

무한사면해석기법과 GIS를 이용한 사면 재해 위험성 분석 및 검증

박혁진^{1*} · 이사로² · 김정우¹

¹세종대학교 지구정보공학과, ²한국지질자원연구원

Analysis and Verification of Slope Disaster Hazard Using Infinite Slope Model and GIS

Hyuck Jin Park^{1*}, Saro Lee² and Jeong Woo Kim¹

¹Dept. of Geoinformation Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

Slope disaster is one of the repeated occurring geological disasters in rainy season resulting in about 23 human losses in Korea every year. The slope disaster, however, mainly depends on the spatial and climate properties, such as geology, geomorphology, and heavy rainfall, and, hence, the prediction or hazard analysis of the slope disaster is a difficult task. Therefore, GIS and various statistical methods are implemented for slope disaster analysis. In particular, GIS technique is widely used for the analysis because it effectively handles large amount of spatial data. The GIS technique, however, only considers the statistics between slope disaster occurrence and related factors, not the mechanism. Accordingly, an infinite slope model that mechanically considers the balance of forces applied to the slope is suggested here with GIS for slope disaster analysis. According to the research results, the infinite slope model has a possibility that can be utilized for landslide prediction and hazard evaluation since 87.5% of landslide occurrence areas have been predicted by this technique.

Key words : infinite slope model, GIS, slope disaster, mechanical model

사면재해는 강우기에 반복적으로 발생하는 지질재해의 하나로 우리나라의 경우 연평균 약 23명 정도의 인명피해가 사면재해로 인해 발생하고 있으며, 이는 자연재해로 인한 인명피해 중 약 25% 정도를 차지하는 수치이다. 그러나, 이러한 사면재해는 다양하고 복잡한 지질 및 지형 특성과 같은 공간적인 특성과 집중호우와 같은 기후특성에 의해 좌우되므로 사면재해 예측이나 위험성에 대한 정량적인 산정은 무척 어려운 실정이다. 따라서, GIS를 이용한 위험성분석이나 확률을 이용한 다양한 기법이 활용되고 있다. 특히, GIS를 이용한 기법은 광역적인 지역에 대하여 방대한 양의 자료를 효율적으로 처리 및 분석을 수행함으로써 사면재해 관련 연구에 폭 넓게 활용되고 있다. 본 연구에서 사용된 무한사면해석기법은 사면재해의 발생여부와 관련요인간의 연관성에 대한 단순한 통계적인 분석에 의한 기존 기법의 한계점을 보완하고 사면재해발생과 관련된 역학적인 검토를 수행하기 위하여 제안되었다. 본 연구 결과에 의하면 사면재해가 발생했던 지점과의 비교를 통하여 지반이 완전히 포화된 경우, 즉 $m=1$ 인 경우 무한사면모델에서 불안정하다고 해석된 지역에서 전체 사면재해의 87.5%가 발생하였음을 보여주고 있어 사면재해에 대한 해석기법으로서의 활용가능성을 보여주고 있다.

주요어 : 사면 재해, GIS, 무한사면해석기법, 사면재해 예측

1. 서 론

전 국토의 약 75%가 산지로 구성되어 있는 우리나라

는 매년 강우기에 사면재해가 반복적으로 발생하고 있다. 국립방재연구소의 통계에 의하면 사면재해로 인해 매년 약 23명의 인명피해가 발생하며 막대한 인명

*Corresponding author: hyjinpark@empal.com, Formerly of Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation.

및 재산피해가 발생했던 2002년 8월 초의 집중호우와 태풍 루사로 인해 발생한 전체 인명피해 210명 중 35.7%에 달하는 75명이 사면관련 재해에 의해 목숨을 잃은 것으로 집계되고 있어 사면재해의 심각성을 알 수 있다. 1996년 경기도 연천-철원지역 산사태, 1998년 충북 보은지역 및 경기도 장흥지역 산사태, 1999년 강원도 북부지방 산사태, 2002년 강릉지역 산사태의 예에서와 같이 최근들어 기록적인 집중호우가 빈번하게 발생하고 있으며, 이와 더불어 집중호우가 발생했던 지역에서 산사태가 집중적으로 발생하고 있다.

사면재해는 지질, 지형 및 식생 등의 다양한 공간적인 특성과 기후특성에 의해 좌우되므로 산사태를 예측하거나 그 위험성을 수량적으로 산정하기는 무척 어렵다. 또한, 광역적인 지역에 대한 방대한 양의 자료와 정보를 수집, 분석하여 결과를 획득하는 과정은 많은 노력과 시간이 요구되는 작업이다. GIS(지형정보시스템)의 이용은 이러한 문제점을 쉽게 해결할 수 있는 장점을 가지고 있어 광범위하게 이용되고 있는 추세이다.

GIS를 활용한 산사태의 위험성 평가기법에 관련된 연구는 국내외적으로 폭 넓게 진행 되고 있다. 국내에서는 연구 지역의 경사, 경사방향, 지질 및 토질, 토지 이용 등 5개 요인에 대하여 GIS를 이용하여 중첩분석을 수행하고 산사태의 발생 가능성을 분석하였으며(김운중 등, 1994), 산사태 밀도, 지표유출량, 선구조의 길이 및 밀도, 지형 경사, 지질, 토양 등 6개 요인을 대상으로 GIS를 이용하여 충남 서천지역에 적용하였다(김원영 등, 1996). 그 밖에도 지형, 토양, 임상 및 지질과 관련된 14개 요인으로부터 통계 및 인공신경망 분석을 통해 산사태 취약성 분석을 시도하였다(이사로, 2000). 이러한 예는 외국의 여러 사례에서도 찾아 볼 수 있다(Gorceoglu and Aksoy, 1996; Luzi and Floriana, 1996; Randall *et al.*, 2000; Mandy *et al.*, 2001).

GIS를 이용한 산사태 예측기법은 통계적 기법(statistical method)과 확정적 기법(deterministic model)으로 구분할 수 있다. 통계적 기법은 산사태 발생과 발생을 유발하는 요인들(토양심도, 토양 강도, 사면경사, 식생 등) 사이의 연관성을 분석하고 대상지역에서의 적용을 통해 통합적인 평가 지수를 개발하여 인근지역에서 산사태의 위험도를 예측하는 기법이다. 이 기법은 GIS를 이용한 분석방법이 가지는 장점, 즉 대량의 공간자료와 광역적인 자료를 쉽게 가공하고 분석할 수 있다는 점을 효과적으로 활용할 수 있다. 반면 확정적 기법은 붕괴가능성이 있는 블록에 대한 역학적 상태를 분석하고 안전율을 계산하여 위험도를

평가한다. 즉, 지반의 물리적 특성을 파악하고 일정한 수학적 모델을 적용하여 안전율을 계산함으로써 산사태의 위험도를 예측하는 방법이다. 통계적인 기법이 역학적인 면에 대한 고려가 미흡한 반면 사면에 존재하는 힘들의 균형을 고려하는 확정적 기법은 개개의 지역에 대해 좀 더 합리적인 접근으로 이해된다. 그러나, 최근 산사태와 관련된 GIS기법의 응용은 주로 산사태의 발생과 산사태의 발생원인으로 파악되는 요인간의 정성적인 관계를 규명하기 위한 통계적인 방법에 한정되어 있으며, GIS의 응용은 주로 광역적인 자료의 처리와 분석에만 한정적으로 활용되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 GIS기법과 사면에 대한 역학적인 모델을 이용하여 산사태의 예측기법을 제안하였으며, 이를 국내의 산사태 현장에 적용하여 검증해 보았다.

2. 무한사면해석법을 이용한 산사태 모델

본 연구에서는 산사태의 발생에 대한 공학적인 접근 방식을 도입하여 발생가능성을 분석하고 위험도 평가 지수로서 안전율의 활용가능성을 파악하기 위해 무한사면해석기법을 적용하였다. 무한사면해석기법은 중력에 의한 불안정요소와 지표면과 평행한 파괴면에 작용하는 마찰과 점착력에 의한 안정요소의 균형을 기초로 한다. 무한사면은 움직이는 암체 혹은 토체의 깊이가 비교적 얇은 것으로, 토체가 병진운동을 하는 것으로 가정하여 안정해석을 수행한다. 이것은 붕괴심도가 그리 깊지 않은 국내의 산사태유형(국립방재연구소, 2000)과도 유사하여 적절한 모델인 것으로 파악되며, 또한 가장 폭 넓게 사용되는 모델의 하나이다(Kamai, 1991; Terlien, 1996; Pack *et al.*, 1998, 2001).

Fig. 1과 같이 무한사면에서 지하수위면은 지표면과 평행하고 미끄러짐면 위로 mz 되는 위치에 있으며 사면에 평행한 방향으로 정상투수가 발생한다고 가정한다. Fig. 1과 같이 단위길이의 폭을 가지는 한 절편을

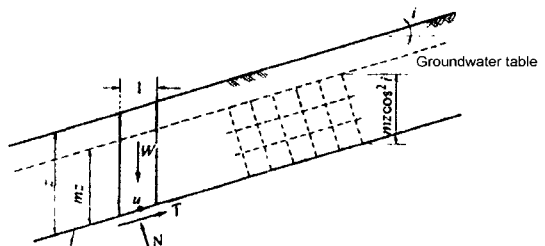


Fig. 1. Infinite slope model.

고려하여 이 절편의 연직면에 작용하는 횡방향의 힘을 무시하면, 절편 하부에 작용하는 수직응력과 전단응력은

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

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

$$T = W \sin i = [(1-m)\gamma_i + m\gamma_{sat}] z \sin i \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T}{\sec i} = [(1-m)\gamma_i + m\gamma_{sat}] z \sin i \cos i \quad (4)$$

그런데, 우선망으로부터

$$u = m z \gamma_w \cos^2 i \quad (5)$$

Mohr-Coulomb 식은

$$s = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (6)$$

이므로, 전단강도에 대한 안전율은

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{\tau} \quad (7)$$

이때 z 는 무한평면의 두께, i 는 사면의 경사, γ_{sat} 는 흙의 포화단위중량, γ_i 는 흙의 전체단위중량, γ_w 는 물의 단위중량, c 는 흙의 점착력, ϕ 는 마찰각이다.

본 연구에서는 산사태 발생에 대한 공학적인 분석을 위하여 식(7)을 분석모델로 사용하였으며, GIS를 이용하여 획득한 자료들을 이용하여 각 지점에 대한 안전율을 산정하였다.

3. 자료 수집 및 산사태 위치 파악

본 연구를 위해 1998년 8월 11일 일일 강우량 348 mm의 집중호우에 의해 많은 산사태가 발생했던 충청북도 보은지역을 대상지역으로 선정하였다. 연구대상지역의 산사태 분석에 필요한 관련 자료로서 산사태 위치 파악을 위한 항공사진 및 1:5,000 수치지형도와 산사태 발생요인 분석을 위한 1:5,000 지형도, 1:25,000 정밀토양도, 1:50,000 지질도 등을 이용하였다. 특히, 산사태 발생가능성의 예측을 위해서는 기존에 발생한 산사태의 정확한 위치 파악이 선행되어야 하며, 이를 위해 본 연구에서는 현지답사와 수치지형도를 활용한 항공사진 분석방법을 수행하였다.

3.1. 산사태 발생 위치 조사

산사태의 발생위치 파악을 위하여서는 산사태 발생지역을 현지 답사하여 그 결과를 지도에 표시하는 방

법이 가장 정확한 방법이다. 그러나, 산사태 발생지역을 방문하여 확인하는 작업은 많은 시간과 비용이 소요되며, 또한 산악지역의 경우 현장접근이 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 현실적인 제약으로 도로 주변이나 접근 가능한 지역에만 제한적으로 조사가 수행되며, 따라서 모든 산사태에 대한 현지조사가 불가능한 실정이다. 반면 항공사진 분석을 통한 산사태 위치 파악은 비교적 짧은 시간에 정확히 산사태 발생 위치를 파악할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 스캐닝되고 기하보정된 항공사진은 1:5,000 수치지형도와 비교하여 산사태로 인해 변화된 양상을 보다 정확히 파악할 수 있다. 본 연구에서는 1998년 보은 지역에 집중적으로 발생한 산사태를 1995년 및 1999년에 촬영된 사진을 이용하여 분석하였다. 항공사진 및 1:5,000 수치지도를 중첩하여 산사태로 보이는 것을 매핑하고 이를 현장 조사를 통해 확인하였다.

3.2. 공간 데이터베이스 구축

본 연구의 수행을 위하여 우선적으로 수집되어야 하는 공간자료는 실제 산사태의 발생위치 자료이다. 이 자료는 무한사면해석기법을 이용하여 획득된 산사태의 발생 가능성 결과를 실제 산사태 발생 여부와 비교함으로써 제안된 해석기법을 검증하기 위한 기초 자료로 활용된다. 따라서 산사태 발생위치 파악을 위해 항공사진을 이용하여 산사태 위치를 일차적으로 탐지하였고, 탐지된 산사태 발생위치의 정확성을 판단하기 위하여 현지답사를 통한 GPS 측량을 수행하여 산사태 위치도를 작성하였다. 작성결과 산사태가 일어난 개소

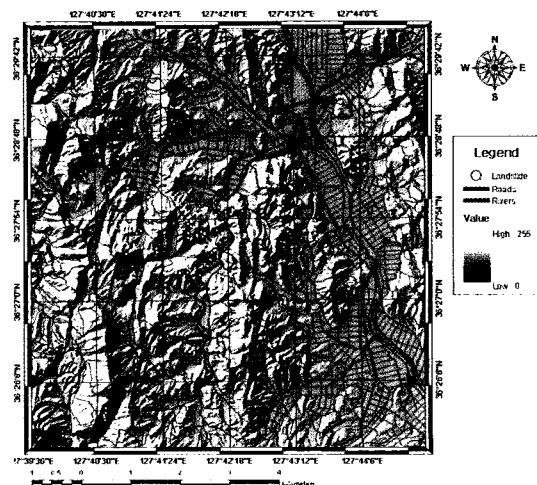


Fig. 2. Landslide location and hillshade map of Boeun area.

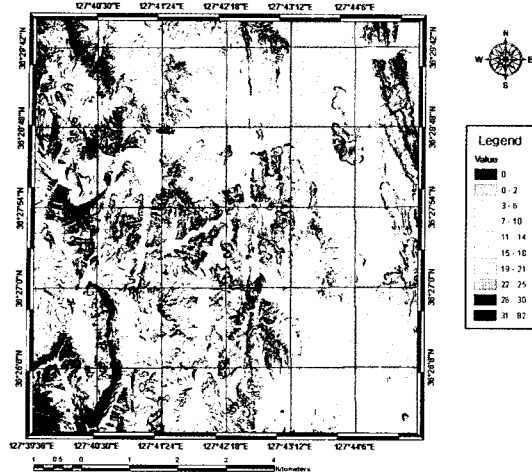


Fig. 3. Slope angle distribution in Boeun area.

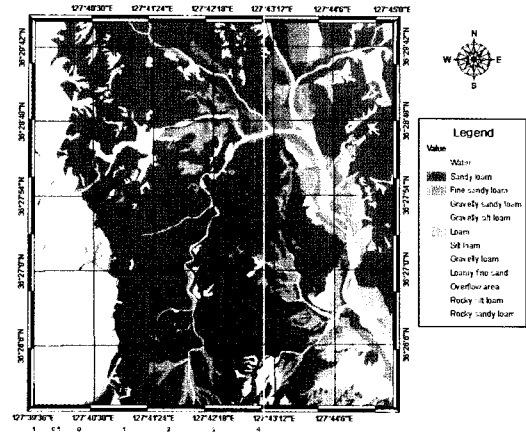


Fig. 6. Soil texture map in Boeun area.

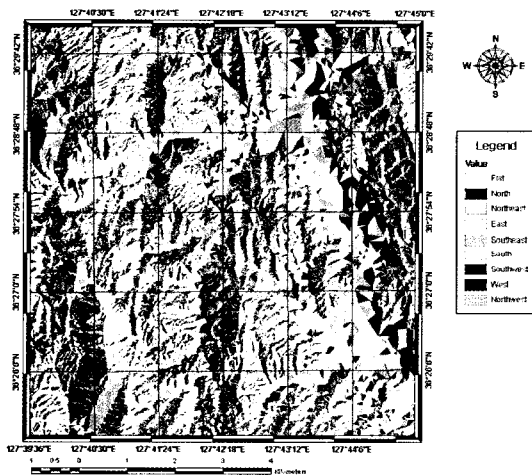


Fig. 4. Slope direction distribution in Boeun area.

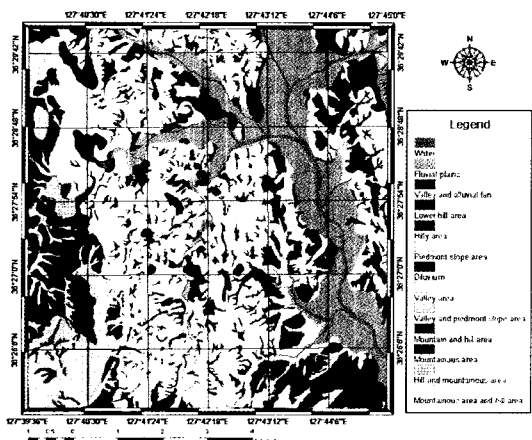


Fig. 5. Topographic map in Boeun area.

는 총 483개소로 확인되었으며, 총 면적은 68.43 km²에 이르는 것으로 파악되었다. 본 연구에서 파악한 산사태의 발생위치는 Fig. 2에 도시하였다.

또한 연구지역 내의 지형 특성, 특히 산사태가 발생할 수 있는 지역의 경사와 경사방향 등의 분포파악을 위해서는 수치화된 지형정보가 요구되며 이를 위하여 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 작성했다. DEM은 1:5,000 수치지형도를 이용하여 자료변환 후 내삽과정을 거쳐 작성하였으며 이렇게 작성된 DEM으로부터 경사도 분포(Fig. 3)와 경사방향 분포(Fig. 4)를 작성했다. 경사도는 지형의 기울기를 의미하며 경사방향은 지형사면의 자세, 즉 사면이 가르치는 방향을 의미한다. 이러한 자료는 무한사면 안정성의 해석을 위해 필요한 입력 자료로 사용된다.

본 연구지역 내의 토양특성은 1:25,000 축척의 정밀 토양도로부터 토양지형도(Fig. 5), 토질도(Fig. 6), 유효 토심도(Fig. 7) 등을 작성하였다. 토양지형도는 토양이 분포한 지역의 지형에 의해, 토질은 토양의 입자에 의해 각각 분류된 것이며, 유효토심은 토양의 유효두께를 나타낸다. 그 밖에 연구대상 지역의 지질특성자료를 파악을 위해 1:50,000 축척의 지질도로부터 암상분포(Fig. 8)를 구축하였다. 모든 자료의 공간해상도는 5m×5m로 구성되었으며, 연구지역의 격자 개수는 2,735,776개소이다.

GIS를 이용한 통계적인 해석 기법에서는 산사태의 발생과 관련 있는 영향인자를 찾기 위해 상당히 방대한 양의 자료가 요구된다. 특히, 산사태와 토양과의 연관성이나 암상과의 연관성은 이미 오래전부터 논의되어 왔으며, 따라서 토양의 토질, 모재, 배수 및 유효심

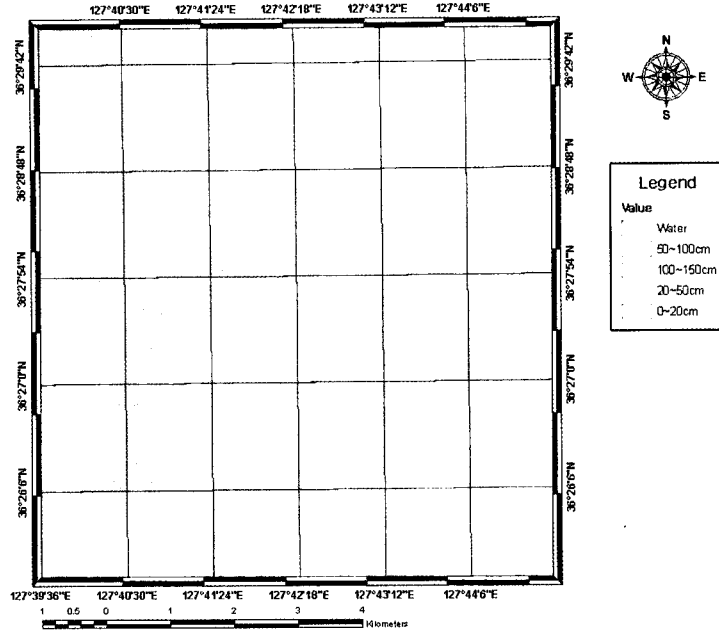


Fig. 7. Soil effective thickness in Boeun area.

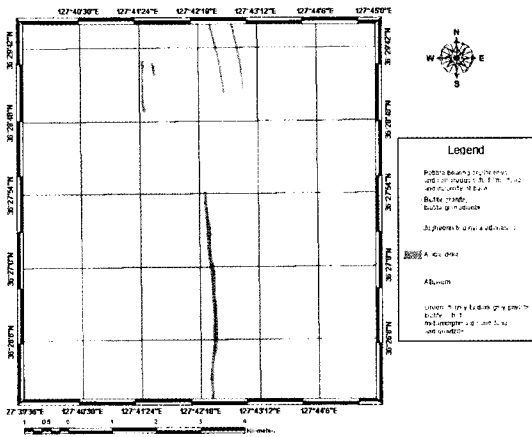


Fig. 8. Geological map in Boeun area.

도와 입상의 영급, 경급, 산림 밀도 등과 같은 다양한 토양 및 입상관련 자료들이 사용되어 왔다(이사로와 민경덕, 2000; 이사로, 2001). 반면 확정적 해석법, 특히 본 연구에서 사용된 무한사면해석을 위해서는 산사태 발생의 역학적인 면을 검토하기 위하여 토양의 전단강도와 토층의 두께와 같은 입력 자료가 요구된다. 그러나, 토양의 전단강도와 같은 입력 자료는 대개 실험을 통해 획득되는 것이 일반적이나 연구대상 지역이 광범위하고 다양한 토층이 분포하는 지역을 대상으로 실험을 수행한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다.

따라서, 본 연구에서는 토양도를 이용하여 통일분류법을 적용하여 토양의 공학적인 분류를 획득하였으며 Table 1과 같이 통일분류법으로부터 토양의 종류별 단위 체적중량, 내부 마찰각과 점착력을 추정하였다.

4. 무한 사면 모델의 적용

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 무한사면에서의 안정해석 기법과 GIS를 이용하여 공간자료를 적용, 분석하는 기법을 개발하였다. 이를 위하여 1998년 대규모 산사태가 발생한 보은지역을 선정하여 공간자료를 획득하고, 그 자료를 이용하여 본 연구에서 제안한 해석 기법에 적용하였다. 우선 개략토양도를 이용하여 토양의 종류별 단위체적 중량, 내부마찰각, 점착력을 추정하였다. 또한, 토양 두께의 경우 이전의 많은 연구에서 연구대상 전 지역에 걸쳐 동일한 값을 적용하였으나, 본 연구에서는 유효토심을 이용하여 추정하였으며, 이렇게 추정된 값을 지형도로부터 획득된 사면의 경사 및 경사방향과 함께 적용하여 각 격자의 안전율을 계산하였다. 안전율의 계산은 강우 및 지하수위가 사면의 안정성에 미치는 영향을 고려하고 이를 파악하기 위해 지하수위가 무한사면 하부에 존재하여 건조한 경우 ($m=0$), 집중호우로 지하수위가 상승하여 토체 두께의 약 50% 지점에 위치하는 경우($m=0.5$)와 집중호우로

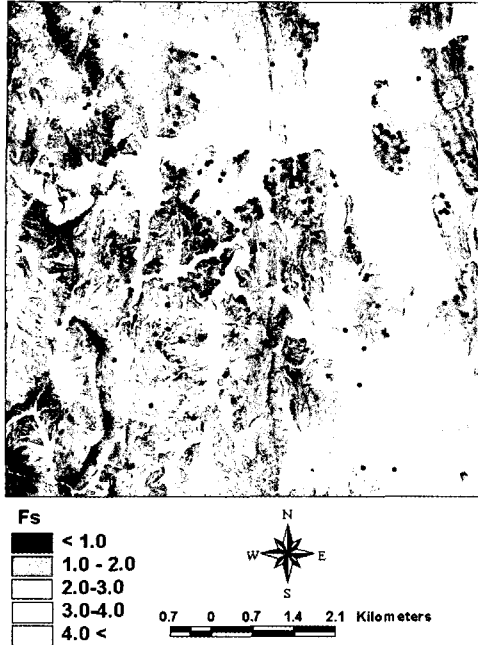


Fig. 9. Factor of safety distribution in Boeun area when $m=0$

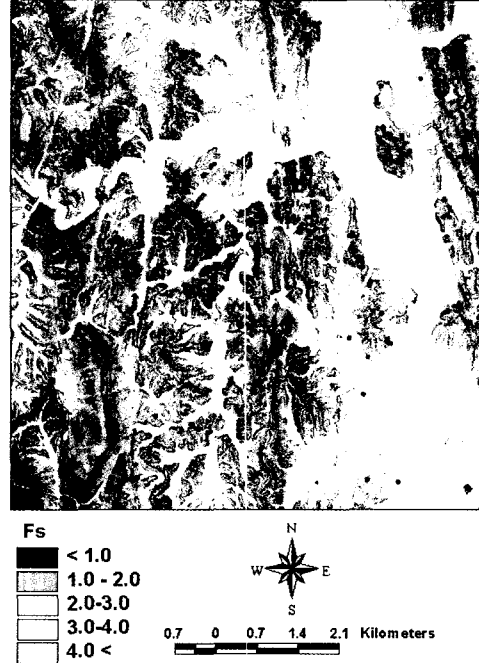


Fig. 10. Factor of safety distribution in Boeun area when $m=0.5$.

지하수위가 지표면과 일치하고 토양이 포화된 것으로 가정하는 경우($m=1$)로 구분하여 각각의 경우에 따른 안전율을 산정하였다.

5. 무한사면해석 기법의 적용 결과

Fig. 9, 10, 11은 각각 $m=0$ 인 경우, $m=0.5$ 인 경우, $m=1.0$ 인 경우에 대하여 계산한 안전율의 분포와 실제 산사태가 발생한 위치를 표시한 것이다. 그림에서 점으로 표시된 위치가 실제 산사태가 발생한 것으로 확인된 지점으로 산사태가 발생한 지점과 그 지점에서 무한사면해석기법을 이용하여 안전율을 계산하여 그 결과를 비교해 보았다.

Table 2에서와 같이 건조시, 즉 지하수위가 고려되지 않은 상태에서 안전율이 0~0.5의 값을 보인 지역 내에서 산사태는 전혀 발생하지 않았으나, 안전율이 0.5~1.0의 값을 보인 지역 내에서는 전체 발생한 산사태의 약 31.5%가 실제 발생했다. 반면 지하수위를 사면 높이의 50%로 고려한 경우, 즉 $m=0.5$ 인 경우 안전율이 1이하인 지역 중 약 64.1%의 지역에서 실제 산사태가 발생하였으며, 지하수위를 사면 높이와 동일하게 설정한 경우, 즉 $m=1.0$ 인 경우 안전율이 1이하인 지역 중 87.5%의 지역에서 실제 산사태가 발생한

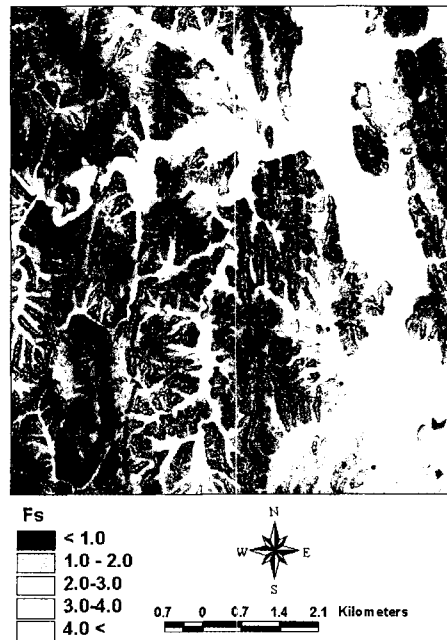


Fig. 11. Factor of safety distribution in Boeun area when $m=1$

것으로 계산되었다. 이러한 연구결과는 연구대상 지역인 보은지역에 일일 강우량 348 mm의 집중호우가 발

Table 1. Estimated friction angle and cohesion by classification of soil(after Korea Highway Corporation, 2001).

Classification	Condition	Unit weight (t/m ³)	friction angle φ (°)	Cohesion C (t/m ²)	USCS*
gravel	dense of well graded	2.0	40	0	GW
	loose of poorly graded	1.8	35	0	GP
sand w/ gravel	dense	2.1	40	0	GW
	loose	1.9	35	0	GP
sand	dense of well graded	2.0	35	0	SW
	loose or poorly graded	1.8	30	0	SP
sand soil	dense	1.9	30	less than 3	SM
	loose	1.7	25	0	SC
clay soil	hard	1.8	25	less than 5	ML CL
	mooderately weak	1.7	20	less than 3	
	weak	1.7	20	less than 1.5	
clay of silt	hard	1.7	20	less than 5	CH MH
	mooderately weak	1.6	15	less than 3	
	weak	1.4	10	less than 1.5	ML

*Unified Soil Classification System

Table 2. Landslides occurrence rate based on the factor of safety.

Factor of safety	Landslide occurrence rate(%)		
	m=0.0	m=0.5	m=1.0
0.0-0.5	0.00	230	39.39
0.5-1.0	31.46	61.89	49.10
1.0-2.0	53.46	29.16	9.46
2.0-3.0	8.95	3.33	0.52
3.0<	6.14	3.32	1.53

생했던 점을 감안할 때 지하수위가 매우 높게 상승했을 가능성이 높고 이에 따라 산사태가 집중적으로 발생한 것으로 보이는 현장상황과 일치하는 점을 보이고 있다.

6. 결 론

GIS기법을 이용한 사면재해 예측기법은 GIS가 가지는 장점, 즉 대량의 공간자료와 광역적인 자료를 쉽게 가공하고 분석할 수 있다는 점 때문에 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 현재 주로 사용되는 GIS기법은 통계적인 기법을 이용하여 사면재해 발생유부와 발생유발요인 사이의 연관성을 파악하고 이를 인접주변에 적용하여 사면재해의 발생가능성을 획득하는 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나, 이 방법은 사면재해가 발생하는 메커니즘에 대한 공학적인 고려없이 요인간의 상호 통계적인 처리에만 의존하므로 사면재해의 발생과 연관성이 높은 미끄러짐면의 내부마찰각과 점착력에 대

한 고려가 전혀 포함되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에는 사면재해의 발생기구를 국내에서 주로 발생하는 사면재해의 특성과 유사한 무한사면해석모델을 적용하여 사면에 작용하는 힘들의 상관관계를 분석함으로써 공학적인 접근을 시도하였다. 연구결과에 의하면 실제 사면재해가 발생했던 지점과의 비교를 통하여 지하수위를 사면 높이의 50%로 고려한 경우, 즉 m=0.5인 경우 안전율이 1이하인 지역 중 약 64.1%의 지역에서 실제 산사태가 발생하는 것으로 예측되었으며 지반이 완전히 포화된 경우, 즉 m=1인 경우 무한사면모델에서 불안정하다고 해석된 지역에서 전체 사면재해의 87.5%가 발생하였음을 보여주고 있어 사면재해에 대한 해석기법으로서의 활용가능성을 보여주고 있다.

사 사

이 연구는 일부 과학기술부 국가지정연구실(MI-0302-00-0063)의 연구비 지원에 의해 수행 되었다.

참고문헌

- 국립방재연구소 (2000) 사면붕괴 방지대책 제도화를 위한 기본 방안 연구. 행정자치부.
- 김윤중, 김원영, 유일현, 이사로, 민경덕 (1994) 지질 피해 예상 및 절취 난이도 분석을 위한 GIS 응용연구. 지질공학회지, 4권, p. 43-55.
- 김원영, 한대석, 김윤중, 유일현, 이본주, 정교철, 김경수 (1996) 환경지질 조사 연구. 한국자원연구소, pp. 114-147.
- 이사로 (2000) 지리정보시스템(GIS)을 이용한 산사태 취약성 분석 기법 개발 및 적용 연구. 연세대학교 박사 학위 논문, 163p.
- 이사로 (2001) GIS를 이용한 광역적 산사태 취약성, 가능성, 위험성평가기법 적용. 자원환경지질, 34권, p. 385-394.
- 이사로, 민경덕 (2000), 공간 데이터베이스를 이용한 1991년 용인지역 산사태 분석. 자원환경지질, 33권, p. 321-332.
- Gokceoglu, C. and 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, v. 44, p. 147-161.
- Kamai, T. (1991) Slope stability assessment by using GIS. Science and Technology Agency of Japan. in Japaneses.
- Luzi, L. and 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, p. 83-94.
- Mandy, L.G., Andrew, M.W., Richard, A. and Stephan, G.C. (2001) Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes. Geomorphology, v. 37, p. 149-165.
- Pack, T.T., Tarboton, D.G. and Goodwin, C.N. (1998) The SINMAP approach to terrain stability mapping. 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada, p. 21-25.
- Pack, T.T., Tarboton, D.G. and Goodwin, C.N. (2001) Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP. 15th Annual GIS Conference, GIS 2001.
- Randall, W.J., Edwin, L.H. and John, A.M. (2000) A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. Engineering Geology, v. 58, p. 271-289.
- Terlien, M.T.J. (1996) Modeling spatial and temporal variations in rainfall triggered landslides. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science, Publication no. 32.

2003년 4월 29일 원고접수, 2003년 8월 1일 게재승인.