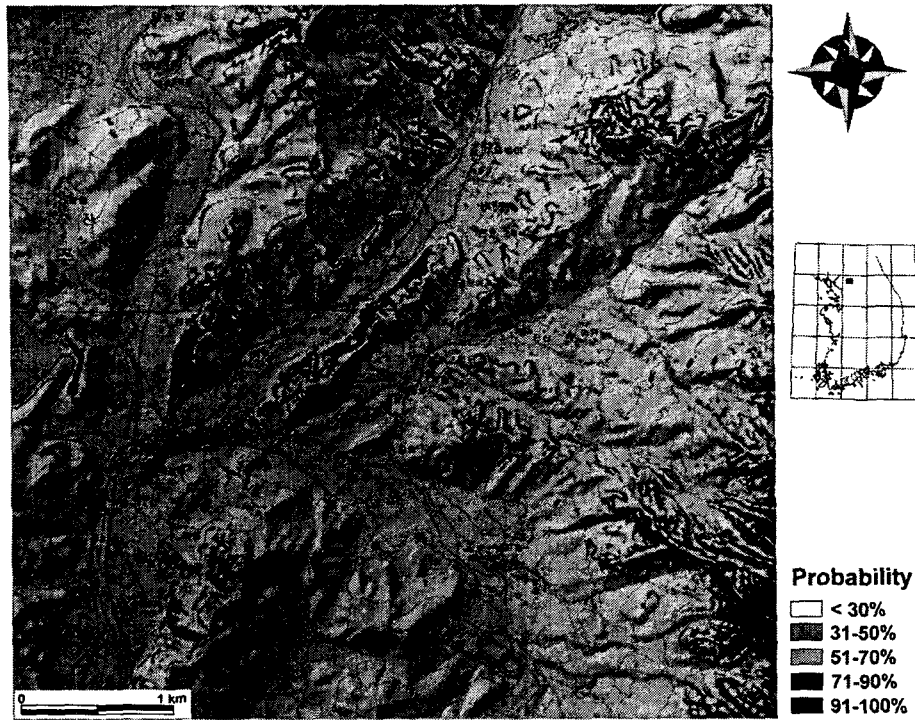


Fig. 1. Landslide probability map of Jinjeob, Gyeonggi.

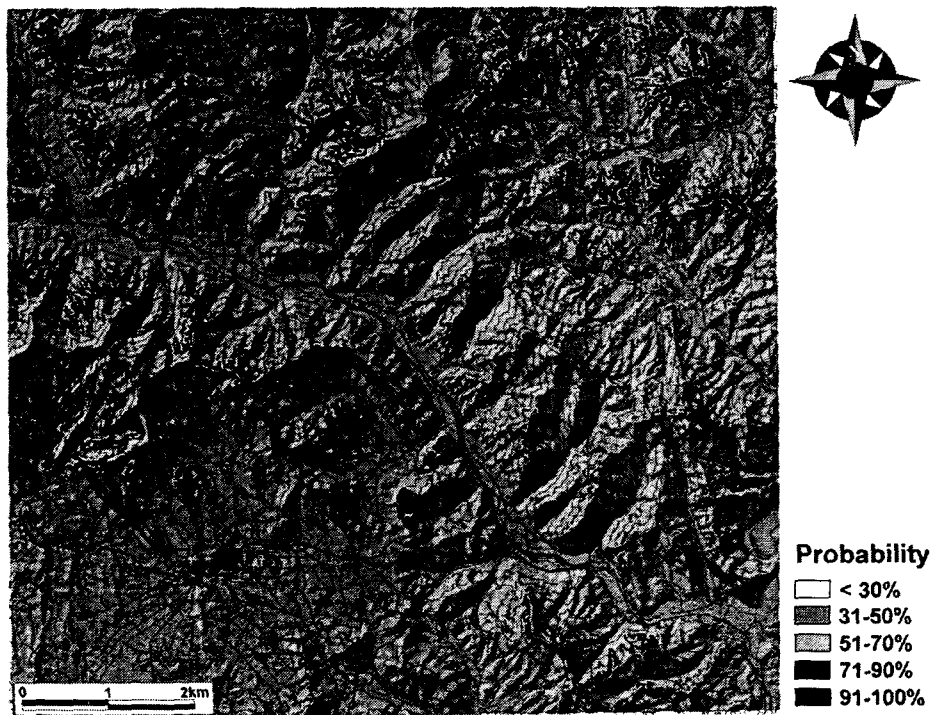


Fig. 2. Landslide probability map of Sangju, Gyeongbuk.

