

## GIS를 활용한 무한사면 안정성 해석 기법 연구

### GIS based Infinite slope stability analysis : case study of boeun area

이연희<sup>1)</sup>, Yeon-Hee Lee, 정영국<sup>1)</sup>, Young-Kook Jung, 박혁진<sup>1)</sup>, Hyuck-Jin Park, 이사로<sup>2)</sup>, Sa-Ro Lee, 장범수<sup>1)</sup>, Buhm-Soo Chang, 전귀현<sup>1)</sup>, Gui-Hyun Juhn

<sup>1)</sup> 한국시설안전기술공단 기술개발실, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 국가지질자원정보센터, National Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mine

**SYNOPSIS** : Traditionally, the statistical methods analyze the relationship between landslide occurrence and related factors(soil depth, soil strength, slope angle, vegetation, etc.) in GIS technique. However, those methods have no mechanical meaning. Therefore, the deterministic model is suggested in this research. The method analyzes the mechanical equilibrium of a potential slide block and then calculates a slope safety factor. Since this method is able to consider the balance of forces applied to the slope and is a more reasonable method for an individual site. In this research, the spatial data is obtained, managed and analyzed using GIS technique. The infinite slope model is used to evaluate factor of safety and analyze the slope stability.

Key words : Landslide, GIS, Mechanical equilibrium analysis, Potential slide block, Slope safety factor

## 1. 서론

우리나라는 전국토의 70%가 산지로 덮여 있어 70년대부터 시작된 급격한 국토개발의 영향으로 전국 곳곳에서 산을 절취하고 땅을 메우는 공사들이 지속되었고, 도시의 급격한 팽창과 더불어 산비탈을 깎고 축대를 쌓아 집을 지은 결과, 도심지 곳곳에서는 축대의 붕괴사고 등이 매우 빈번하게 유발되었다. 최근들어 자주 발생하는 집중호우로 인해 산비탈이 갑작스럽게 붕괴되는 산사태도 빈번히 발생되고 있다. 최근의 집중호우로 인한 산사태는 1996년, 1998년, 1999년 그리고 2002년도에 다수 발생하였고, 본 연구지역인 보은은 1998년에 대규모의 산사태가 발생하였으며 이로 인한 인명피해도 컸다. 이러한 피해를 줄이기 위해서는 산사태에 대한 과학적인 분석을 통해 사전에 산사태 예상지역 및 위험지역을 미리 예측하고 이에 대한 적절한 대책을 세운다면, 산사태로 인한 피해를 많이 줄일 수 있다. 그러나 산사태에 대한 대책은 발생 이후의 피해 복구에 치중되어 있고, 또한 피해 복구를 위해 피해 지역의 위치, 규모와 같은 정보를 얻기까지는 많은 시간, 인력, 비용이 필요한 실정이다. 이러한 상황에서 산사태의 과학적인 분석은 그 필요성이 크며, 특히 GIS를 이용한 각종 분석 기술들이 연구되고 있다(Gokceoglu and Aksoy 1996; Chung and Fabbri, 1999; Guzzetti and others 1999; Luzi and others, 2000; 이사로, 2000; 이사로와 민경덕, 2000). 이에 본 연구에서는 GIS를 이용한 무한사면에서의 안정성 해석 기법을 적용하고 검증해 보았다. 연구대상 지역은 1998년 여름철 집중호우시 많은 산사태가 발생한 충청북도 보은군을 대상으로 하였으며, 지리좌표상으로 동경 127도 39분 36초~127도 45분 00초, 북위 36도 25분 21초~36도 30분 00초에 해당한다. 본 연구에서의 공간 자료 수집 및 분석을 위해 먼저 연구지역인 충청북도 보은군에 대한 현장조사에 앞서 항공사진을 이용 산사태 발생위치를

파악하였으며 현장에서는 GPS를 이용, 그 발생위치를 기록하여 데이터베이스로 구축하였다. 그리고 GIS 프로그램을 이용하여 산사태와 관련이 있는 1:5,000 지형도, 1:25,000 정밀토양도, 1:25,000 임상도, 1:50,000 지질도를 ARC/INFO 커버리지 형태의 공간 데이터베이스로 구축하였다. 이렇게 수집하고 분석된 공간자료에 한계평형식 등을 이용한 무한 사면에서의 안정해석 기법을 적용하고 검증하였다.

## 2. GIS를 이용한 공간자료 적용 및 무한 사면의 안정성 해석 기법

### 2.1 무한 사면에서의 안정해석 기법

산사태가 발생하는 사면의 안정성을 해석하기 위한 방법으로 활동하는 흩덩이의 깊이가 비교적 얇은 무한사면(infinite slope)을 이용하였다. 무한사면의 안정성 해석은 병진활동을 하는 것으로 가정하여 안정해석을 하며, 또한 활동면이 비교적 길다면 활동면의 시점과 종점에서의 단영향은 무시할 수 있으므로 해석방법이 비교적 단순하다. 그림 1을 보면 무한사면에서 지하수면은 지표면과 평행하고 활동면 위로  $mz$ 되는 위치에 있고, 비탈면에 평행한 방향으로 정상 침투가 일어난다고 가정했다. 단위길이의 폭을 가지는 한 방향을 고려하고 이 절편의 연직면에 작용하는 횡방향력을 무시하면

$$N = W \cos i = [(1 - m)\gamma_t + m\gamma_{sat}]z \cos i$$

$$\sigma = \frac{N}{\sec i} = [(1 - m)\gamma_t + m\gamma_{sat}]z \cos^2 i \quad (1)$$

$$T = W \sin i = [(1 - m)\gamma_t + m\gamma_{sat}]z \sin i$$

$$N = \frac{T}{\sec i} = [(1 - m)\gamma_t + m\gamma_{sat}]z \sin i \cos i \quad (2)$$

그런데 유선망으로부터

$$u = mz\gamma_w \cos^2 i \quad (3)$$

Mohr - Coulomb식은

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$$

이므로 전단강도에 대한 안전율은

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\tau} \quad (4)$$

가 된다. 식 (1), (2), (3)에서 구한  $\sigma, \tau, u$ 를 식 (4)에 대입하면 무한사면의 활동에 대한 안전율을 계산할 수 있다. 만일  $c' = 0$ 이고 지하수위가 활동파괴면 아래에 있다면  $m = 0, u = 0$ 이므로 윗 식은 다음과 같이 간단해진다.

$$F_s = \frac{\tan \phi}{\tan i} \quad (5)$$

이 식을 보면, 지하수위가 지표면에서 상당히 깊게 있는 사질토의 무한사면에 있어서는  $\phi$ 가  $i$ 보다 크

면 그 비탈의 안정이 유지된다는 것을 알 수 있다. 또한  $c = 0$  일 때에는 안전율은 파괴면의 깊이  $z$ 와 무관하다는 것을 유의할 수 있다.

만일 지하수위가 지표면과 일치하고 (즉  $m = 1$ )  $c' = 0$  이라면 이 경우에 대한 안전율은

$$F_s = \frac{(m \gamma_{sat} z \cos^2 i - m \gamma_w z \cos^2 i) \tan \phi'}{m \gamma_{sat} z \sin i \cos i} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_{sat}} * \frac{\tan \phi'}{\tan i} \quad (6)$$

가 된다. 식(5)와 식(6)을 비교해 보면, 지하수위가 지표면과 일치할 때에는 지하수위가 파괴면내에 없을 때보다 안전율은 대략 반으로 감소한다는 것이 분명하다. 왜냐하면 식(6)의  $\gamma_{sub}/\gamma_{sat}$ 는 대략 1/2이기 때문이다. 따라서 이 경우에 비탈이 안정할 수 있는 경사각은 침투가 없을 때에 비해 약 1/2밖에 되지 않는다.  $c' > 0$  일 때에는 안전율은 활동면 까지의 깊이  $z$ 에 의존하며 비탈의 경사각  $i$ 가  $\phi'$ 보다 큰 경우라 하더라도 안정을 유지할 수 있다.

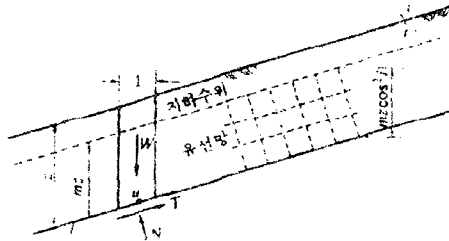


그림 1 무한사면의 활동

## 2.2 공간자료 및 GIS를 이용한 분석 기법

산사태 위험도 분석을 위하여 공간자료를 수집하였으며 D/B를 작성하여 필요한 요소를 추출하였다. 실제 발생한 산사태 지역의 확인은 항공사진분석과 현장조사를 수행하여 확인하였다. 이를 위하여 1:20,000 축척의 항공사진을 이용하였고 GIS와 결합하여 자료를 획득하였다. 기존에 발생한 산사태의 위치 검증은 위하여 각각 1996년과 1999년에 연구지역을 대상으로 촬영한 항공사진을 이용하였다. 산사태의 위치는 두 사진을 비교하고 현장을 직접 방문하는 과정을 통해 확인하였다. 최근 발생한 산사태는 녹지의 손상, landslide scar와 같은 지형학적인 특성 그리고 토양이 드러나 있는 등 항공사진을 통해 확인 가능하다. 총 483개의 산사태가 확인되었으며 그 총면적은 68.43km<sup>2</sup>에 이른다. 공간자료는 1:5,000 축척의 지형도, 1:25,000 축척의 토양도, 1:50,000 축척의 지질도를 사용하였으며 지형도로부터 고도, 경사, 경사방향 등을 획득하였다. 토양도로부터는 soil texture, 토질, 유효심도 등을 획득하였고, 구성 암반에 관련자료는 지질도로부터 획득하였다. 그리고 안전율 해석에 필요한 파라미터는 기존의 연구자료를 이용하여 통일분류에 따른 단위체적중량, 내부마찰각, 점착력 등을 추정하였다(표 1). 표 1에서 추정된 통일분류법을 본 연구지역에 대한 개략 토양도(그림 2)에 적용하여 연구지역에 대한 단위체적중량, 내부마찰각, 점착력 등을 추정하였으며 이를 이용하였다(표 2). 토양 두께는 유효토심을 이용하여 추정하였다. 그리고 이렇게 추정된 값과 경사도(그림 3)를 함께 이용하여 무한사면에 대한 안전율 값을 계산하였다. 이러한 공간자료를 이용하여 무한사면에서의 안정해석 기법을 보은 지역에 적용하고 검증하였다. 보은 지역의 안전율 분포도는  $m = 0$ 인 경우 즉 건조한 경우,  $m = 0.5$ 인 경우 즉 집중호우로 인해 지하수위가 올라온 경우,  $m = 1$ 인 경우 즉 토양이 포화된 상태를 가정하여 세 가지에 대해 각각 안전율도를 작성하였고, 그 결과는 그림 4와 같다. 그리고 이를 기존의 산사태 자료를 이용하여 검증한 결과는 그림 5와 같다. 분석결과의 비교를 위하여 기존에 개발된 산사태의 우도비를 이용한 산사태 예측기법(장범수 외 2002)을 이용하여 동일한 현장에 적용해 보았다. 검증결과 우도비를 사용하였을 경우

보다 전체적으로 예측도가 낮게 나타났다. 이는 우도비 방법이 산사태 비교 자료를 사용하였고, 무한사면 안전율 해석 기법보다 식생, 지질, 토지이용 등 더 많은 자료를 사용하여서 예측도가 좀더 근접하여 나타난 것으로 사료된다.

표 1 도로설계요령(한국도로공사, 2001)

종 류	재료의 상태	단위체적중 (t/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 $\phi$	점착력 C (t/m <sup>2</sup> )	분류기호 (통일분류)	
자연지반	자갈	밀실한 것 또는 입도가 좋은것	2.0	40	0	GW
		밀실하지 않은 것 또는 입도가 나쁜것	1.8	35	0	GP
	자갈섞인 모래	밀실한 것	2.1	40	0	GW
		밀실하지 않은 것	1.9	35	0	GP
	모래	밀실한 것 또는 입도가 좋은것	2.0	35	0	SW
		밀실하지 않은 것 또는 입도가 나쁜것	1.8	30	0	SP
	사질토	밀실한 것	1.9	30	3 이하	SM
		밀실하지 않은 것	1.7	25	0	SC
	점성토	굳은 것(손가락으로 눌러 조금 들어감)	1.8	25	5 이하	ML
		약간 무른 것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)	1.7	20	3 이하	CL
		무른 것 (손가락으로 쉽게 들어감)	1.7	20	1.5 이하	CL
	점토 및 실트	굳은 것(손가락으로 눌러 조금 들어감)	1.7	20	5 이하	CH
약간 무른 것(손가락 중간정도의 힘으로 들어감)		1.6	15	3 이하	MH	
무른 것 (손가락으로 쉽게 들어감)		1.4	10	1.5 이하	ML	

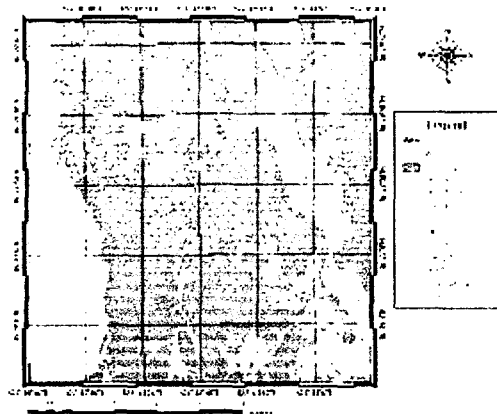


그림 2 개략도양도

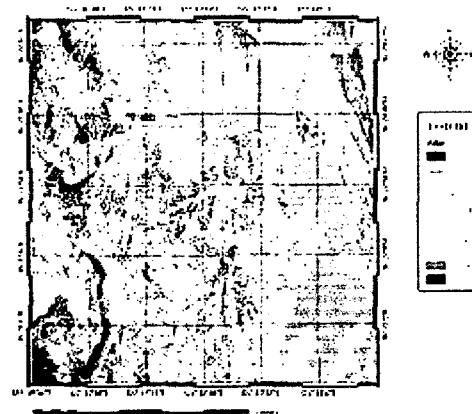
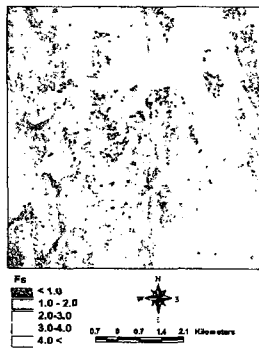


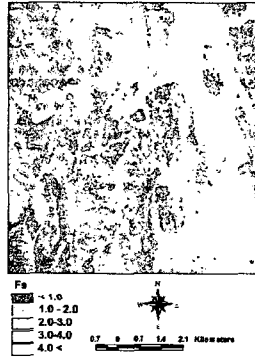
그림 3 경사도

표 2 개략도양도에 해당하는 통일분류 기준

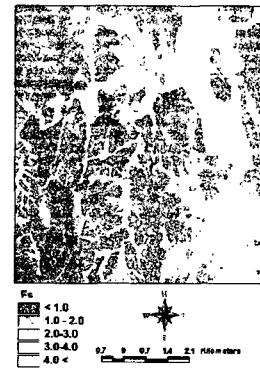
기호	도양명	배수	토질	통일분류
Afa	충적토	배수 약간 양호 내지 양호	사양질 내지 사질	SW, SM
Afb	충적토	배수 약간 불량 내지 불량	사양질 내지 사질	SW, SM
Afc	범람지 및 충적토	배수 약간 양호 내지 매우양호	사질 내지 사양질	SW, SM
Afd	범람지 및 충적토	배수 약간 양호 내지 매우 양호	사질 내지 사양질	SW, SM
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
Rva	적황색토 및 압쇄토	배수 양호	식양질	SC
Rvb	적황색토	배수 양호	식질 내지 식양질	CL, SC
Rvd	적황색토	배수 양호	식질 내지 식양질	CL, SC
Rxa	회색토및충적토,저구릉곡간	배수 불량 내지 약간 양호	식양질 내지 식질	SC, CL



(a)  $m = 0$  인 경우

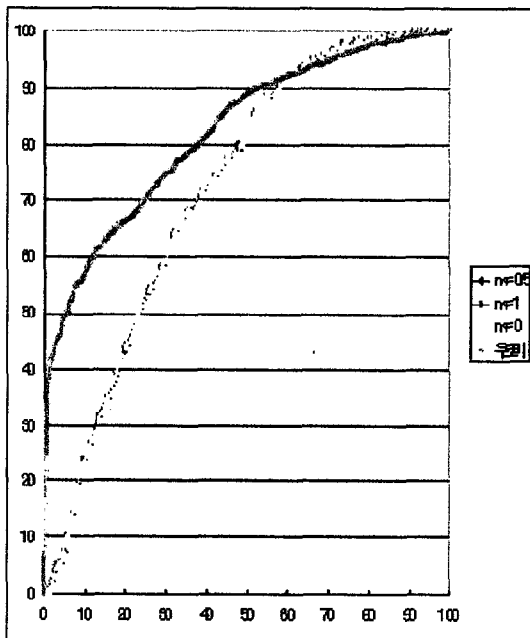


(b)  $m = 0.5$  인 경우

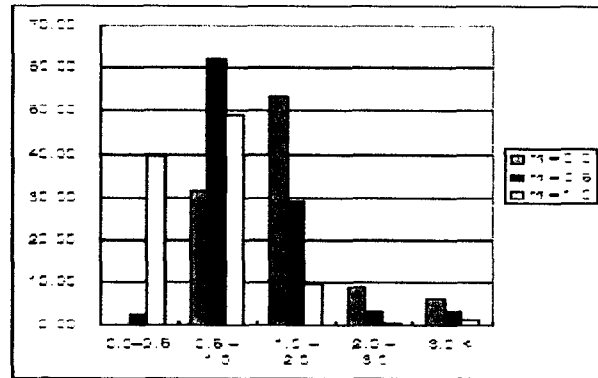


(c)  $m = 1$  인 경우

그림 4 보은지역의 사면 안전율 분포도



(a) Success rate curve method



(b) 각 안전율에 포함된 산사태 개수

그림 5 보은지역의 안전율 분포도 검증 결과

안전율	$m = 0.0$ 인 경우 산사태 발생 개수 비율(%)	$m = 0.5$ 인 경우 산사태 발생 개수 비율(%)	$m = 1.0$ 인 경우 산사태 발생 개수 비율(%)
0.0 - 0.5	0.00	2.30	39.39
0.5 - 1.0	31.46	61.89	49.10
1.0 - 2.0	53.45	29.16	9.46
2.0 - 3.0	8.95	3.33	0.52
3.0 <math></math>	6.14	3.32	1.53

표 3 보은 지역의 안전율 분포에 따른 산사태 발생 개수 비율

### 3. 결론

본 연구에서는 한계 평형식과 GIS를 이용한 공간자료 적용분석기법을 이용하여 무한사면에서의 안정해석기법을 보은 지역을 대상으로 적용하여 안전율을 계산하였다. 그림 4에서 점으로 표시된 위치가 실제 산사태가 발생한 것으로 확인된 지점으로 산사태가 발생한 지점과 그 지점에서 무한사면을 이용하여 획득한 안전율을 비교해 보았다. 표 3에서 보인바와 같이 지하수위가 고려되지 않은 상태에서 안전율이 0~0.5 정도로 계산된 지역내에서는 실제 산사태가 전혀 발생하지 않았다. 반면, 지하수위를 사면의 높이와 동일하게 설정하여 포화된 것으로 고려한 경우 안전율이 0~0.5로 계산된 지역에서 실제 산사태가 발생한 경우는 39.4%에 달하고 있다. 계산 결과,  $m = 0$ 인 경우 즉 건조한 경우이면서 안전율이 1이하 일때 산사태 발생 개수 비율이 31.46%,  $m = 0.5$ 인 경우 즉 집중호우로 인해 지하수위가 올라온 경우이면서 안전율이 1이하 일때 산사태 발생 개수 비율이 64.19%,  $m = 1$ 인 경우 즉 토양이 포화된 상태로서 안전율이 1이하 일때 산사태 발생 개수 비율이 87.49%로 나타났다. 즉, 보은지역의 산사태가 집중호우에 의해 발생한 상황임을 감안해 보면 토양이 포화된 상태인  $m=1$ 인 경우, 본 연구에 의해 제안된 무한 사면 모델과 GIS 기법을 이용한 공간자료 추출 기법이 산사태 예측에 있어 활용가능함을 보이고 있다.

### 참고문헌

1. 이사로 (2000), “지리정보시스템(GIS)을 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구”, 연세대학교 박사학위 논문, 163p
2. 이사로, 민경덕 (2000), “공간 데이터베이스를 이용한 1991년 용인지역 산사태 분석”, 대한자원환경지질학회지, 제 33권 제 4호, pp.321-332
3. 이승래, 이성진, 변위용, 장범수 (2001), “화강풍화토 지반의 불포화 특성을 고려한 최적화 기법에 의한 사면안정해석 방법”, 한국지반공학회논문집, 제 17권, 제 6호, pp.123-133
4. 장범수, 박혁진, 이사로, 최재원 (2002), “지형정보 시스템 및 베이지안 확률기법을 이용한 보은 지역의 산사태 취약성도 작성”, 2002년 사면안정 학술발표회, pp.27-35
5. Chung, F. C. and Fabbri A. G. (1999), “Probability prediction models for landslide hazard mapping”, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 65(12), pp.1389-1399
6. Gokceoglu C, Aksoy H (1996), “Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques”, Engineering Geology, 44, pp.147-161
7. Guzzetti F, Carrarra A, Cardinali M, Reichenbach P (1999), “Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy”, Geomorphology, 31, pp.181-216
8. Luzi L, Floriana P (1996), “Application of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (a:50,000 Fabriano geological map sheet)”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 15, pp.83-94.