

# 산사태 분석 GIS 레이어 구축을 위한 통계기법의 적용

이준용 · 박영동

【서울대 지환경시스템공학부 석사과정 · 서울대 지구환경시스템공학부 조교수】

## 1. 서론

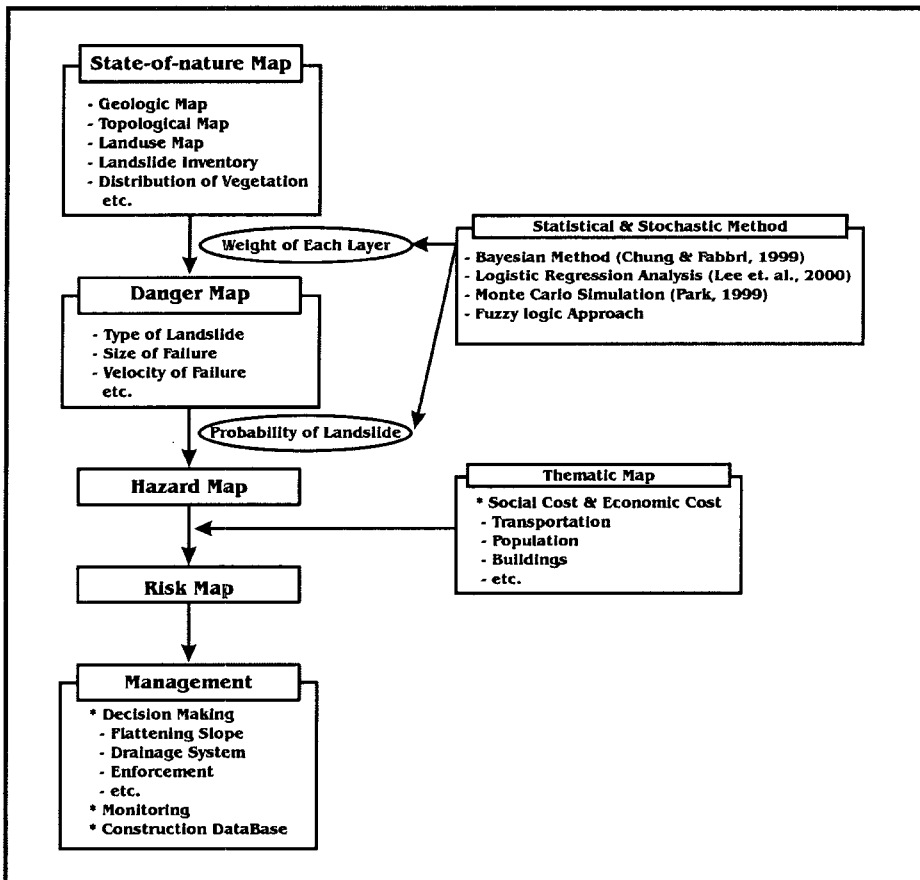
산사태에 대한 연구는 형태에 대한 연구, 발생요인의 분석, 예측방법을 이용한 모니터링 및 불안정의 잠재적 가능성에 대한 연구 등 여러 가지 분야에 걸쳐 연구 되어 오고 있다. 이러한 연구들은 산사태를 지형의 안정화 작용의 일부분으로 보는 측면이 아니라면 예측 및 방지가 산사태 분석의 최종적인 목적임은 당연한 일일 것이다. 이러한 관점에서 본다면 산사태 위험도(landslide hazard map)는 모든 연구를 통해 사회적, 경제적 의사결정에 있어 기본적인 정보로서 큰 역할을 수행한다. 근래에 들어서는 산사태 분석에 GIS의 공간데이터의 연산능력, 작업의 용이성 등의 장점을 이용한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 GIS를 이용한 산사태 위험도 작성의 의의와 이를 위해 요구되는 개별 레이어 작성을 실제 통계기법을 통해 응용하였다.

## 2. 산사태 위험도(Landslide Hazard Map)와 GIS

Varnes(1984)에 의하면, natural hazard는 어느 특정 기간 내에 관심지역에 잠재적인 피해를 줄만한 현상이 발생할 확률을 의미하며, risk는 특정 자연현상으로 야기되는 인명피해, 재산손실 혹은 경제활동의 장애에 대한 예상수치를 의미한다. 또한 hazard는 확률의 개념을 포함하지 않고 단지 산사태의 발생자체에만 초점을 두는 취약성(susceptibility)과도 구별된다. 따라서, landslide hazard map은 산사태의 발생가능성에 대해, 특정지역의 landslide hazard의 등급의 공간상 분포를 가시화한 지도를 의미하며, 이상적인 landslide hazard map은 해당지역의 일어날 수 있는 모든 형태의 산사태에 대한 시간적, 공간적 확률을 포함하고 있어야 할 뿐 아니라, 그 발생의 형태 및 규모, 발생시 움직임의 속도와 같은 정보도 함께 제시해야만 한다(Soeters & Western, 1996). 또한 Einstein(1988)은 산사태와 관련된 mapping의 단계를 5단계로 구분하였는데, state-of-nature map, danger map, hazard map, risk map 그리고 management map이다. state-of-nature map의 경우는 다른 특별한 해석 없이 단순한 자료의 제시에만 국한되며, danger map은 가능한 파괴의 양상(낙석, 이트류 등) 및 파괴의 메커니즘을 설명하는 지도이며, hazard map은 각각의 경우와 관련된 확률을 제시해 주며, risk map에서는 위험에 의해 발생할 수 있는 인명피해,

재산피해 등에 관련된 내용을 포함하게 되며, 최종적인 단계인 management map에서는 hazard map에서 몇 가지 요소를 부가하여 의사결정에 바로 사용되어질 수 있는 단계의 지도를 의미한다.

지리정보시스템을 이용한 산사태 관리 지도의 작성은 전통적인 방법의 산사태 관리 지도 작성보다 여러 가지 면에서 장점을 지니고 있다. 우선 데이터 자체가 공간상에서 의미 있는 것이므로 위치정보를 쉽게 나타낼 수 있다는 점을 들 수 있다. 또한 변수로 사용되는 여러 레이어는 초기 구축단계에서의 단점은 존재하지만, 일단 구축된 레이어에 대해서는 추가적인 수정이 용이하며, 공간적인 연산에 있어서는 전통적인 방법에 비해 월등한 능력을 발휘하게 된다. 더 나아가 관련된 자료 뿐 아니라, 분석을 통해 얻어진 결과 등에 대해 데이터베이스를 구축해 나아감으로써, 그 후에 이루어지는 분석에 대해 보다 나은 결과를 기대할 수 있게 한다.



<그림 1> GIS를 이용한 산사태 관리지도 작성과 통계기법

통계적 기법의 활용은 이러한 GIS 분석의 선결조건인 레이어 구축 면에서 많은 역할을 수행하게 된다. 그림 1은 앞서 언급한 5단계의 산사태 관리 지도에 있어 통계적 기법이 쓰여지는 단계를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 통계적 기법은 초기의 기본 레이어의 중첩시 각 레이어의 가중치 부여에 있어 합리적인 근거를 제시하는 역할을 수행하기도 하며, danger map상의 각 픽셀에 산사태 발생확률 값을 직접 제공함으로써 hazard map을 작성한다. 이를 위해 사용되는 통계 기법의 예로는, bayesian 이론(Chung & Fabbri, 1999), 로지스틱 회귀 분석(이사로 외, 2000), 몬테카를로 시뮬레이션(Park, 1999) 등이 있다.

### 3. 로지스틱 회귀분석

산사태의 발생은 성공과 실패의 값을 가지는 범주형 자료의 반응변수이다. 따라서 단순회귀분석의 방법으로는 이 변수의 특성을 설명할 수 없다. 표 1은 각각의 설명변수 및 반응변수에 따라 다르게 적용되는 여러 모형들을 나타낸다.

<표 1> 설명변수와 반응변수에 따른 자료분석의 종류

반응변수 \ 설명변수	범주형	연속형	복합형
범주형	로지스틱회귀모형 로그선형모형	로지스틱회귀모형	
연속형	분산분석	회귀분석	공분산분석

표 1에서 보는 바와 같이, 로지스틱회귀모형은 설명변수들이 범주형으로만 이루어져 있으며, 이에 대한 반응변수가 범주형으로 나타나는 경우에 적용되는 모형이다. 다시 말해서, 성공, 실패 등과 같이 반응범주의 개수가 두 개이거나 순서형의 범주를 갖는 범주형 자료들을 범주형의 설명변수들을 이용하여 설명하고자 하는 경우에 로지스틱회귀모형이 사용된다. 반면에 로지스틱회귀모형은 설명변수가 연속형 자료라는 점에서 로지스틱회귀모형과 차이를 보인다. 두 모형을 통틀어서 로지스틱회귀모형이라고 부르기도 한다. 이들 모형의 기본이 되는 함수는 로지스틱 함수로서 그림 2와 같이 표현이 되며, 그림 2에서 보는 바와 같이 z의 값이 음의 무한대로 갈수록 함수값은 0으로 수렴하고, 반대로 z값이 양의 무한대로 갈수록 함수값은 1로 수렴하는 특징을 보인다. 이러한 특성은 어느 사건의 발생 유무를 확률로 변환시킬 수 있는 장점이 있으며, 실제의 회귀는 로짓(logit)으로의 변환을 거쳐서 회귀가 이루어진다. 로짓은

$$\log \frac{p}{1-p}$$

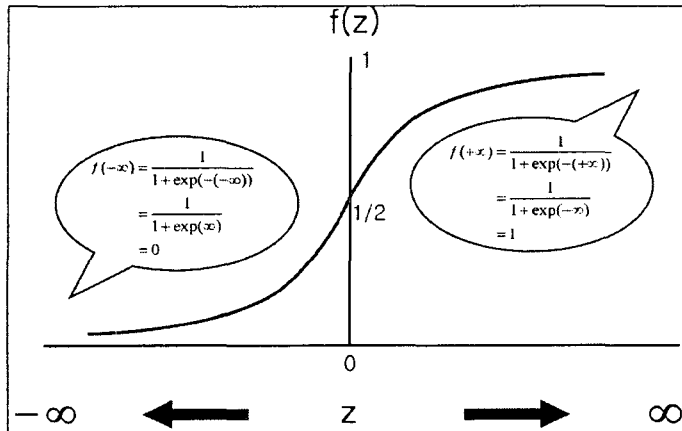
로 정의된다.

이러한 로짓에 대해 적절한 회귀식( $\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots$ )을 구할 수 있다. 즉, 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\log \frac{p}{1-p} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots$$

이 식을 통해 특정 사건이 발생할 확률을 다음과 같이 도출해 낼 수 있다.

$$p = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots)}$$



<그림 2> 로지스틱 함수

실제로 산사태와 강수량과의 관계를 로지스틱회귀분석을 통해서 수행하였다. 이 분석을 위해서 1995년부터 2001년 8월까지의 전국 69개 지역의 기상청자료와 산사태 발생 보도자료를 이용하였다. 산사태 발생 자료는 국내 4대 일간지의 기사검색을 통해서 얻어진 것이다. 즉, 산사태가 발생하였지만 인명 혹은 재산피해가 발생하지 않은 경우는 보도가 될 가능성이 없으므로, 산사태 발생으로 인해 인명 혹은 재산피해가 발생한 경우만을 포함하고 있다. 또한 로지스틱 회귀분석의 특성상 강우가 있었음에도 불구하고 산사태 발생 기록이 없는 경우도 함께 포함하여, 통계분석 프로그램인 SAS v.8.1을 사용하여 분석을 수행하였다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻었으며, 이 결과에 따르면 1일 최대강우량이 300mm이면 전국의 어딘가에서 산사태가 발생할 확률이 80%를 넘으며, 3일간 누적강우량이 500mm를 넘는 경우에도 마찬가지로 확률이 도출된다. 이는 다소 보수적인 값이며, 이는 실제 인명 및 재산피해를 일으킨 산사태만을 토대로 분석하였다는 점에 기인한다.

$$Z = 0.0301 \times \text{1일 최대강우량} - 7.6028$$

$$Z = 0.0188 \times \text{3일 누적강우량} - 7.9210$$

$$Z = 0.0127 \times \text{1일 최대강우량} + 0.0142 \times \text{3일 누적강우량} - 7.9645$$

<표 2> 1일 최대강우량과 3일 누적강우량의 각각의 요인에 따른 예상 파괴확률

강우량 (mm)	50	75	100	125	150	200	300	400	500	600	800
1일 최대강우량인 경우 (%)	0.2	0.5	1.0	2.1	4.4	17.0	80.7	98.8	99.9	99.9	99.9
3일 누적강우량인 경우 (%)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	1.5	9.3	40.1	81.4	96.6	99.9

<표 3> 1일 최대강우량과 3일 누적강우량을 함께 고려한 경우의 예상 파괴확률

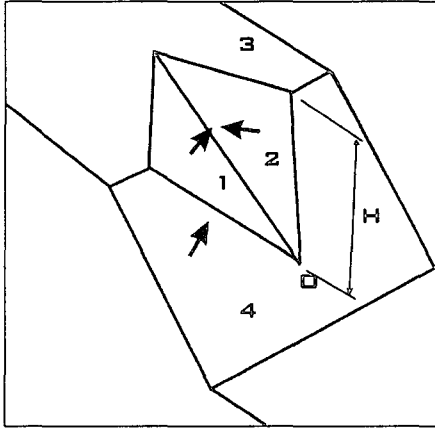
	1일 최대 강우량									
	0	50	80	100	150	200	300	400	500	700
3일 누적 강우량	50	0.1	.	.	.	.	.	.	.	.
	80	0.2	0.3	.	.	.	.	.	.	.
	100	0.3	0.4	0.5	.	.	.	.	.	.
	150	0.6	0.8	1.0	1.9	.	.	.	.	.
	200	1.1	1.6	2.1	3.8	7.0	.	.	.	.
	300	4.4	6.4	8.1	14.2	23.8	52.6	.	.	.
	400	16.1	22.0	26.6	40.6	56.4	82.1	94.2	.	.
	500	44.3	53.8	60.0	73.9	84.2	95.0	98.5	99.6	.
	700	93.2	95.2	96.3	97.9	98.9	99.7	99.9	99.9	99.9
	1000	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9

위의 결과를 이용하여 최대강우량도를 나타내는 레이어를 통해 각 지역의 전반적인 산사태 발생확률을 도출해 낼 수 있다. 또한 1일 최대강우량과 3일 누적강우량을 함께 고려한 다중 로지스틱 회귀분석의 결과에서 각 변수 앞의 계수는 각 변수들이 반응변수에 주는 영향의 정도를 상대적으로 나타내기 때문에, 다른 변수와의 다중회귀분석을 통해 레이어 중첩시에 사용되는 가중치의 설정에 근거를 제시해 줄 수 있다.

#### 4. 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo simulation)

몬테카를로 방법은 시간의 개념이 포함되지 않은 확률적이거나 확정적인 형태의 문제를 풀기 위해 난수를 발생시켜 사용하는 방법이다. 몬테카를로 방법이 단지 개략적인 수량 추정에 지나지 않는다고 반박한다. 이처럼 이 방법으로 신뢰성이 있는 해를 구하자면 매우 많은 횟수의 반복이 필요하다는 것과 시간이 지남에 따라 생기는 변화를 고려하지 않았다는 점이 이 방법의 단점이다. 하지만 이러한 방법을 이용해서, 분석에 사용되는 각각의 변수들에 대해 측정된 분포특성으로부터 무작위로 하나의 수치를 적용시켜 한 반복을 수행하고, 또다시 다른 값들을 무작위 추출하여 반복을 수행한다. 이러한 과정을 충분히 많이 반복하여 파괴확률(probability of failure)을 도출해 낼 수 있다.

실제 적용을 위해 암반사면의 썩기파괴에 대한 안전율을 구하는 방법 중 흔히 이용되는 방법인 Hoek and Bray(1981)가 제안한 간략해법을 사용하였다. 썩기파괴는 교차하는 2개의 불연속면, 경사면, 사면 상부 면으로 이루어진 사면체형의 썩기가 미끄러짐으로 인해 발생되는데, 이 해법에서는 회전과 전도의 파괴는 고려하지 않고 있다. 이 해법에 사용되는 썩기의 기하학적인 모형은 그림 3과 같다. 또한 이 문제를 풀 때 필요한 자료는 암석의 단위중량  $\gamma$ , 두 불연속면의 교선과 경사면이 만나는 점 O에서부터 사면상단까지의 높이 H, 각 면의 경사  $\beta$  및 경사방향  $\alpha$ , 불연속면 1, 2에 대한 점착력 c와 마찰각  $\phi$  등이다. 분석대상지역은 중앙고속도로 금호기점 5.5km지점부터 31km지점까지 공사 현장으로서, 유명환(2000)이 구간내 모든 사면에 대해 조사한 자료를 토대로 분석을 수행하였다. 조사자료의 평균값으로부터 Fisher 분포를 따르는 절리방향을 임의로 10000개 생성시킨 후, 이를 이용해서 기하학적 안전율을 구한다. 그 중 안전율이 1이하로 떨어지게 되는 회수를 이용하여 파괴확률을 도출한다. 그 결과는 아래 표 4와 같다. 이는 단순한 절리의 방향성만을 이용한 파괴확률이므로, 절리의 방향성에 기인한 파괴확률 외의 다른 요인들(사면높이, 암석의 강도, 강우의 정도 등)을 고려한 다른 레이어들과의 중첩을 통해서, 보다 많은 요인들이 포함된 산사태 위험도를 구축할 수 있다.



<그림 3> Hoek and Bray의  
간편해법의 썩기모형

<표 4> 각 사면에서 최대 파괴확률값을 보이는 절리 조합과 파괴확률값

Slope ID	Probability (%)	Joint	Slope ID	Probability (%)	Joint
A-1	10.8	J1 & J2	B-8	32.8	J1 & J2
A-2	3.0	J1 & J2	B-12	33.2	J1 & J2
A-3	10.5	J1 & J2	B-13	33.6	J1 & J2
A-4	18.2	J1 & J2	B-15	38.9	J1 & J2
A-5	4.7	J1 & J3	B-16	30.2	J1 & J3
A-6	13.5	J1 & J3	B-17	4.3	J2 & J3
A-8	45.3	J1 & J3	B-18	54.7	J1 & J3
B-2	33.3	J1 & J2	B-19	20.0	J2 & J3
B-3	13.2	J1 & J3	B-20	12.6	J1 & J2
B-4	3.8	J2 & J3	B-21	28.8	J1 & J2
B-5	14.4	J1 & J2	B-22	30.1	J1 & J3
B-6	9.4	J1 & J2	B-23	12.5	J1 & J2
B-7	40.1	J1 & J2	B-24	24.5	J2 & J3

## 5. 결론

산사태 분석은 공간상의 여러 변수들의 관계에 대한 분석이라는 점에서 GIS를 이용한 분석방법이 적절하다. 이러한 GIS 이용에 있어, 산사태 위험도의 레이어 상의 각 픽셀에 대해 파괴확률의 값을 나타내어야 하며, 그 확률이라는 수치를 위해서는 통계적 기법의 사용이 필요하다. 그 적용의 예로서, 로지스틱 회귀분석은, 다중 로지스틱 회귀분석과 같이 여러 변수들의 영향정도를 비교함으로써 가중치 선정에 대한 기준을 제공해 주기도 하며, 주어진 설명변수 조건에 따라 직접적으로 확률을 제시해 주기도 한다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션은 데이터의 불확실성을 동시에 고려해 줄 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 GIS를 이용한 산사태 관리의 지속적인 체계 유지와, 보다 향상된 분석결과를 위해서는, 지형도, 지질도, 주제도와 같은 기본 레이어, 여러 통계기법을 이용한 결과, 그리고 landslide inventory와 같은 실제 발생데이터들에 대한 데이터베이스의 구축을 필요로 한다.

## 감사의 글

본 연구는 1999년 한국과학재단 국제공동연구비 (995-0400-002-2, 한국-체코 국제공동연구 "한국의 산사태와 GIS 응용에 관한 연구")의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드린다.

## 참고문헌

1. 이사로, 김윤중, 민경덕, 2000, 산사태 공간 정보시스템 개발 및 산사태 공간 정보의 활용, 한국 GIS 학회지, 제8권, 제1호, pp.141-153.
2. 유명환, 2000, GIS를 이용한 사면위험도 작성기법 연구, 공학석사논문, 서울대학교, 74pp.
3. Chung, C.F. and Fabbri, A.G., 1999, Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 65, No. 12, Dec. 1999, pp.1389-1399.
4. Einstein H.H., 1988. Landslide Risk Assessment Procedure, In: Proc. Fifth International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol.2, pp.1075-1090.
5. Fisher, R. 1953, Dispersion on a sphere, Proceedings of the Royal Society of London, A217, pp.295-305.
6. Hoek, E., Bray, J. W. 1981, Rock slope engineering, The institution of mining and metallurgy, pp. 408-413. Leung, C.F. and Quek S.T., 1995, Probabilistic Stability Analysis of Excavations in Jointed Rock, Can.



- Geotech. J., vol. 32, pp.397-407.
7. Park, H. J., 1999, Risk Analysis of Rock Slope Stability and Stochastic Properties of Discontinuity Parameters in western North Carolina, Ph. D. Thesis, Purdue University, 369pp.
  8. Priest, S. D., Discontinuity Analysis for rock engineering, 1993, Chapman and Hall, 466pp.
  9. Varnes, D.J., 1984, Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practices, UNESCO Press, Paris, 63pp.