

결정론적 기법을 이용한 산사태 위험지 예측

Prediction of Potential Landslide Sites Using Deterministic Model

차 경 섭** · 장 병 옥* · 우 철 웅*** · 김 성 필****

Cha, Kyung Seob · Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong · Kim, Seong Pil

Abstract

Almost every year, Korea has been suffered from serious damages of lives and properties, due to landslides that are triggered by heavy rains in monsoon season. In this paper, we systematized the physically based landslide prediction model which consisted of 3 parts, infinite slope stability analysis model, groundwater flow model and soil depth model. 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 84.8%. And the relation between hydrological and landform factors and potential landslide were analyzed.

Keywords : Geographic information system, Landslide, Topography, Natural slope, Wetness index

I. 서 론

우리나라에서는 거의 매년 여름철에 발생하는 태풍 및 집중호우에 기인한 산사태 혹은 절·성토지 붕괴로 인하여 많은 피해가 발생하고 있다. 산사태는 산지사면의 파괴를 가져올 뿐 아니라, 인명피해, 토양유실, 교량 및 도로의 파괴, 농지 및 농업수리 시설의 파괴, 그리고 가옥 및 문화재의 손실 등 2

차, 3차 피해를 유발시키는 중대한 자연재해이다. 최근, 도시의 팽창으로 도시주변이나 전원공간에 대한 개발이 증대되고 있는데, 지반공학적, 수문학적으로 불안정한 지역에 대한 개발로 인하여 더 많은 인명 및 재산피해가 우려되고 있다(Leinala, 1998).

산사태는 넓은 범위에 걸쳐 동시다발적으로 발생하므로, 발생가능성에 대한 광역적 평가가 필요하며, 산사태위험지도의 제작 및 관리가 요구된다. 그런데, 산사태 발생에는 지질, 토질, 지형, 식생, 강우, 지진, 침식, 절·성토 등 다양한 요인들이 복합적으로 연관되어 있어 정량적인 예측이 어렵기 때문에, 지금까지의 산지재해에 대한 대책은 예방보다 복구에 초점이 맞추어져 왔다. 그러나, 산사태에 대한 과학적인 분석을 통해 사전에 산사태 예상지역 및 위험지역을 미리 예측하고, 관측함으로써 이

* 서울대학교 조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공 교수

** 서울대학교 대학원 박사후 연구원

*** (주) DYKE 이사

**** 서울대학교 대학원 박사후료

** Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: chaks@snu.ac.kr

에 대한 적절한 대책을 세운다면 산사태로 인한 피해를 많이 줄일 수 있을 것이다. 본 연구에서는 사면안정해석모형과 수문모형을 지리정보시스템에서 결합하여 산사태 발생가능지역을 예측하고, 실제 파괴된 지역의 자료와 비교하여 결정론적 산사태 위험지역 평가기법의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 산사태위험성 평가기법

산사태위험성 평가기법은 통계적 기법과 결정론적 기법으로 구분된다. 통계적 기법은 산사태 발생 빈도와 각종 환경·지질·지형, 임상(식생) 인자들과의 상관관계에 의하여 발생가능성을 추정하는 기법으로서, 70년대부터 사용되어 왔다(Zhou et al., 2002, Kim et al., 2001). 지금까지 환경, 지질, 토질, 임상, 지형 등의 여러 인자를 이용하여 산사태 취약성을 판단하는 연구가 진행되었으나, 연구자에 따라 상이한 유발인자를 정하여 해석함으로써 연구결과간의 비교가 어렵고, 수문, 토질 등의 내적 인자와 강우, 침식 등의 외적인자를 배제시켜 물리·역학적인 의미가 결여되는 단점이 있다. 통계적인 방법은 연구지역외에 적용성이 떨어지며, 많은 데이터가 축적되어야 산사태와 유발인자간의 관계를 결정지을 수 있다는 단점이 있다.

결정론적 기법은 물리·역학에 기반을 둔 방법으로, 각종 지형, 지질, 토질, 기상 등의 산사태 유발인자들을 수문모형과 사면안정 모형에 적용하여 안전율과 파괴확률을 산정하고 광역적인 산사태 위험성을 평가하는 방법이다. 따라서, 지역에 상관없이 적용할 수 있는 장점이 있다. 반면, 지질 및 토질의 변화가 심한 지역에서는 조사량에 따라서 결과가 좌우될 수 있다. 이 기법은 1980년대 시작된 이후, 90년대 광역적 산사태 위험성 분석방법으로서 정착되었다(Montgomery and Dietrich(1994), Wu and Sidle 1995, Van Westen and Terlien 1996, Pack et al., 1998, Chi et al., 2002, Kim et al., 2002). 역학적 기법연구는 실제 토체의 파

괴메커니즘을 물리·역학적으로 해석하는 방법이므로 합리적인 기법으로 인정되고 있다.

III. 해석모형

1. 무한사면안정해석모형

본 연구에서 적용한 무한사면안정해석모형은 활동면의 형태를 사면 표면에 평행한 직선으로 가정 한 계산법으로 활동면의 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 큰 사면의 안정계산에 사용한다. 흙의 성질과 지하수위 조건은 전체 사면에 걸쳐 변하지 않는 것으로 가정하고, 지표면까지 침투수가 있을 때 가장 위험하다. 흙의 점착력을 고려하고, 습윤지수로 표현한 무한사면안전율은 식 (1)과 같다.

$$F_s = \frac{s}{\tau} = \frac{c' + \{[(1 - WI)\gamma_t + WI\gamma_{sub}] \cdot z \cdot \cos^2\beta\} \tan\phi'}{\{(1 - WI)\gamma_t + WI\gamma_{sat}\} z \cdot \sin\beta \cos\beta} \quad (1)$$

여기서, s 는 전단강도, z 는 전단응력 c' 은 토양의 점착력 (kPa), WI 는 습윤지수(Wetness Index), γ_t 는 습윤단위중량 (kN/m^3), γ_{sub} 는 수중단위중량 (kN/m^3) β 는 사면경사각이고, ϕ' 는 내부마찰각이다.

2. 지하수위모형

본 연구에서는 분포형 지하수위모형을 이용하여 강우에 의한 토층내 포화깊이를 예측한다. 포화토층의 두께는 다음과 같다(O'Loughlin, 1986, Pack et al., 2001).

$$D_w = \frac{z RA}{bT \sin \theta} \dots\dots\dots(2)$$

Fig 1에서 보는 바와 같이 수문모형의 매개변수 A 는 상부사면의 기여면적이고, z 는 토심 (m)이고 b 는 등고선 길이 (m)이며, a 는 A/b (m^2/m) 즉 비

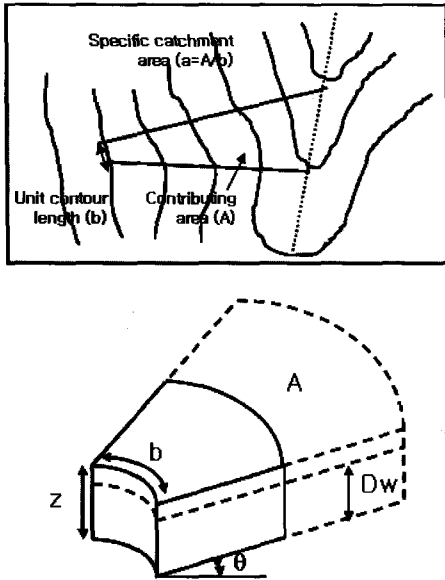


Fig. 1 Definition of specific catchment area.

집수면적이고, θ 는 사면의 경사각이다. R은 정상상태 강우강도 (mm/day)를 의미하고, T는 토양내 투과율(Soil transmissivity, m^2/day)을 의미한다.

전 토층에 대한 포화토층의 비를 습윤지수(Wetness index, WI)라고 하면, 아래와 같이 표현할 수 있고, 지표면까지 포화되었을때 최대값은 1이다.

$$WI = \text{Min} \left(\frac{RA}{bT \sin \theta}, 1 \right) \dots \dots \dots (3)$$

토양의 습윤지수는 토층의 투수성이 낮거나, 비 집수면적(A/b)이 크거나 경사도가 작은 경우에 증가하게 된다. 습윤지수는 볼록사면에서는 대략적으로 일정하고, 오목사면에서는 비집수면적이 증가하고 경사도가 감소하기 때문에 증가하게 된다.

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).

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

여기서, D_{soil} 은 토심(m)이고, θ 는 사면경사각(°)이다. 토심의 범위는 0~2.5 m이며, 70° 이상에서는 토양층이 존재하지 않는다고 가정한다.

VI. 광역산사태 위험지 예측

1. 연구지역

연구지역은 경기도 양주시 장흥면이며, 경도는 $126^\circ 55' 30'' \sim 126^\circ 58' 30''$ 이고, 위도 $37^\circ 43' 30'' \sim 37^\circ 45' 00''$ 에 해당한다. 이 지역은 98년도, 99년도에 산사태가 발생하여 공원묘지가 쓸려 내려가고, 주택 및 농지가 매몰되는 등 많은 재산피해와 인명피해가 발생하였다. 이 지역의 지질은 주로 화강암질 편마암으로 되어 있으며 부분적으로 호상편마암 혹은 반상변정편마암이 분포하고 있다. 대부분 풍화가 심하게 진행되어 곳곳에서 작은 강우에도 쉽게 무너지는 현상을 나타내고 있다. 위성영상분석 및 현장조사결과에 따르면 파괴사면의 길이는 평균 42 m, 폭 13 m, 파괴심도는 평균 1.1 m로 나타났다. 대부분의 산사태는 길이와 상관없이 산사태 시작부에서는 전이형 혹은 원호파괴 형상을 나타내었고, 진행과정에서 토석류처럼 계속으로 흘러내리는 양상을 보이는 것으로 나타났다.

Table 1 Soil properties in the study area

Location	Gs	e	γ_t (kN/m ³)	LL (%)	PI (%)	ϕ (°)	c (kPa)	k (cm/s)	U.S.C.S	Remark
JH-1	2.64	1.57	12.64	36.9	13.29	37.1	3.2	3.30E-06	SC	KIGNAM (2000)
JH-2	2.64	1.35	13.23	29.33	11.04	18	29.6	6.69E-06	SC	"
JH-3	2.69	1.11	14.99	31.42	10.51	37.8	1.6	3.21E-05	SC	"
JH-4	2.62	0.76	17.12	33.3	14.7	-	-	6.63E-03	SC	"
JH-5	2.70	0.83	17.01	26.22	8.86	-	-	1.61E-03	SC	"
JH-6	2.70	1.18	14.56	33.77	12.08	-	-	6.54E-03	SC	"
JH-7	2.71	0.81	17.34	28.65	10.7	-	-	1.13E-03	SC	"
JH-8	2.61	1.47	12.89	42.65	13.72	-	-	7.32E-03	SM	"
JH-9	2.65	1.09	14.97	30.6	10.01	-	-	1.36E-03	SC	"
JH-10	2.70	0.89	16.57	29.45	12.36	-	-	4.76E-03	SC	"
JH-11	2.70	1.43	13.72	39.8	12.16	-	-	2.62E-03	SM	"
JH-12	2.74	1.04	15.88	29.34	7.91	-	-	4.91E-04	SC	"
JH-13	2.65	0.80	18.08	32.51	10.63	-	-	1.63E-03	SC	"
JH-14	2.64	1.38	13.88	36.75	10.17	-	-	4.09E-03	SM	"
JH-15	2.74	0.8	16.95	32.92	12.95	15.15	8.12	-	SM	this study
JH-16	2.69	1.08	15.29	32.67	10.06	11.67	11.24	-	SC	"
JH-17	2.55	0.96	15.97	32.33	10.11	17.38	3.67	-	SC	"
JH-18	2.83	0.88	17.74	43	8.6	18.74	22.54	-	SM	"

* KIGNAM: 문헌조사, this study: 현장조사

연구지역에 대해서 토질조사를 위하여 현장조사와 문헌조사(KIGNAM, 2000)를 통해 18개 지점에 대하여 물리적 특성과 역학적 특성을 조사하였다. 18개 지점에 대한 물리적 특성과 역학적 특성을 Table 1에 나타내었다.

area(Jangheung) 항공사진보다 이용성이 좋다. 촬영일시는 2002년 3월 9일로서 실제 산사태가 일어난 때와 3년정도 차이가 나지만, 감독분류에 의해 산사태 흔적을 판독하는 것이 가능하였다.

2. 자료구축

가. 산사태 현황 파악

최근에 해상력이 높은 인공위성들이 많이 나와 산사태 발생위치 파악에 활용 가능성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 미국에서 개발한 위성인 IKONOS 2를 이용하였는데, 본 연구에서 이용한 1 m 해상력의 경우에는 3일 주기로 촬영하기 때문에

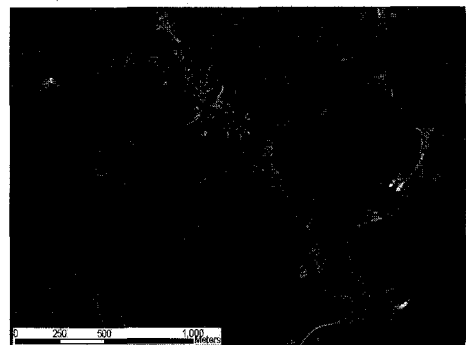


Fig. 2 Landslide marks on IKONOS satellite image

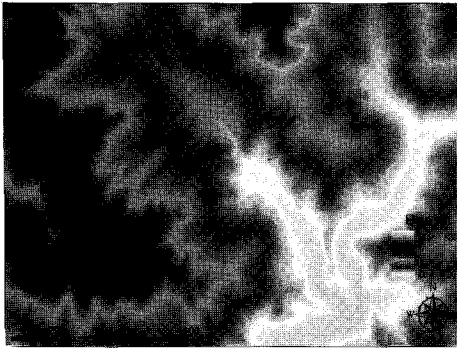


Fig. 3 DEM of the study



Fig. 4 Soil map of the study area

Fig. 2에서 산사태는 빨간색 폴리곤으로 나타내었다. 산사태의 발생시점은 평균 289.7 m이고, 산사태의 평균발생 길이는 29.8 m이다. 산사태의 방향은 북쪽(북서와 북동) 방향이 가장 많은 반면 남쪽방향은 가장 적게 발생하였다. 평균경사의 경우 최소 17.7°, 최대 44.9°까지 나타났다.

나. 지형자료 구축

1:5,000 NGIS(National Geographic Information System) 수치지도(도엽번호: 37608008, 37608009)로부터 등고선을 추출하여 두개의 수치지도의 등고선을 병합하여 하나로 통합하였고, 이로부터 셀 크기가 5 m인 DEM(Digital Elevation Model)을 구축하였다. Fig. 3은 대상지역의 DEM을 보여주고 있다. 최대고도가 580 m, 평균고도는 273 m로 나타났다.

다. 토양도

연구지역의 토양도는 농업기반공사의 RGIS(Regional Geographic Information System) 수치지도와 농촌진흥청의 1:25,000 정밀토양도로부터 생성하였다. 벡터로 작성된 폴리곤에 각각의 토양을 구분하여 토양통명, 토성, 배수등급, 투수계수, 유효토심, 석력함량 등을 입력하였다. Fig. 4에는 토양별 투수계수를 도시하였다. 그 결과 산지지역이 논, 밭지역보다 투수계수가 크게 나타났다.

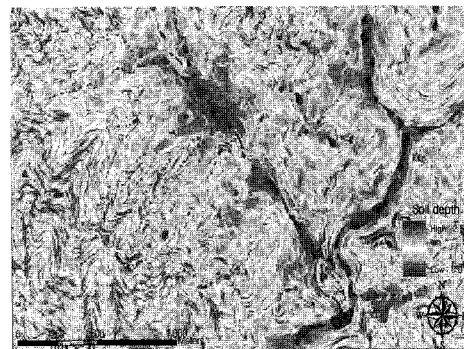


Fig. 5 Soil depth map of the study area

라. 토심분포도

사면경사에 따라 토심을 추정한 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, 이때 하천지역은 토심이 2.2~2.5 m로 나타났고, 산복지역에서는 1.0~1.6 m의 범위가 주로 나타났으며, 산정상 부근은 고도가 높고, 경사가 급한 관계로 토심이 얇은 것으로 추정되었다.

3. 광역산사태 위험지 예측

가. 위험성 평가기준

사면의 안전율은 피해의 정도와 경제성에 따라 선택된다. 한국도로공사 도로설계요령(1992)의 절·성토사면의 적용기준에 따르면 절토사면의 경우 우기시 안전율 기준이 1.1~1.2에 해당한다. 절토사면은 자연사면의 기하학적 형태를 변형시킨 사면이므로, 자연사면의 최소안전율의 기준을 절토사면에

대한 기준과 동일하게 적용하였다.

나. 평가기법 검증 및 적용성 평가

지형지수를 도입한 2차원 사면안정해석모형과 수문모형을 지리정보시스템내에서 결합한 광역 산사태 위험성 평가기법에 의한 산사태 위험성도 제작은 아래와 같은 순서로 진행된다.

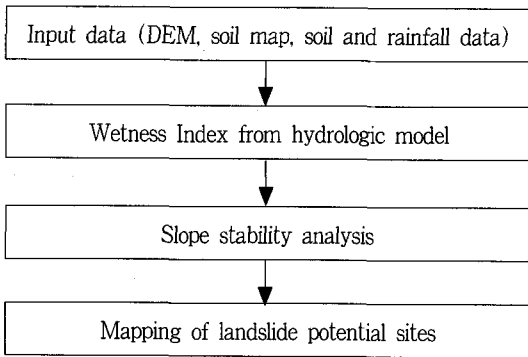


Fig. 6 Flow chart of mapping of landslide potential sites

평가기법을 적용하기 위하여 먼저, 산사태가 일어난 1998년 8월 6일과 7일의 강우량을 조사하였다. 인근 지역의 강우량을 조사한 결과, 서울 178 mm, 의정부 443 mm, 동두천 354 mm로 나타났다. 따라서, 1일 강우량을 250 mm로 선정하였으며, 이 값은 산사태 경보에 해당하는 강우량이다(산림청). 강우조건과 수문학적 토양군에 해당하는 배수조건을 이용하여 지표의 포화깊이를 산정하였다. 토심분포, 경사분포 등을 이용하여 무한사면안정해석을 수행하였고, 결과를 실제 산사태 지역과 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하였다.

무한사면안정해석모형과 수문모형을 이용한 산사태 위험성도를 Fig. 7에 나타내었고, 안전율이 1.1 미만인 위험지역은 17.6%로 나타났다. 산사태 발생지역과 안전율 1.1미만인 영역을 비교하여 본 결과, 실제 산사태가 발생된 영역과 84.8%가 중첩되는 것으로 나타났다. 연구지역내 토질 및 지질의

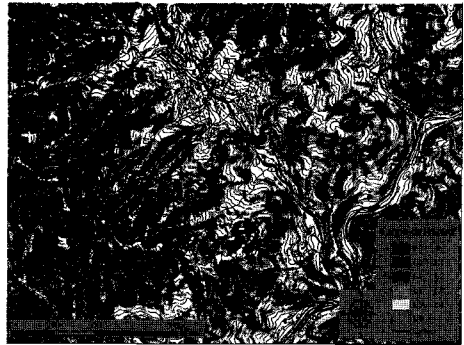


Fig. 7 Landslide susceptibility map

불균일성과 기타 인자의 미고려 등으로 인해 다소 예측결과가 맞지 않는 것으로 나타났다. 현장의 토질조건, 토심, 식생 등의 인자에 대한 정확성이 높아질수록 안전율 평가에 대한 신뢰도가 향상될 것으로 사료되며, 폭우사상을 모의하는 수문모형을 적용하면 더욱 향상될 것으로 판단된다.

다. 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(Fig. 8).

Fig. 8에서 습윤지수에 따른 광역 산사태 위험성 지도와 산사태 발생흔적을 중첩시켜 나타내었다. 습윤지수가 0.2 이하일 때에는 모든 사면의 안전율이 1.4 이상으로 나타나 안정한 상태에 있는 것으로 평가되었다. 습윤지수가 0.4에서 1.4 미만이 되는 사면들이 나타나기 시작하며, 1.4 미만의 사면들과 산사태가 발생한 흔적을 비교한 결과 상당히 일치하는 것을 알 수 있다. 습윤지수가 0.8에서 안전율이 1.1 미만이 되는 사면들이 발생하였으며, 지표면이 모두 포화가 되면(습윤지수 1.0), 소유역내 사면의 안전율이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

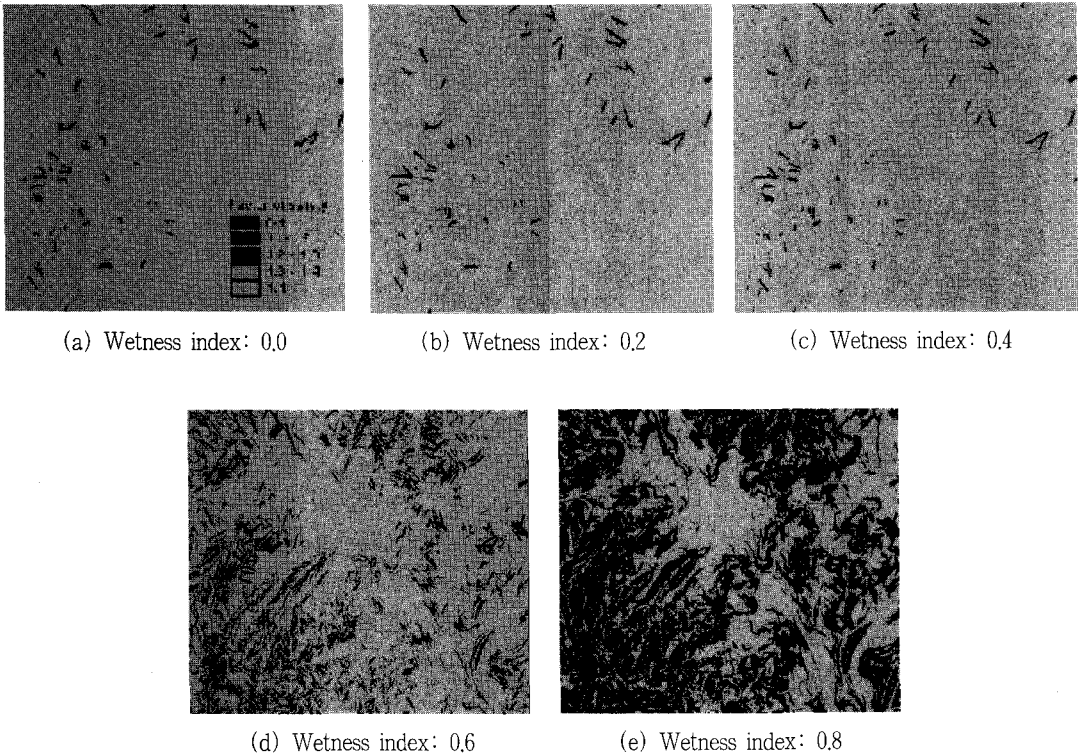


Fig. 8 Landslide susceptibility map by wetness index

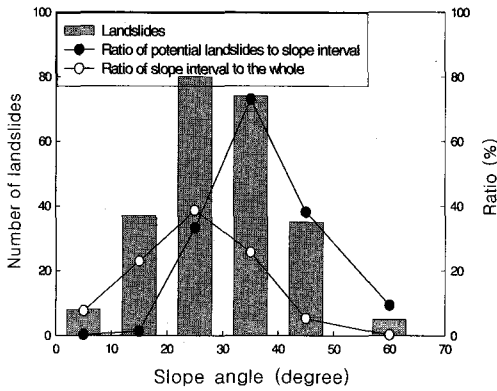
라. 지형인자별 산사태 위험지역

지형인자에 따른 산사태 발생가능성을 살펴보기 위하여 산사태 위험지도로부터 연구지역의 경사도, 고도 및 곡률에 따른 산사태 발생빈도를 Fig. 9에 도시하였다.

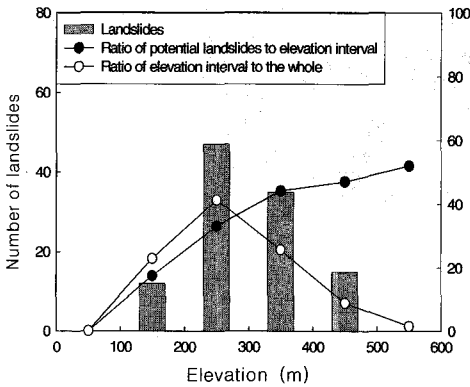
Fig. 9(a)에서 사면경사와 산사태 발생개수를 비교한 결과, 20°에서 40° 사이에서 가장 많이 발생하였고, 사면경사와 산사태 발생가능지역의 개수를 비교한 결과, 30~40° 사이에서 가장 많이 발생하였고, 다음으로, 20~30°, 40~50° 구간이 다음으로 많았다. 연구지역에서는 20~30° 구간이 가장 많이 존재하나, 발생비율에서는 30~40° 구간이 73%로서 발생비율이 가장 높게 나타났다. Fig. 9(b)에서 고도와 산사태 발생개수를 비교한 결과, 200~300 m 구간에서 가장 많이 발생하였고, 다음으로 300~400 m, 400~500 m 구간에서 많이

발생하였다. 고도와 산사태 발생가능지역의 셀의 개수를 비교한 결과, 고도가 높아질수록 발생가능비율이 증가하는 것으로 나타났으며, 300 m 이상의 구간에서는 40%에서 60%까지 나타났다. Fig. 9(c)에서 곡률과 산사태 발생개수를 비교한 결과, -2~0 구간에서 가장 많이 발생하였고, -5~-2 구간에서 많이 발생하였다. 반면, 볼록지형에서는 상대적으로 적게 발생하였다. 곡률과 산사태 발생가능지역의 개수를 비교한 결과, 본 지역은 평탄지역이 가장 많고, 약간 오목, 볼록지형이 다음으로 많은 부분을 차지하는 것으로 나타났지만, 발생비율은 오목지형으로 갈수록 크고, 평탄, 볼록지형으로 갈수록 작은 것으로 나타났다.

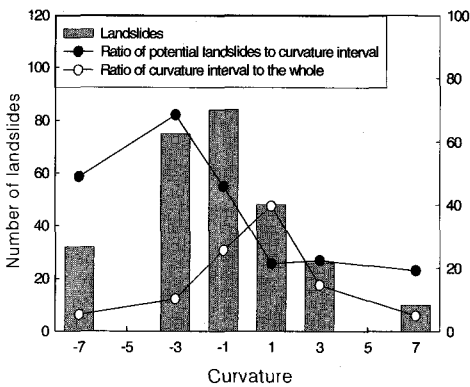
즉, 경사도분석결과, 20~40° 경사도에서 발생빈도와 발생가능성이 가장 크고, 고도분석결과, 200~400 m 구간에서 발생빈도가 가장 크고, 발생가



(a) Slope angle vs potential landslides



(b) Elevation vs potential landslides



(c) Curvature vs potential landslides

Fig. 9 The relation between potential landslides and slope angle, elevation and curvature

능성은 고도가 높을수록 증가하며, 곡률분석결과, 약간 오목지형에서 발생빈도가 가장 크고, 발생가능성은 오목지형에서 평탄, 볼록지형으로 갈수록 낮아지는 것으로 나타났다.

Ⅶ. 요약 및 결론

본 연구에서는 여름철 집중호우시 많이 발생하는 산사태에 대한 예방대책 수립에 활용하기 위하여 무한사면안정해석모형과 지하수위모형을 지리정보시스템에 결합하여 광역 산사태 위험지를 예측하였고, 경기도 양주지역에서 발생한 산사태에 대하여 역학적 산사태 예측기법의 적용성을 검증하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 무한사면안정해석모형, 지하수위모형, 토심추정모형을 이용한 역학적 기법의 산사태 예측기법을 경기도 양주 지역에 적용한 결과, 산사태 발생지역의 84.8%가 위험지역과 중첩되는 것으로 나타났다.

2. 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.

3. 경사도, 고도, 곡률 등 지형지수에 따른 산사태 발생빈도 및 발생가능성을 비교한 결과, 경사도의 경우, 20~40°경사도에서 발생빈도와 발생가능성이 가장 크고, 고도의 경우, 200~400 m 구간에서 발생빈도가 가장 크나, 발생가능성은 고도가 높을수록 증가하며, 곡률의 경우, 약간 오목지형에서 발생빈도가 가장 크고, 발생가능성은 오목지형에서 평탄, 볼록지형으로 갈수록 낮아지는 것으로 나타났다.

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

References

1. Cha, K. S. 2004. Prediction of potential landslide sites using the multicell and the landform index, *Ph.D. thesis*, Seoul National University (in Korean).
2. Chi, K., Lee, K. and Park, N. 2002. Landslide stability analysis and prediction modeling with landslide occurrences on KOMPSAT EOC Imagery. *Korean Journal of Remote Sensing*, 18(1): 1-12
3. Iida, T., 1999, A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm, *Catena*. 34: 293-313
4. KHC (Korea Highway Corporation). 1992. Road design manual.
5. KIGNAM. 2000. Prediction and mitigation of landslide hazards. *Natural Hazard Prevention Research* (in Korean)
6. Kim, H. T., Kim, G. H., Lee, H. J. and Park, D. K. 2002. The Risk analysis of debris flow occurrence using GIS. *Proceedings of the annual conference. KSCE*: 107-110 (in Korean)
7. Kim, W. Y., Kim, K. S., Chae, B. G. and Cho, Y. C. 2001. Quantitative prediction of landslide probability in gyeonggi province, Korea. *Proceedings of the annual conference. ENGEO*: 33-44
8. Leinala, T. J. 1998. Computer modelling of landslides. *Master thesis. University of Toronto. Canada*
9. Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4): 1153-1171
10. O'Loughlin, E. M., 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, 22: 794-804
11. Pack, R. 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. 21-25 September
12. Park, S. J., McSweeney, K. and Lowery, B. 2001, Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. *Geoderma*. 103: 249-272
13. 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*. 21: 853-868 - John Wiley, London
14. Wu, W. and Sidle, R. C. 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins. *Water Resources Research*. 31(8): 2097-2110
15. Zhou, C. H., Lee, C. F., Li, J. and Xu, Z. W. 2002. On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*. 43: 197-207