

## 결정론적 모형을 이용한 산사태 위험지 예측

### Prediction of Potential Landslide Sites Using Deterministic model

차경섭<sup>1)</sup>, Kyung-Seob Cha, 장병욱<sup>2)</sup>, Pyoung-Wuck Chang, 이행우<sup>3)</sup>, Haeng-Woo Lee,  
노수각<sup>4)</sup>, Soo-Kack Nho

- 1) 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원, Senior researcher, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul Nat'l Univ.
- 2) 서울대학교 지역시스템공학과 교수, Prof., Dept. of Rural System Eng., Seoul Nat'l Univ.
- 3) 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Chief researcher, Rural Research Institute, KARICO
- 4) 서울대학교 지역시스템공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Rural System Eng., Seoul Nat'l Univ.

**SYNOPSIS :** The objective of this thesis is to develop a prediction system of potential landslide sites to apply to the prevention of landslide disaster which occurred during the heavy rainfall in the rainy season. The system was developed by combining a modified slope stability analysis model and a hydrological model. The modified slope stability analysis model, which was improved from 1-D infinite slope stability analysis model, has been taken into consideration of the flexion of the hill slopes. To evaluate its applicability to the prediction of landslides, the data of actual landslides were plotted on the predicted areas on the GIS map. The matching rate of this model to the actual data was 92.4%. And the relations between wetness index and landform factors and potential landslide were analyzed.

**Keywords :** geographic information system, landslide, topography, natural slope, wetness index

## 1. 서론

우리나라에서는 여름철에 발생하는 태풍 및 집중호우에 기인한 자연사면 및 절·성토지의 붕괴로 인한 피해가 반복되고 있다. 최근 도시의 팽창으로 전원공간에 대한 개발이 증대되고 있는데, 지반공학적, 수문학적으로 불안정하거나 안정성이 낮은 지역에 대한 개발로 인하여 더 많은 인명 및 재산피해가 우려되고 있다.

그런데, 산사태의 발생에는 자연적 요인과 인위적 요인 등 다양한 요인들이 복합적으로 연관되어 있어 정량적인 예측이 어렵기 때문에, 지금까지의 산지재해에 대한 대책은 예방보다 복구에 초점이 맞추어져 있는 실정이다. 그러나, 과학적인 분석을 통해 산사태를 예측하고 방재대책을 수립한다면, 피해를 많이 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 수문모형과 다중셀 및 지형지수를 도입한 사면안정해석모형을 지리정보시스템내에서 결합한 광역 산사태 위험지 평가기법을 개발하고, 산사태 자료를 이용해 결정론적 광역 산사태 위험지 평가기법의 타당성을 검증하고, 위험지를 예측하는데 목적이 있다.

## 2. 기본이론

### 2.1 사면안정해석모형

1차원 해석모형(무한사면안정해석모형)은 지형인자중에서 경사도만을 인자로 취급하므로, 사면의 모양을 평탄한 사면으로 간주하고 해석하게 되나, 실제 사면형상은 평탄사면뿐 아니라 오목사면, 볼록사면, 복합사면 등 다양한 형태를 나타낸다. 그런데, 2차원 해석(원호파괴)을 지리정보시스템을 이용하여 방대한 셀에 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서, 본 장에서는 1차원해석을 바탕으로 간편하게 지형을 고려한 해석을 할 수 있도록 사면의 형상을 고려할 수 있도록 다중셀과 지형지수를 이용한 사면안정해석모형을 제시하였다.

#### 2.1.1 다중셀

그림 1에서 임의의 한 개의 셀은 경사방향으로 상부셀과 하부셀로 연결된다. 본 연구에서는 이렇게 연결되는 2개 이상의 셀을 다중셀이라고 정의한다. 그림 1에서  $Z_7$ 셀에 대해서 다중셀이 경사방향의 상부로는  $Z_3$ 이고 하부로는  $Z_{11}$ 이므로,  $Z_3-Z_7-Z_{11}$ 은 3개의 셀로 이루어진 하나의 셀단위가 된다. 이러한 다중셀에서는 경사도뿐만 아니라 지형의 굴곡이 반영이 된다.

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$
$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$
$Z_{13}$	$Z_{14}$	$Z_{15}$	$Z_{16}$

그림 1. 다중셀

#### 2.1.2 지형지수

자연사면은 평탄사면 뿐 아니라 오목, 볼록 그리고, 복합사면이 존재한다. 2개의 셀(다중셀)로 이루어진 임의의 사면을 가정하였을 때, 평균경사도가 동일한 평탄사면의 안전율에 대한 굴곡이 있는 사면의 안전율의 비는 1보다 작게 된다. 굴곡의 변화에 대한 안전율 비를 도표로 나타내면 직선식이 나타난다. 이때 굴곡의 변화량에 대한 평탄사면 대 굴곡이 있는 사면의 안전율의 비를 지형지수(Landform index, LI)라고 정의할 수 있으며, 이 관계식은 식(1)과 같다(차, 2004).

$$LI = - \frac{\Delta \{FS(\text{Flexion})/FS(\text{Flat})\}}{\Delta ABS(\tan\alpha - \tan\beta)} \quad (1)$$

여기서, FS(Flexion)는 굴곡이 있는 자연사면의 안전율이며, FS(Flat)은 평탄사면의 안전율이고,  $ABS(\tan\alpha - \tan\beta)$ 은 굴곡량의 절대값이다. 이때, 지형지수는 토질조건, 토심, 지하수위, 경사각을 달리하여 굴곡을 고려한 안전율과 무한사면안전율을 비교하여 구하였다.

#### 2.1.3 사면안정해석모형

개선된 사면안정해석모형은 기존의 무한사면해석모형으로부터 구한 안전율(FS(Flat))과 경사도에 따른 지형지수(LI) 그리고 굴곡량( $ABS(\tan\alpha - \tan\beta)$ )의 곱으로 표현된다. 즉,

$$FS(\text{Flexion}) = FS(\text{Flat}) \times (1 - LI \times \Delta ABS(\tan\alpha - \tan\beta)) \quad (2)$$

과 같다.

## 2.2 수문모형

본 연구에서는 분포형 지하수위 모형을 이용하여 강우에 의한 토층내 포화깊이를 예측하고, 이를 이용하여 사면안정해석으로부터 사면안정성을 평가하였다. 각각의 셀에 연속방정식의 1차원적 형태를 적용하였다. 그림 2에서 정상상태 지표하 유출량과 유입량이 같다고 하면 아래와 같이 지하수위를 구할 수 있다.

$$D_w = \frac{zRA}{bT\sin\theta} \quad (3)$$

여기서,  $D_w$ 는 지하수위(m),  $z$ 는 토심(m),  $R$ 은 강우강도(mm/day),  $A$ 는 상부집수면적( $m^2$ ),  $b$ 는 등고선길이(m),  $\theta$ 는 사면경사각, 그리고  $T$ 는 투수량계수(Soil transmissivity,  $m^2/day$ )이다.

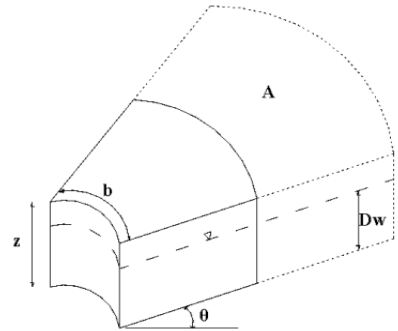


그림 2. 수문모형 개념도

## 2.3 토심추정모형

토심에 영향을 주는 인자로는 사면경사, 표고, 굴곡, 지질조건 등이 있다. 이들 인자들을 고려하여 토층의 두께를 산정해야하지만, 광범위한 지역에 대한 상세한 조사가 필요하므로 많은 비용이 소요된다. 그러므로, 여러 연구자들은 토심을 추정하기 위한 방법들을 제시하였다(Park, et al. 2001; Iida, 1999; USGS). 국내에서는 토양도에서의 유효토심, C층까지의 토심 등을 토양의 두께로 간주하거나, 사면위치로부터 토심을 추정하기도 하였다. 본 연구에서는 사면의 경사도를 가장 큰 영향인자로 보고, 이를 이용하여 토심을 추정하고자 한다. 토심을 경사도에 대한 식으로 표현하면 식(4)와 같다(USGS).

$$D_{soil} = 2.5 - 1.5 \frac{\tan\theta}{\tan 60^\circ} \quad (if \theta < 70^\circ) \quad (4)$$

여기서,  $D_{soil}$ 은 토심(m)이고,  $\theta$ 는 사면경사( $^\circ$ )이다. 토심의 범위는 0~2.5m이며,  $70^\circ$ 이상에서는 토양층이 존재하지 않는다고 가정한다.

## 3. 지형지수 산정

무한사면해석값과 다중셀의 굴곡량을 이용하여 사면형상을 고려한 사면안정율을 산정하기 위하여 “지형지수”를 도입하였다. 토심, 경사도, 토질정수, 지하수위 등을 다양한 조건으로 변화시키면서, 무한사면해석과 굴곡이 있는 2셀 사면에서의 원호파괴해석과 안전율의 관계를 도출하여 지형지수를 산정하였다. 지형지수 산정을 위한 과정은 아래와 같다.

- (1) 심도, 경사, 지하수위, 토질정수 등을 적정한 범위내에서 여러 가지 경우를 가정.
- (2) 위 조건에 대한 2차원 사면안정해석을 수행.
- (3) 수행한 결과에 대하여 평균경사도가 동일한 사면들을 그룹화.
- (4) (3)에서 굴곡에 따른 안전율의 변화를 도출(오목사면과 볼록사면).
- (5) 평탄사면에서의 안전율에 대한 굴곡이 있는 사면의 안전율의 비와 굴곡량으로부터 지형지수를 산정.
- (6) 심도와 평균경사도에 따른 지형지수를 산정하고, 관계식을 도출.

지형지수 산정을 위한 원호파괴해석 및 무한사면해석의 조건은 표 1과 같다.

표 1. 지형지수 산정을 위한 해석조건

Condition	Number	Range	Remark
Cell size (m)	1	5m	
Soil depth (m)	4	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	
Slope( $\tan\alpha, \tan\beta$ )	10×10	0.1 ~ 1.0	Interval : 0.1
Wetness index(D)	3	0D, 0.5D, 1.0D	D : Depth (m)
Cohesion(kPa)	4	1, 5, 10, 30	
Unit weight(kN/m <sup>3</sup> )	3	15, 17, 20	
Internal friction angle(°)	3	25, 30, 35	
Total case		43,200	

블록사면과 오목사면에 대하여 평균경사도별로 산정된 지형지수를 토심별로 나타낸 결과, 지형지수는 토심 및 경사도가 증가할수록 감소하였으며, 오목사면에 비해 블록사면에서의 감소율이 크게 나타났다. 지형지수를 평균경사도에 따라 그래프로 표시하면 그림 3과 같다.

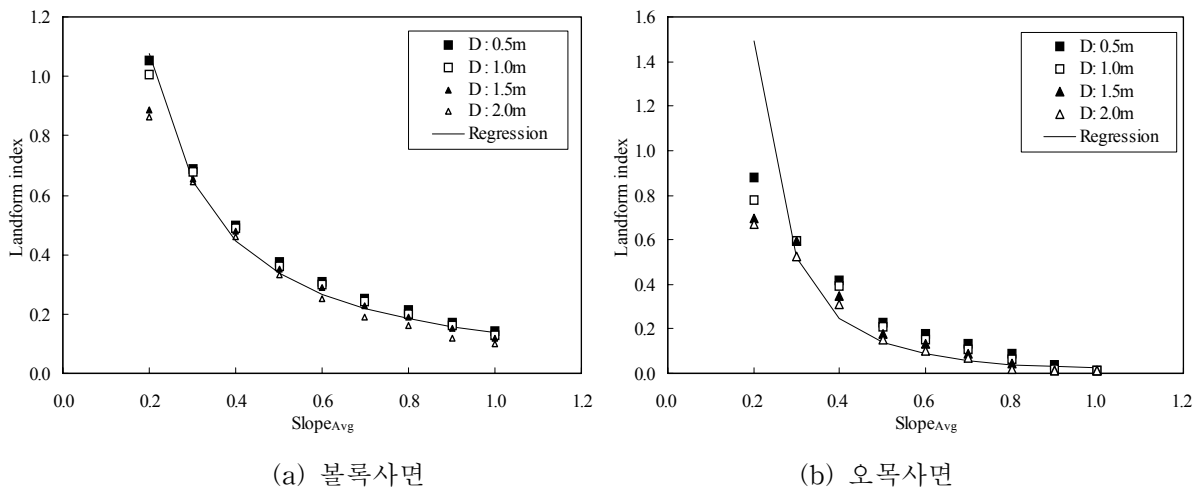


그림 3. 토심에 따른 지형지수와 평균경사와의 관계

그림 3에서 평균경사도에 따른 지형지수는 심도와 상관없이 유사하게 나타났다. 따라서 위 그래프로부터 평균경사에 대한 지형지수의 추세식을 산정하였다.

$$LI = 0.1385 \times S_{Avg}^{-1.2749}, R^2 = 0.967 \text{ (Convex slope)} \quad (4a)$$

$$LI = 0.023 \times S_{Avg}^{-2.5915}, R^2 = 0.850 \text{ (Concave slope)} \quad (4b)$$

여기서,  $S_{Avg}$ 는 다중셀의 평균경사도이다.

식(4)에서 구한 지형지수와 토질정수 및 무한사면안전율을 이용하여, 식(2)로부터 기복을 고려한 다중셀 사면의 안전율을 산정한다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 자료구축

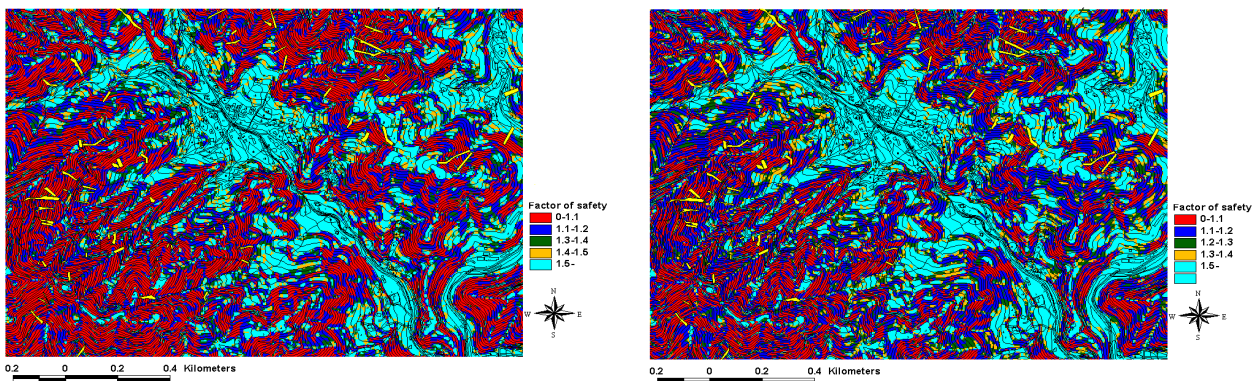
연구지역은 경기도 양주시 장흥면 석현리와 일영리이며, 경도는 126°55' 30" ~ 126°58' 30" 이고, 위

도 37°43'30" ~ 37°45'00"에 해당한다. 이 지역은 98년도, 99년도에 산사태가 많이 일어나 많은 재산 피해와 인명피해가 발생하였다. 이 지역의 지질은 주로 화강암질 편마암으로 되어 있으며 부분적으로 호상 편마암 혹은 반상변정편마암이 분포하고 있다. 대부분 풍화가 심하게 진행되어 곳곳에서 작은 강우에도 쉽게 무너지는 현상을 나타내고 있다. 조사결과에 따르면 파괴사면의 길이는 평균 42m, 폭 13m, 파괴심도 평균 1.1m로 나타났다. 대부분의 산사태는 길이와 상관없이 산사태 시작부에서는 전이형 혹은 원호파괴형상을 나타내었고, 진행과정에서 토석류처럼 계곡으로 흘러내리는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 토질조사 결과 모래질로 분류되며, 비중 2.65, 습윤단위중량 15kN/m<sup>3</sup>, 내부마찰각 34°, 점착력 5kPa, 투수계수 1×10<sup>-2</sup>로 나타났다. 광역 산사태 위험지 예측을 위해서 먼저 산사태 자료, NGIS 수치지형도 자료(축척 1:5000, 셀 크기 5m), 임상도, 토양도, 위성영상자료 등을 수집하였다. 구축된 자료를 바탕으로 지형지수를 이용하여 광역산사태 위험성을 작성하고 위험지를 예측하여 실제 파괴된 지역과 비교하여 적용성을 검증했으며, 강우조건에 따른 변화를 살펴보았다. 광역 산사태 위험성을 평가하기 위하여 지리정보시스템 소프트웨어는 ArcView 3.2, Spatial Analyst, 3D Analyst 등을 이용하였고, 사면을 추출하고, 사면안전율을 산정하기 위하여 ArcView 3.2의 내장 스크립트 언어인 Avenue를 이용하였다.

## 4.2 산사태 위험지 예측

본 연구에서 사용한 수문모형은 폭우상태를 묘사하는 것이 아닌, 정상상태의 강우조건을 묘사하는 모형이므로, 시간당 강우강도를 사용하지 않고, 일강우를 강우조건으로 사용하였다. 따라서, 1일 강우량을 250mm로 선정하였다. 수문모형과 사면안정해석모형은 각각 독립적으로 운영이 되며, 수문모형에서 지표의 포화상태 및 흐름상태 등의 결과값을 사면안정해석모형의 입력변수로 제공한다.

절토사면은 자연사면의 기하학적 형태를 변형시킨 사면이므로, 자연사면의 최소안전율의 기준을 절토사면에 대한 기준과 동일하게 적용할 수 있다. 따라서, 여름철 집중호우기간동안에 자연사면의 최소안전율은 우기의 1.1이상이 되어야 하는 것으로 판정하였다.



(a) 무한사면안정해석에 의한 산사태 위험도

(b) 지형기복을 고려한 사면안정해석에 의한 산사태 위험도

그림 4. 산사태 위험지도

무한사면안정해석모형과 수문모형을 이용한 산사태 위험지 예측지도를 그림 4(a)에 나타낸 결과, 안전율이 1.1미만인 경우는 17.6%로 나타났다. 지형지수를 도입한 2차원 사면안정해석모형과 수문모형을 이용한 광역산사태 위험지 예측지도를 그림 4(b)에 도시한 결과, 안전율 1.1미만인 경우가 32.6%로 나타났다. 산사태 발생지역과 안전율 1.1미만인 영역을 비교하여 본 결과, 무한사면안정해석에서는 실제 산사태가 발생한 영역과 84.8%가 중첩되고, 지형지수를 이용한 해석에서는 92.4%가 중첩되는 것으로 나타났다. 그러므로, 그림 4에서 실제 산사태가 발생한 지역에 대한 적용결과, 지형을 고려한 안정해석이 보다 실제적인 것으로 판단된다. 현장의 토질조건, 토심, 식생 등의 인자에 대한 정확성이 높아지거나, 폭우사상을 모의하는 수문

모형을 적용하게 되면 안전율 평가에 대한 신뢰도가 향상될 것으로 사료된다.

### 4.3 습윤지수에 따른 산사태 위험지역

위 강우조건에서는 지표면이 지하수 상승에 의해 완전포화가 되는 것으로 산정되었는데, 실제 강우시 강우조건에 따른 토양수분의 변화를 고려하는 것이 중요하므로 습윤지수의 변화에 따른 안전율을 살펴보았다(그림 5).

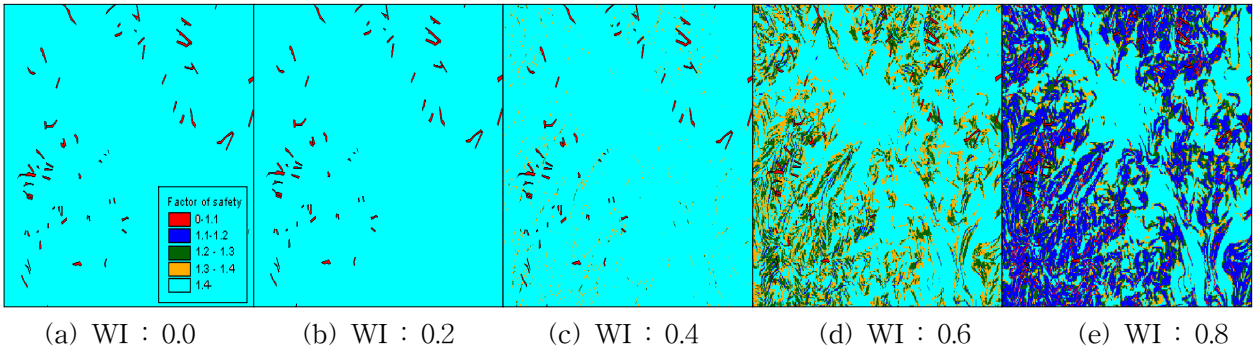


그림 5. 습윤지수에 따른 산사태 위험도

그림 5에서 습윤지수에 따른 광역 산사태 위험성 지도와 산사태 발생흔적을 중첩시켜 나타내었다. 습윤지수가 0.2이하일때에는 모든 사면의 안전율이 1.4이상으로 나타나 안정한 상태에 있는 것으로 평가되었다. 습윤지수가 0.4에서 1.4미만이 되는 사면들이 나타나기 시작하며, 1.4미만의 사면들과 산사태가 발생한 흔적을 비교한 결과 상당히 일치하는 것을 알 수 있다. 습윤지수가 0.8에서 안전율이 1.1미만이 되는 사면들이 발생하였으며, 지표면이 모두 포화가 되면 소유역내 사면의 안전율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

### 4.4 지형인자별 산사태 위험지역

지형인자에 따른 산사태 발생가능성을 살펴보기 위하여 산사태 위험지도로부터 연구지역의 경사도, 고도 및 곡률에 따른 산사태 발생빈도를 그림 6에 도시하였다.

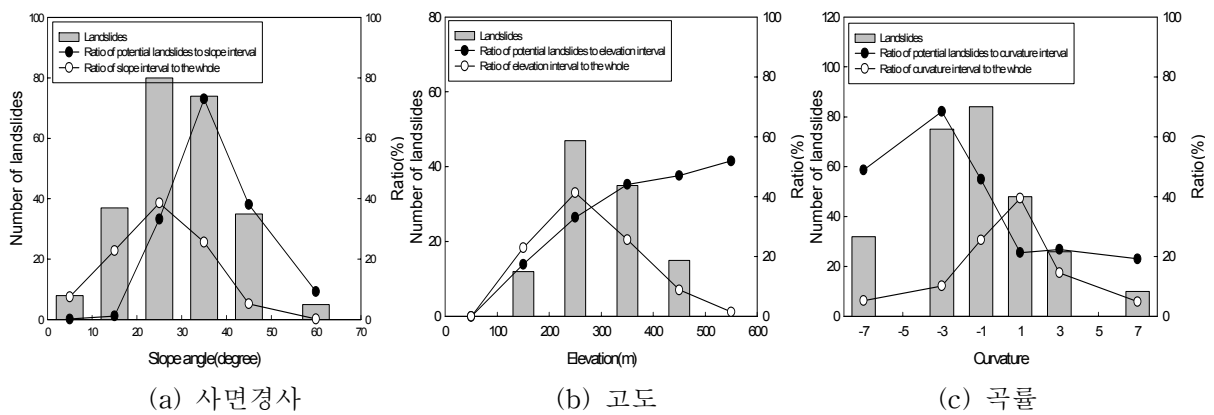


그림 6. 산사태 발생가능성과 사면경사, 고도 및 곡률과의 관계

그림 6(a)에서 사면경사와 산사태 발생개수를 비교한 결과, 20°에서 40°사이에서 가장 많이 발생하였고, 사면경사와 산사태 발생가능지역의 개수를 비교한 결과, 30 ~ 40°사이에서 가장 많이 발생하였고, 다음으

로, 20 ~ 30°, 40 ~ 50°구간이 다음으로 많았다. 연구지역에서는 20 ~ 30°구간이 가장 많이 존재하나, 발생비율에서는 30 ~ 40°구간이 73%로서 발생비율이 가장 높게 나타났다. 그림 6(b)에서 고도와 산사태 발생개수를 비교한 결과, 200 ~ 300m구간에서 가장 많이 발생하였고, 다음으로 300 ~ 400m, 400 ~ 500m 구간에서 많이 발생하였다. 고도와 산사태 발생가능지역의 셀의 개수를 비교한 결과, 고도가 높아질수록 발생가능비율이 증가하는 것으로 나타났으며, 300m이상의 구간에서는 40%에서 60%까지 나타났다. 그림 6(c)에서 곡률과 산사태 발생개수를 비교한 결과, -2 ~ 0구간에서 가장 많이 발생하였고, -5 ~ -2구간에서 많이 발생하였다. 반면, 블록지형에서는 상대적으로 적게 발생하였다. 곡률과 산사태 발생가능지역의 개수를 비교한 결과, 본 지역은 평탄지역이 가장 많고, 약간 오목, 블록지형이 다음으로 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났지만, 발생비율은 오목지형으로 갈수록 크고, 평탄, 블록지형으로 갈수록 작은 것으로 나타났다. 즉, 경사도분석결과, 20 ~ 40°경사도에서 발생빈도와 발생가능성이 가장 크고, 고도분석결과, 200 ~ 400m구간에서 발생빈도가 가장 크고, 발생가능성은 고도가 높을수록 증가하며, 곡률분석결과, 약간 오목지형에서 발생빈도가 가장 크고, 발생가능성은 오목지형에서 평탄, 블록지형으로 갈수록 낮아지는 것으로 나타났다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 여름철 집중호우시 많이 발생하는 산사태에 대한 예방대책 수립에 활용하기 위하여 사면 안정모형과 수문모형을 지리정보시스템에 결합한 광역 산사태 위험지 예측 기법을 개발하였고, 경기도 양주지역에서 발생한 산사태에 대하여 개발된 산사태 예측기법의 적용성을 검증하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사면의 굴곡을 표현하기 위하여 셀과 셀을 결합한 다중셀을 정의하였다. 다중셀은 임의의 셀로부터 경사방향으로 2개 이상의 셀을 추출·결합한 형태로서 평탄, 블록, 오목, 복합사면의 형태를 갖는다. 다중셀과 지형지수로부터 수정된 사면안정해석을 실시하여 산사태 위험지도를 작성하였다.
2. 구축된 예측시스템을 적용하여 산사태 발생지역과 안전율 1.1미만인 영역을 비교하여 본 결과, 무한사면안정해석에서는 실제 산사태가 발생된 영역과 84.8%가 중첩되고, 지형지수를 이용한 해석에서는 92.4%가 중첩되는 것으로 나타나 더 적합한 것으로 나타났다.
3. 지하수위 상승에 따른 위험지역의 확대를 살펴보기 위하여 습윤지수에 따른 안전율분포를 나타낸 결과, 지하수위가 없는 경우 산지사면은 안정한 것으로 나타났으며, 습윤지수 0.8에서부터 위험지역이 나타나기 시작하였다.
4. 경사도, 고도, 곡률 등 지형지수에 따른 산사태 발생빈도 및 발생가능성을 비교한 결과, 경사도의 경우, 20 ~ 40°경사도에서 발생빈도와 발생가능성이 가장 크고, 고도의 경우, 200 ~ 400m구간에서 발생빈도가 가장 크나, 발생가능성은 고도가 높을수록 증가하며, 곡률의 경우, 약간 오목지형에서 발생빈도가 가장 크고, 발생가능성은 오목지형에서 평탄, 블록지형으로 갈수록 낮아지는 것으로 나타났다.

추후 연구에서는 강우 침투에 의한 영향 및 뿌리보강 효과 등을 추가하여 안정해석을 수행해야 할 것으로 사료되며, 지형의 기복을 고려할 수 있는 사면안정해석기법의 적용에 대한 연구가 필요하다.

## 참고문헌

1. 차경섭(2004), “다중셀과 지형지수를 이용한 광역 산사태 위험지 예측”, 박사학위논문, 서울대학교
2. Gasmol, J. M., Rahardjo, H. and Leong, E. C.(2000), “Infiltration effects on stability of a residual soil slope”, *Computers and Geotechnics* 26, pp.145~165
3. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E.(1994), “A physically based model for the topographic

- control on shallow landsliding", *Water Resources Research*, Vol.30, No.4, pp.1153~1171
4. Okimura, T., and Ichikawa, R.(1985), "A prediction method for surface failures by movements of infiltrated water in a surface soil layer", *Nat. Disaster Sic.*, 7, pp.41~51
  5. Terlien, M. T. J.(1996), "Modelling spatial and temporal variations in rainfall-triggered landslides", Ph. D. thesis, ITC Publ. Nr. 32, The Netherlands, 254
  6. Van Westen, C. J. and Terlien, M.T.J.(1996), "An approach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS, a case study from Manizales (Colombia): *Earth Surface Processes and Landforms*", Vol. 21, pp.853~868 - John Wiley, London
  7. Wu, W., and Sidle, R. C.(1995), "A distributed slope stability model for steep forested basins", *Water Resources Research*, Vol.31, No.8, pp.2097~2110