

GIS 기반 산사태 예측모형의 적용성 평가

Evaluation of GIS-based Landslide Hazard Mapping

오 경 두* / 홍 일 표** / 전 병 호*** / 안 원 식**** / 이 미 영*****

Oh, Kyoung Doo / Hong, Il Pyo / Jun, Byong Ho / Ahn, Won Sik / Lee, Mee Young

Abstract

In this study, application potential of SINMAP, a GIS-based landslide hazard mapping tool, is evaluated through a case study. Through the application to the severe landslide events occurred during a heavy storm in 1991 on the Mt. Dalbong area about 78 kilometers south from Seoul, SINMAP successfully spotted most landslide sites. The effects and proper ranges of three calibration parameters of SINMAP, i.e. the soil internal friction angle, the combined cohesion of tree roots and soil, and T/R, were examined through comparison of predicted landslides with the landslide inventory data. From the findings of this study, it seems that SINMAP could be used as an effective screening tool for landslide hazard mapping especially for mountain areas with fairly steep slopes and relatively thin soil layers.

keywords : SINMAP, debris flow, landslide, GIS, groundwater, slope stability index

요 지

본 연구에서는 국내에서 발생했던 산사태에 대한 사례연구를 통하여 GIS 기반의 산사태 예측모형 SINMAP의 적용성을 검토하였다. 사례연구의 대상지역은 서울에서 남쪽으로 78km 정도 떨어진 곳에 위치한 용인시 이동면 덕성리 소재 달봉산으로 1991년 집중호우기간 동안에 많은 산사태가 발생하였다. 이 지역에 대하여 SINMAP을 적용하여 당시 산사태지도와 비교 분석한 결과 대부분의 산사태를 성공적으로 예측하였다. 또한 본 연구에서는 SINMAP 모형의 적용에 필요한 3가지 매개변수인 흙의 내부마찰각, 점착력, T/R이 산사태 예측에 미치는 영향과 적정범위에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통하여 SINMAP은 사면 경사가 급하고 토층의 두께가 얇은 국내산지의 산사태 위험도를 예비적으로 평가하는 유용한 도구가 될 수 있는 것으로 보인다.

핵심용어 : SINMAP, 토석류, 산사태, GIS, 지하수, 사면안정계수

-
- * 육군사관학교 토목공학과 교수
Professor, Dept of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul, 139-799, Korea
(e-mail: okd0629@kma.ac.kr)
 - ** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea
 - *** 육군사관학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul, 139-799, Korea
 - **** 수원대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Suwon University, Kyonggido, Korea
 - ***** 공주대학교 지리정보학과 석사과정, 육군지도창 지형정보편집사
Graduate student, Dept. of Geographic Information System, Konju National Univerity, Kongju city, Choongchungnam-do, Korea

1. 서 론

국내에서 산사태관련 사망자수는 연평균 32명에 이르고 있으며 대부분의 산사태가 태풍 기간 동안에 발생하고 있다(박덕근, 2004). 국내에서 발생하고 있는 산사태의 주된 유형은 호우 기간 중에 발생하고 있는 토석류(debris flow/mud flow)와 평행활동(parallel movement)이다. 최근에 발생한 대규모 산사태의 예로는 2002년 일강우량 880mm의 폭우를 동반한 태풍 루사 기간 동안에 강원도 지역에서 발생한 산사태를 들 수 있다. 집중호우와 산사태가 겹침에 따라 산사태로 인한 토석의 하상 퇴적과 유목 등의 부유물이 교각 등에 걸림으로 인하여 피해를 크게 가중시켰다. 이 당시 촬영한 항공사진에 의하면 거의 모든 계곡에서 산사태가 발생한 것을 알 수 있다(Fig. 1).

과거에 발생하였던 산사태를 분석해보면 대부분의 산사태가 불투수성 기반암 위에 놓여있는 얇은 깊이의 풍화산적토층에서 발생하고 있으며 지하수와 깊은 상관성을 나타내고 있다. 한편 국내 지형은 대부분 산악지형으로 이루어져 있어 산사태 위험지역을 구분해내는 것 자체가 너무 광범위하고 어려운 일이라고 할 수 있다. GIS 프로그램에 지반, 암석, 사면특성, 식생 등을 그리드 셀별로 입력한 후 회귀분석을 통해 산정한 가중치를 부여하여 산사태 위험지역을 식별하는 방법이 국내에서 적용되어 왔다(김원영, 2001; 최경, 2001, 백운일 등, 2004; 박덕근, 2004). 이 방법들은 사면의 특성에 대한 물리적인 평가와 실측자료에 근거하고 있어 산사태 관련 인자들에 대한 적절한 가중치를 부여할 경우 신뢰성 높은 예측결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 방법들을 광범위한 지역에 적용하기 위해서는 많은 자료와 비용이 요구된다는 어려움이 있다.

본 논문에서는 산사태 위험지역을 스크린하는 방법

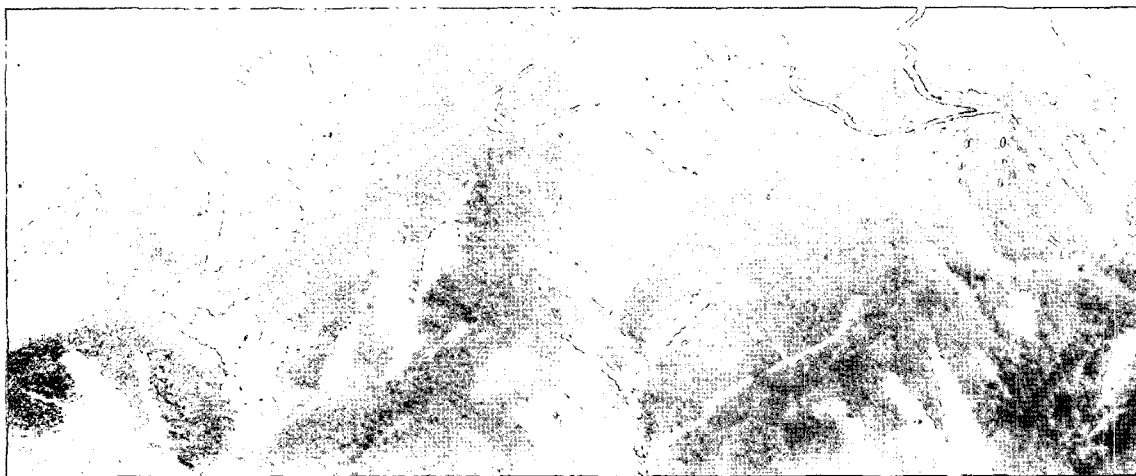


Fig. 1. Landslide Scars from Typhoon Rusa (The CHOSUN IL BO Daily Newspaper 4th, Sept. 2002)

으로서 SINMAP 기법의 적용성을 검토하였다. SINMAP은 원래 캐나다 Forest Renewal British Columbia의 지원에 의해 Pack et al. (no publishing date)에 의해서 개발되었으며 국내에는 경기도 판내 지역의 산사태 위험도 평가를 위하여 적용된 바 있다(경기도, 2001). SINMAP은 수문학과 토질역학적인 이론적 기반에 근거한 사면안정해석모형으로서 적절한 매개변수의 선정에 대해서는 국내외적으로 체계적인 연구가 미흡하며 국내 산사태에 대한 적용성은 아직까지 평가된 바 없다. 따라서 본 논문에서는 국내에서 발생한 산사태 사례 중에서 자료가 체계적으로 정리된 달봉산 지역 산사태를 대상으로 SINMAP의 적용성과 적절한 매개변수의 범위 등에 대하여 검토하였다.

2. 이론적 배경

무한평면사면안정해석(infinite plane slope stability analysis) 모델의 사면안정계수는 Eq. (1)과 같이 쓸 수 있다. Fig. 2는 Eq. (1)에서 가정한 사면과 토층 및 지하수 대수층간의 기하학적 관계를 나타낸 것이다(Pack et al., no publishing date).

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(D - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w] \tan\phi}{D\rho_s g \sin\theta \cos\theta} \quad (1)$$

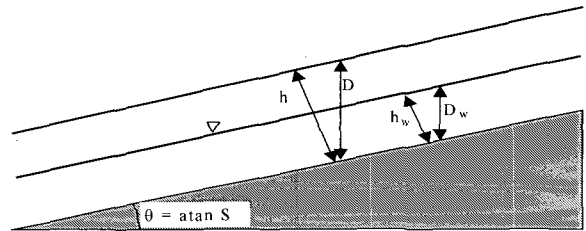


Fig. 2. Infinite Slope Stability Model Schematic (Pack et al., No Publishing Date)

여기서 C_r 은 식생뿌리의 점착력 [N/m^2], C_s 는 흙의 점착력 [N/m^2], θ 는 사면경사, ρ_s 는 습윤상태 흙의 밀도 [kg/m^3], ρ_w 는 물의 밀도 [kg/m^3], g 는 중력가속도 ($9.81[m/s^2]$), D 는 토층의 깊이[m], D_w 는 토층내 지하수의 깊이[m], h 와 h_w 는 토층과 지하수 깊이의 방향여현, ϕ 는 흙의 내부마찰각[degrees]이다. Eq. (1)은 습윤상태의 흙과 건조상태 흙의 밀도가 같다는 간략화 가정 하에 유도되었다. Pack et al.(2001)은 Eq. (1)을 더욱 단순화시킨 Eq. (2)를 유도하였다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - wr]\tan\phi}{\sin\theta} \quad (2)$$

여기서 $h = D\cos\theta$, $w = D_w/D = h_w/h$, $C = (C_r + C_s)/(h\rho_s g)$, $r = \rho_w/\rho_s$ 이다. 흙의 상대적 점착력 C 는 식생뿌리와 흙의 점착력을 합한 전체 점착력과 흙 무게와의 상대적인 비로 나타내고 있으며 무차원이다. 그리고 상대 습윤도(relative wetness)를 사면의 배수특성과 연관시켜서 $w = Ra/T\sin\theta$ 로 가정하였다. 여기서 $Ra[m^2/hr]$ 는 정상상태 지하수 재충진율(a steady state lateral recharge rate)을 나타내며, $a[m^2/m]$ 는 비집수면적(specific catchment area), $R[m/hr]$ 은 투수계수(hydraulic conductivity)이다. 비집수면적 a 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$a = \frac{A}{b} \quad (3)$$

여기서 A 는 지하수 재충진에 기여하는 집수면적 [m^2], b 는 지하수가 유입되는 사면의 등고선을 따라 측정된 횡방향 길이(length of influx segment along a contour line)이다. 그리고 $T\sin\theta$ 는 지하수 배수능(capacity of lateral discharge)으로서 T 는 흙의 투수량계수(transmissivity) [m^2/hr]이다. 위에서 가정한 상대 습윤도를 이용하여 Eq. (2)는 Eq. (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - \min(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1)r]\tan\phi}{\sin\theta} \quad (4)$$

Eq. (4)에서 $\min(Ra/T\sin\theta, 1)$ 은 상대 습윤도의 상한계가 1.0임을 의미한다. 이 식이 SINMAP에서 사면안정계수(stability index, SI)를 정의하기 위하여 사용된 식이다. 위의 Eq. (4)에 포함된 매개변수 중에 비집

수면적 a 와 사면경사 θ 등은 지형자료로부터 산정이 가능하며 물과 흙의 밀도비 r 는 0.5로 가정하고 있다. 식생뿌리와 흙의 점착력이 종합된 C , 흙의 마찰력 $\tan\phi$, 지하수 재충진율과 흙의 투수량계수의 비 R/T 등이 불확실성을 내포한 매개변수로서 이를 적절하게 산정하는 것이 위 식을 이용한 사면안정해석의 관건이라고 할 수 있다.

SINMAP에서는 Eq. (5)와 같이 이들 3개의 매개변수들이 각각 상한계와 하한계 범위를 가지며, 이 범위 내에서 발생확률이 균일한 확률분포(uniform probability distribution)를 갖는 것으로 가정한다.

$$C \sim U(C_1, C_2) \quad (5a)$$

$$R/T \sim U((R/T)_1, (R/T)_2) \quad (5b)$$

$$\tan\phi \sim U((\tan\phi)_1, (\tan\phi)_2) \quad (5c)$$

이와 같은 확률분포 가정하에서 하한계 C 와 $\tan\phi$ (즉, C_1 과 $(\tan\phi)_1$) 및 상한계 R/T (즉, $(R/T)_2$) 조합이 Eq. (6)과 같은 가장 최악(안전측)의 시나리오를 구성하게 된다.

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos\theta[1 - \min(\frac{R}{T})_2 \frac{a}{\sin\theta}, 1)r](\tan\phi)_1}{\sin\theta} \quad (6)$$

이와 같은 최악의 시나리오에 대해서 FS_{\min} 이 1.0 보다 큰 지역은 안전(unconditionally stable)한 것으로 분류된다. 반면에 FS_{\min} 이 1.0 보다 작은 지역은 사면파괴의 가능성이 있는 것으로 본다. 사면파괴의 가능성은 공간적인 변이성을 나타내는 C , T , $\tan\phi$ 는 물론 지하수 재충진율의 변이성을 나타내는 R 과 연관되어 있다. 따라서 Eq. (6)의 R/T 는 수문학적인 측면에서 사면의 공간적 변이성을 나타낸다고 할 수 있다. FS_{\min} 이 1.0 보다 작은 지역(즉, $FS_{\min} < 1$)에서의 사면안정계수 SI는 Eq. (7)과 같이 $FS > 1$ 일 확률로 정의된다.

$$SI = \text{Prob}(FS > 1) \quad (7)$$

최상의 시나리오인 $C = C_2$, $R/T = (R/T)_1$, $\tan\phi = (\tan\phi)_2$ 인 조건에서 FS_{\max} 는 Eq. (8)과 같이 정의된다.

$$SI = FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos\theta[1 - \min(\frac{R}{T})_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1)r](\tan\phi)_2}{\sin\theta} \quad (8)$$

Table 1. Stability Class Definitions (Pack et al., 2001)

Condition	Predicted State	Possible Influence of Factors Not Modeled
$SI \geq 1.5$	Stable slope zone	Significant destabilizing factors are required for instability
$1.25 \leq SI < 1.5$	Moderately stable zone	Moderate destabilizing factors are required for instability
$1.0 \leq SI < 1.25$	Quasi-stable zone	Minor destabilizing factors are required for instability
$0.5 \leq SI < 1.0$	Lower threshold slope zone	Destabilizing factors are not required for instability
$0.0 \leq SI < 0.5$	Upper threshold slope zone	Stabilizing factors may be responsible for stability
$SI < 0.0$	Defended slope zone	Stabilizing factors are required for stability

만일 FS_{max} 가 1.0 보다 작을 경우 $SI = Prob(FS > 0) = 0$, 즉 사면안정계수는 0이 된다.

Table 1은 사면안정계수 SI의 조건에 따라 예측되는 사면의 상태에 대한 분류표의 예이다. SI의 분류기준은 절대적인 것이 아니며, 주관적인 판단에 따라 달라질 수 있으므로 해석에 주의가 요구된다.

3. 적용 및 고찰: 달봉산 산사태 사례 연구

달봉산은 서울에서 남쪽으로 78km 정도 떨어진 용인시 이동면 덕성리 소재의 해발 203m의 비교적 작은 산이다(Fig. 3). 이 지역은 깊이 풍화된 흙으로 구성되어

있으며 노두(outcrop)는 거의 관측되지 않는다. 기반암은 경기편마암계 복합체로서 한반도 중부에서 가장 흔하게 관측되는 유형의 기암반이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 달봉산 지역의 지반은 실트가 섞인 모래 또는 실트와 모래 혼합체(SM)이며 주변 논은 무기질 점토(CL)로 구성되어 있다. 지반 두께는 0.5~1.0m 정도로 전반적으로 얇고 표토층은 0.1~0.2m 정도이다. 단층대가 잘 발달되어 있어서 산의 규모와 높이에 비해서 사면경사는 매우 가파른 편이다. 식생분포는 침엽수와 활엽수의 혼효림으로 보통 내지 높은 정도의 식생밀도를 나타내고 있었다(Park, 1994).

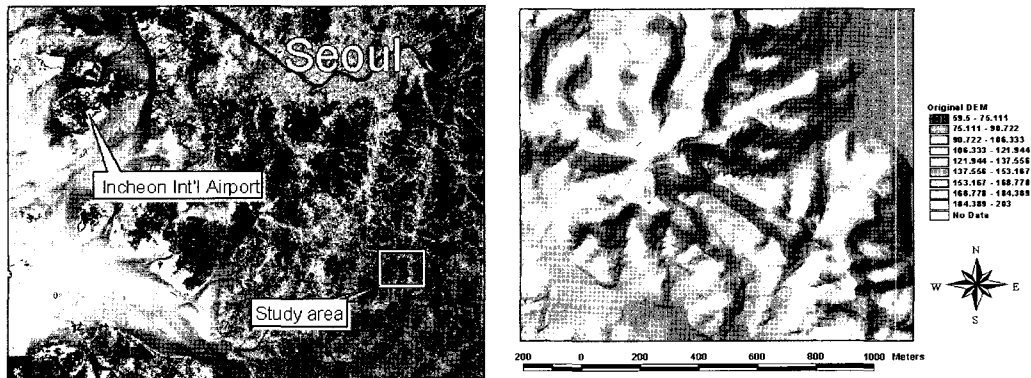


Fig. 3. Satellite Image of the Study Area (left) and DEM(Digital Elevation Model) of Mt. Dalbong (right)

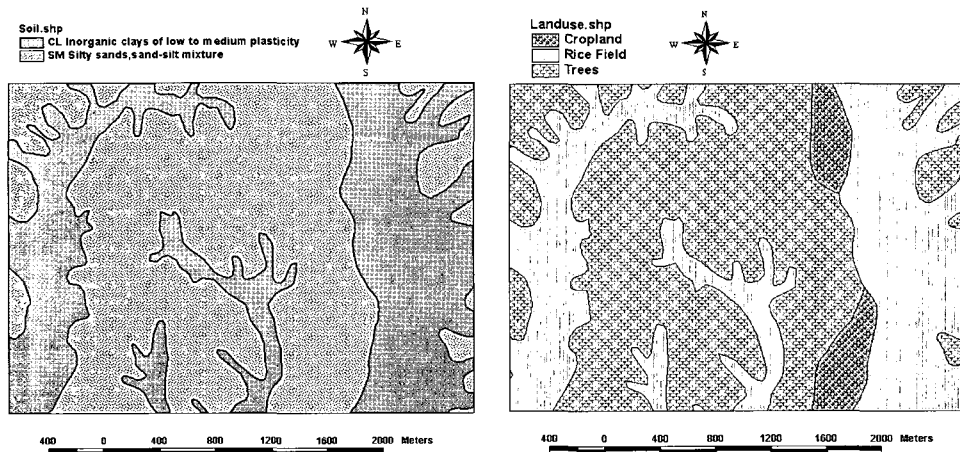
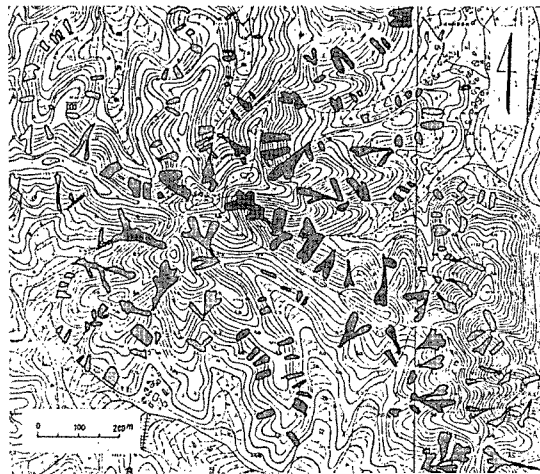


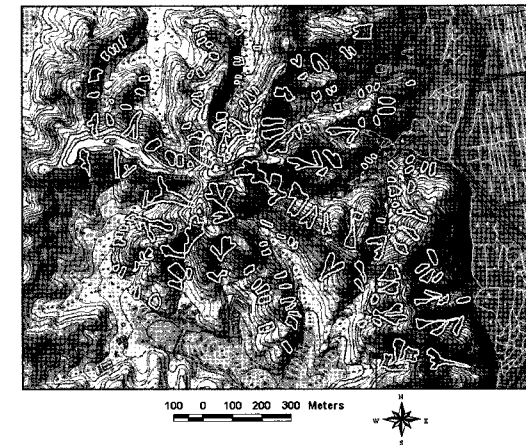
Fig. 4. Soil and Landuse Map around the Mt. Dalbong Area

달봉산에서 1991년 발생한 대부분의 산사태는 7월 21일 오전 10시부터 오후 4시 사이의 6시간 동안 218mm의 호우가 쏟아지는 기간 동안에 발생한 것으로 추정되고 있다(Jang et al., 1994). 이 6시간의 호우기간 중에서도 시간당 50mm를 넘는 폭우가 3시간 이상 지속되었다. 그 당시 풍속은 약 7m/s 정도로 주풍향은 북서서(NWW) 방향이었다. Park(1994)은 트랜스과 토탈 스테이션을 이용해서 Fig. 5의 매우 상세한 산사태흔적 지도를 작성하였다. 이와 같이 어떤 한 지역에서 발생한 산사태를 빠짐없이 정확하게 표시한 산사태지도는 최소한 국내에서는 매우 드물다고 할 수 있다. 파괴된 사면의 길이는 80% 이상이 50m 이내였으며 평균 길이는 약 0.7m 정도였다. Table 2에 달봉산에서 조사된 산사태 자료에 대한 통계치들이 제시되어 있다. 주된 사면파괴양상은 흐름(flows)과 평행슬라이드(translational slides)였으며 회전활동(rotational movement)은 3% 이내인 것으로 밝혀졌다.

본 연구에서는 Fig. 5(a)의 산사태지도를 스캔한 후 UTM 좌표계에 맞추어 좌표 보정을 수행하였다. 좌표 보정된 산사태지도를 이용하여 ArcView에서 총 158개의 다각형으로 구성된 산사태흔적 주제도를 Fig. 5(b)와 같이 작성하였다.



(a) Original Landslide Map (Park, 1994)



(b) Landslide Scar Polygon Theme

Fig. 5. Landslide Map of Mt. Dalbong

Table 2. Characteristics of Mt. Dalbong Landslides (Park, 1994)

Item	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Area* (m ²)	Volume (m ³)	Slope angle (degrees)	D/L (%)
Average value	29.7	upper 12.0 middle 14.5 lower 12.7	upper 0.7 middle 0.8 lower 0.6	390* (4.1 ha)	305	30.8	3.9

* Note : Area is re-estimated from length and width of landslide data. "4.1 ha" was the original value given by Park(1994).

SINMAP에서 기왕의 산사태자료는 산사태 발생시작점으로 입력된다. Fig. 5를 이용하여 산사태 발생시작점 주제도를 Fig. 6과 같이 작성하였다. 산사태 발생시작점은 산사태 흔적 상단 크라운(crown) 중앙부를 기준으로 하였으며 총 244개의 산사태 발생시작점이 식별되었다.

SINMAP의 주요 매개변수 3가지 중에서 첫 번째 인자인 흙의 내부마찰각(ϕ)에 대한 자료로는 Table 3에 제시된 3가지 경우에 대하여 검토하였다.

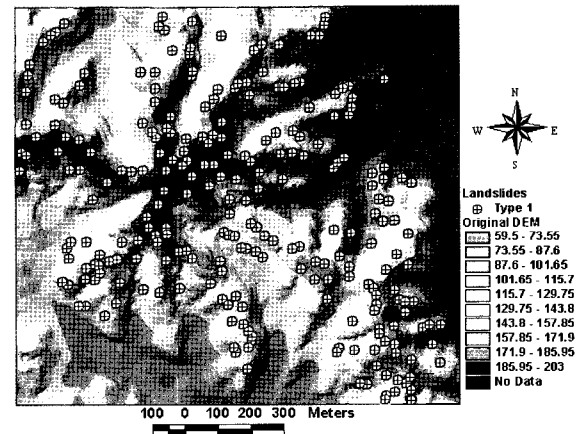


Fig. 6. Landslide Initiation Point Theme of Mt. Dalbong

Table 3. Test Cases of Soil Internal Friction Angle

Item	Int. friction angle (degrees)	Reference	Remarks
Case 1	25 ~ 35	Park D.K. (2004)	Soil classification table of Korea Land Corporation
Case 2	30 ~ 45	Pack et al. (no date)	SINMAP default values
Case 3	38 ~ 43	Kim et al. (1994)	Field soil sample tests

Case 1: 한국토지공사의 흙분류표에 제시된 흙의 내부마찰각에 대한 자료로서 흙분류는 통일분류법을 기준으로 하고 있다. 흙 SM에 대한 마찰각은 구성물질의 비율과 다짐 정도에 따라 25°~35° 정도로 나타나 있다.

Case 2: SINMAP 프로그램의 기본값(default values)으로서 다른 2가지 경우와 비교하기 위하여 검토하였다.

Case 3: Kim et al.(1994)이 1991년 7월 달봉산 산사태가 발생한 같은 날 산사태가 발생한 용인시 관내 다른 2지점의 산사태 현장 흙을 채취하여 실험한 자료로서 한 지점은 달봉산에서 1킬로미터 이내에 위치하고 있고 다른 한 지점은 약 5킬로미터 정도의 거리에 위치하고 있다. 이 지반에 대해서 "...relatively thin and gradually varies from highly permeable soil on surface to nearly impermeable rock at the base, which is a typical feature of geology in Korea." 라고 설명하고 있다. 그리고 흙의 구성물질에 대해서는 "...the layers consist of silty sand and sand above the bed rock."이라고 기술하고 있다.

두 번째 매개변수인 T/R에 대해서는 다음의 두 가지 방법을 적용하여 평가하였다. 이러한 방법을 적용함에 있어서 본 연구에서 적용한 기본적인 가정은 산사태 발생시작지점은 지하수로 포화되어 있다는 것이다(즉, $w = Ra/Tsin\theta = 1.0$). 그러나 이 가정은 사면경사와 배수특성 등에 따라 적용되지 않는 지역들이 생길 수 있다. 예를 들어 사면경사가 급하고 배수특성이 비교적 좋은 사면에서는 지하수로 포화되지 않더라도 사면파괴가 발생할 수 있다. 그럼에도 불구하고 이와 같은 가정을 적용한 것은 대부분의 사면파괴가 지하수에 의한 흙 습윤도 증가에 기인하고 있으며, "The quantity $(T/R)sin\theta$ [m] may be thought of as the

length of hillslope (planar, not convergent) required to develop saturation in the critical wet period being considered."라고 기술한 Pack et al.(2001)의 추정과 연계시키면 대략적인 T/R의 범위를 파악할 수 있기 때문이다.

첫 번째 방법에서는 각 산사태 발생시작점에 대한 집수면적 A를 SINMAP에서 계산된 'Contributing area' 그리드를 처리하여 산정하였다. 그리고 비집수면적 a는 (이 경우 $(T/R)sin\theta$ 와 같은 값을 갖게 됨) $a = A/b$ 에서 산정하였다. 여기서 b는 그리드 셀 크기로서 본 연구에서 적용한 그리드는 1.0m였다.

두 번째 방법은 사면이 시작되는 지점으로부터 산사태 발생시작점까지의 거리를 SINMAP에서 계산된 흐름방향선(flow direction line)을 따라 ArcView에서 측정하여 $(T/R)sin\theta$ 와 같은 값을 갖는 것으로 가정하는 것이다.

위의 두 가지 방법에 의하여 구한 $(T/R)sin\theta$ 에 평균 사면경사(예: 30°)를 적용하여 T/R을 구할 수 있다. Table 4는 이와 같이 두 가지 방법으로 구한 $(T/R)sin\theta$ 값의 통계적인 특성치를 정리한 것이다.

Method 1에 의하여 SINMAP에서 산정한 비집수면적 a는 ArcView에서 수리전문가의 경험적인 판단에 의하여 작성한 값에 비하여 표준편차와 범위가 매우 크게 나타났다. 이것은 DEM 자료의 부정확성과 산사태 지도 작성 과정의 오차 등에 기인하는 것으로 추정된다.

산사태가 발생한 사면의 평균경사 θ 를 30.8°로 가정하여 Table 4의 Method 2에서 구한 $a = (T/R)sin\theta$ 의 평균값 29.16m에 표준편차 15.90m를 더하여 얻은 값 즉, $a = 45.06m$ 를 다시 $sin\theta$ 로 나누어 T/R를 구하면

Table 4. Estimation of Specific Catchment Area, $a = (T/R)sin\theta$

(Unit: m)

Item	Mean	Std. dev.	Min.	Max.	Remarks
Method 1	29.12	46.06	1.0	644.9	Contributing area grid from SINMAP
Method 2	29.16	15.90	2.3	99.4	Manually measured

Table 5. Test Groups of T/R

(Unit: m)

T/R group	Remarks
1~30	For sensitivity analysis
5~100	Determined from the measured $(T/R)\sin\theta$
10~200	For sensitivity analysis
20~400	For sensitivity analysis
2,000~3,000	SINMAP default values

Table 6. Test Cases of Combined Cohesion

Item	Cohesion (No unit)	Remarks
Case 1	0.00	Jang et al. (1994)
Case 2	0.00~0.25	SINMAP default values

88m 정도가 된다. 사면경사 산정의 오차와 표준편차를 벗어나는 산사태 자료 등을 감안하여 본 연구에서는 달봉산지역 T/R의 상한계를 계산치 88m 보다 다소 큰 값인 100m로 추정하였다. 한편, Table 4의 Method 2에서 구한 $a = (T/R)\sin\theta$ 의 최소값 2.3m에서 상한계와 같은 방법으로 평균사면경사 30.8°를 적용하여 T/R의 하한계를 5m로 추정하였다. 본 논문에서는 Table 5에 제시된 바와 같이 총 5가지 경우로 구분하여 T/R 범위의 적정성을 비교 검토하였다.

세 번째 매개변수인 점착력 C 에 대해서는 가용한 자료가 거의 없는 실정이다. 사질토는 다른 흙에 비하여 점착력이 무시할 수 있을 정도로 작은 것으로 알려져 있다. 그리고 수목들의 뿌리가 기반암을 뚫고 들어가지 못하고 얽은 흙층 내에 머무르고 있어서 사면과파괴에 저항할 수 있는 역할을 하지 못한 것으로 평가되고 있다 (Jang et al., 1994). 따라서 Table 6과 같이 두 가지 경우로 구분하여 흙과 식생뿌리로 인한 점착력의 영향을 검토하였다. Eq. (2)에서 설명한 바와 같이 흙의 상대적 점착력 C 는 식생뿌리와 흙의 점착력을 합한 전체 점착력과 흙 무게와의 상대적인 비로서 무차원이다.

SINMAP에 필요한 세 가지 매개변수의 범위가 결정됨에 따라 ArcView에서 SINMAP 프로그램을 실행하여 결과를 분석하였다. 총 30가지 경우의 매개변수 조합에 대하여 분석하였으며, 여기에서는 그중 Run No. 22의 경우를 예로 들어 SINMAP 계산자료와 해석에 대해 간략히 설명하였고 구체적인 분석은 다음 절에 기술하였다. Fig. 7은 흡습윤지수(wetness index, WI)와 산사태흔적 및 산사태 발생시작점을 중첩하여 나타낸 것이다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 흡습윤지수가 높고 사면경사가 급한 지역들이 산사태위험도가 높은 것으로 분류되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 흡습윤지수와 사면안정계수 및 산사태 흔적

주제도를 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 산사태 흔적은 대부분 패각형이나 수지형을 나타내고 있으며 산사태 발생시작지점들은 예측된 산사태 위험지역과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 국내에서 일반적으로 발생하는 산사태 유형인 지하수가 모여드는 물골을 중심으로 슬라이딩 형태의 산사태가 발생한 후 하류부에서 토석류가 형성되는 과정을 잘 보여주고 있다.

4. SINMAP 적용성 검토: 예측과 실측자료의 비교

산사태 위험지역에 대한 SINMAP의 예측능력(performance)을 평가하기 위하여 본 논문에서는 다음의 3가지 척도를 도입하였다: (1) 산사태 흔적지역에 대한 SINMAP 예측의 SI 평균치와 표준편차, (2) 산사태가 발생하지 않은 지역에 대한 SINMAP 예측의 SI 평균치와 표준편차, (3) 산사태 발생시작점들이 산사태 위험도 분류와 일치하는 정도 등이다. SINMAP 예측의 SI 평균치와 표준편차에 대해서는 SINMAP의 사면안정계수 SI 계산결과가 레스터자료 형태이므로 산사태 흔적주제도와 ArcView Grid Analyst Extension을 이용하여 산사태 흔적지역과 산사태가 발생하지 않은 지역의 자료를 각각 추출(extract)하여 통계치를 산정하였다. 산사태가 발생한 지역에 대해서 뿐만 아니라 산사태가 발생하지 않은 지역에 대해서도 SI를 비교하는 것은 SINMAP이 산사태 위험도를 과도 또는 과소 평가하고 있는지 여부를 평가하기 위한 것이다.

실제 산사태발생지점과 SINMAP에서 예측된 위험도 분류(predicted state)가 얼마나 일관성 있게 잘 일치하는가를 살펴보기 위하여 산사태 발생시작점들이 6개 SI 그룹 내에서 어떻게 분포하는지를 가중치를 적용하여 평가하였다. 이를 위해서 본 논문에서는 산사태발생시작점(LIP)의 SINMAP 위험도 분류에 대해서 Eq. (9)와

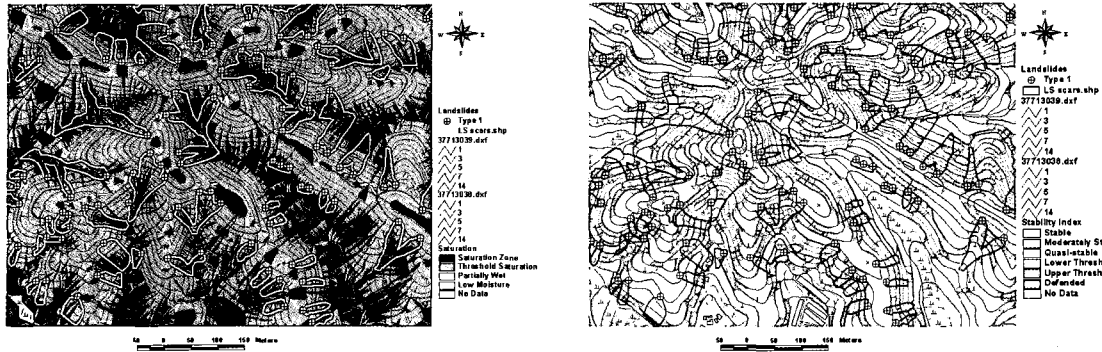


Fig. 7. Wetness Index Zones (left) and Stability Index for the Mt. Dalbang Area (Run No. 22) with 1991 Landslide Data (right)

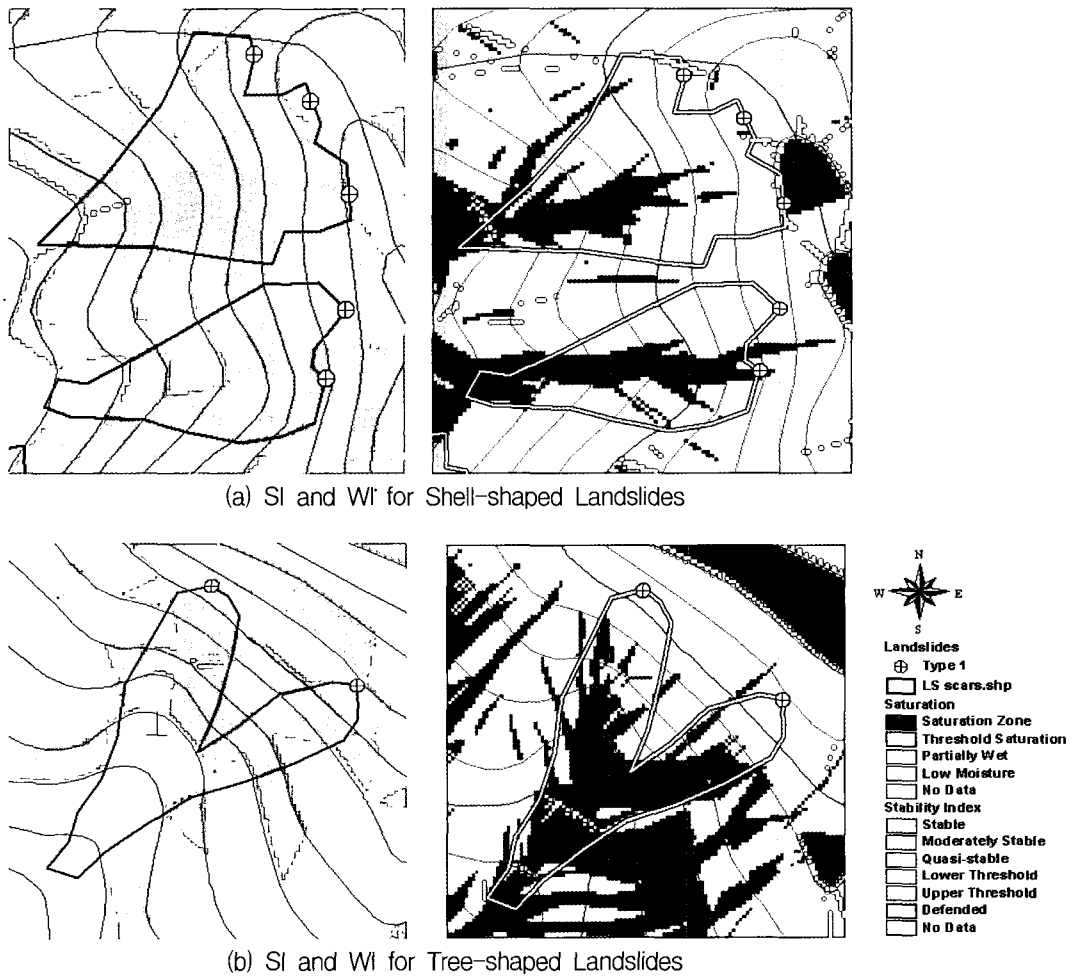


Fig. 8. Comparison of the SI and WI Zones within Landslide Areas (Run No. 22)

같이 가중평균치를 산정하였으며, 가중치의 기준은 Table 7과 같다.

$$WS = \frac{\sum_{PS=1}^6 (\text{Number of } LIPs_{PS} \times WF_{PS})}{\sum LIPs} \quad (9)$$

여기서 WS는 가중평균치(weighted score)이며, LIPs는 산사태 발생시작점들이고, WF는 가중치(weighting factor)이며, 아래첨자의 PS는 위험도 분류구간(predicted state)이다.

Table 7. Weighting Factor Criteria for Landslide Initiation Points

Condition	Predicted State (PS)	Weighting Factor (WF)
SI ≥ 1.5	Stable slope zone	0
1.25 ≤ SI < 1.5	Moderately stable zone	20
1.0 ≤ SI < 1.25	Quasi-stable zone	40
0.5 ≤ SI < 1.0	Lower threshold slope zone	60
0.0 ≤ SI < 0.5	Upper threshold slope zone	80
SI < 0.0	Defended slope zone	100

SINMAP 예측의 정확도(accuracy)는 산사태가 발생한 지역인지의 여부에 따라 다음의 두가지 척도로 평가하였다: (1) 산사태 흔적지역에 대해서는 산사태 흔적주제도에서 산사태 흔적지역에 포함된 전체 그리드 셀 수에 대한 SI가 1.0 보다 크거나 같은 셀들의 수의 비율로 정의하였다. (2) 산사태가 발생하지 않은 지역에 대해서는 산사태 흔적주제도에서 산사태가 발생하지 않은 지

역에 포함된 전체 그리드 셀 수에 대한 SI가 1.0 보다 작은 셀들의 수의 비율로 정의하였다.

Table 8은 SINMAP의 3가지 매개변수들의 조합에 의한 30가지 경우(즉, 흙의 내부마찰각 3가지 경우 × 점착력 2가지 경우 × T/R 5가지 경우)를 적용하여 달봉산의 산사태를 예측하고 이를 실제 산사태자료와 비교분석한 결과를 정리한 것이다.

Table 8. SINMAP Analytical Prediction Results for the Mt. Dalbong Landslides

Int. friction angle (degrees)	Combined cohesion (-)	T/R (m)	Landslide scar area			Safe area			Weighted score	Run No.
			SI		Accuracy (%)	SI		Accuracy (%)		
			Mean	Std dev		Mean	Std dev			
25~35	0.00	1~30	0.31	1.55	95.80	1.88	3.53	28.72	95.0	1
		5~100	0.32	1.55	95.75	1.90	3.52	28.88	90.0	2
		10~200	0.33	1.55	95.64	1.93	3.51	29.51	85.1	3
		20~400	0.35	1.54	95.46	1.98	3.49	30.97	81.0	4
		2,000~3,000	0.86	1.54	70.69	2.58	3.38	62.53	63.2	5
	0.00~0.25	1~30	0.53	1.53	95.80	2.09	3.43	28.72	78.0	6
		5~100	0.54	1.53	95.75	2.11	3.42	28.88	75.0	7
		10~200	0.55	1.53	95.64	2.13	3.41	29.51	73.4	8
		20~400	0.60	1.52	95.46	2.18	3.39	30.97	71.0	9
		2,000~3,000	1.09	1.47	70.69	2.70	3.30	62.53	54.6	10
Average			0.55	1.53	90.67	2.15	3.44	36.12	76.63	-
30~45	0.00	1~30	0.53	1.58	85.96	2.27	3.50	46.08	83.9	11
		5~100	0.47	1.55	92.10	2.14	3.48	36.24	78.8	12
		10~200	0.50	1.55	91.97	2.18	3.47	36.99	74.8	13
		20~400	0.55	1.54	91.66	2.25	3.44	38.87	72.0	14
		2,000~3,000	1.24	1.49	44.51	2.94	3.28	77.32	42.5	15
	0.00~0.25	1~30	0.83	1.52	85.96	2.45	3.40	46.08	66.4	16
		5~100	0.76	1.51	92.10	2.33	3.39	36.24	68.5	17
		10~200	0.78	1.51	91.97	2.35	3.37	36.99	66.6	18
		20~400	0.82	1.50	91.66	2.41	3.35	38.87	63.9	19
		2,000~3,000	1.34	1.44	44.51	2.99	3.24	77.32	41.0	20
Average			0.78	1.52	81.24	2.43	3.39	47.10	65.84	-
38~43	0.00	1~30	0.55	1.60	79.68	2.34	3.51	52.85	82.9	21
		5~100	0.57	1.60	79.61	2.37	3.50	53.11	76.1	22
		10~200	0.59	1.59	79.41	2.41	3.47	53.84	71.6	23
		20~400	0.66	1.58	78.79	2.49	3.44	55.81	67.2	24
		2,000~3,000	1.63	1.51	14.68	3.42	3.21	92.80	22.0	25
	0.00~0.25	1~30	0.86	1.54	79.68	2.53	3.40	52.85	64.9	26
		5~100	0.87	1.53	79.61	2.54	3.39	53.12	63.6	27
		10~200	0.90	1.53	79.41	2.57	3.38	53.84	62.1	28
		20~400	0.95	1.52	78.79	2.63	3.35	55.81	58.2	29
		2,000~3,000	1.69	1.46	14.68	3.45	3.28	92.80	20.6	30
Average			0.93	1.55	66.43	2.67	3.39	61.68	58.92	-
Average		-	0.71	1.53	82.06	2.37	3.41	46.12	69.25	-

Table 8에 나타난 바와 같이 흙의 내부마찰각(ϕ)이 SINMAP 사면안정해석에 가장 결정적인 영향을 미치는 매개변수임을 알 수 있다. 특히, 흙의 내부마찰각의 하한계(즉, 25°, 30°, 38°)는 Eq. (5) and (6)에 나타난 바와 같이 사면안정계수 SI 값을 결정하는데 결정적인 역할을 하며 이에 따라 SI 평균치와 산사태발생지점과 위험도 분류기준과의 일관성 정도를 나타내는 가중평균치(weighted scores)에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 즉, 전반적인 사면안정계수 SI의 평균치는 흙 마찰각의 하한계에 비례하여 증가하며 산사태 발생지점과 예측된 위험도와와의 일관성에 대한 가중평균치는 감소하는 경향을 나타냈다. 산사태가 발생했던 지역들에 대한 SI의 평균치는 T/R이 2,000~3,000m인 경우를 제외하고는 모두 1.0 이하로 나타났으며 산사태가 발생하지 않았던 지역들에 대해서는 1.88~3.45의 범위를 나타내 SINMAP의 예측능력이 전반적으로 우수한 것으로 분석되었다. 한편, 산사태 발생지점들이 SINMAP에서 계산한 위험도 분류기준과 어느 정도 일관성 있게 부합되는지를 나타내는 가중평균치는 20.6~95.0 사이로서 편차가 비교적 컸으며 흙의 내부마찰각 외에도 점착력과 T/R에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

산사태가 발생했던 지역과 발생하지 않았던 지역에 대한 예측의 정확도(accuracy)는 두 지역에 대한 예측의 적정한 균형점을 모색할 필요가 있다고 보이며, 이런 관점에서 흙의 내부 마찰각 38°~43°가 가장 적절한 결과를 보이고 있다고 판단되며, 그 다음으로는 30°~45°, 25°~35°의 순으로 적절한 것으로 판단된다. 흙의 내부마찰각 25°~35°의 경우 산사태 발생지역에 대한 예측의 정확도는 90.67%로 매우 높지만 산사태가 발생하지 않았던 지역에 대해서는 36.12%의 매우 낮은 정확도를 나타내고 있다. 따라서 달봉산 지역에 흙의 내부마찰각 25°~35°를 적용할 경우 산사태위험도를 과도하게 높게 평가할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

식생뿌리와 흙에 의한 점착력 C 는 산사태발생지역과 산사태가 일어나지 않았던 지역에 대한 예측의 정확도에 직접적으로 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이것은 본 논문에서 검토한 두 가지 점착력의 경우 모두 하한계가 0.0으로 동일하기 때문이다. 그러나 SINMAP의 기본값인 점착력 0.0~0.25는 점착력을 무시한 경우(즉, 상한계와 하한계 모두 0.0)에 비하여 사면안정계수 SI 평균치에 있어서는 다소 높은 값을 나타냈고 산사태발생지점이 예측된 위험도 분류기준과 일관성 있게 일치되는 정도를 나타내는 가중평균치(Ws)에

있어서는 전반적으로 낮은 값을 보여 달봉산 지역의 식생과 흙의 산사태 억지력을 과대하게 평가하는 것으로 나타났다.

SINMAP의 세 번째 매개변수 T/R에 대해 본 논문에서 검토한 5가지 경우에 대하여 분석한 결과 T/R이 1~30m인 경우 244개의 산사태 발생시작점들 중에서 69.7%에 해당하는 170개 지점이 완전 포화된 지역(fully saturated zone)에 포함되는 것으로 예측되었다. 그러나 이것은 Kim et al.(1994)이 앞에서 언급한 달봉산 인근 2곳의 산사태 현장에 대한 사면의 침투해석(infiltration analysis)에서 분석한 결과에 비추어 볼 때 과도한 것으로 판단된다. 그들의 침투해석결과에 의하면 시간당 50mm를 넘는 3시간에 걸친 집중호우가 시작된 후 사면의 상태와 인장크랙의 존재 여부 등에 따라 1.25~3 시간 후에 사면의 지하수위는 최고수위에 도달하였다. 지하수위가 최고수위에 이른 상태에서의 사면의 상대습윤도를 당시 분석된 유한차분 해석결과로부터 판단해보면 대체로 70~90% 이내인 것으로 나타났다. 다만 포화되지 않은 인장크랙이 사면 상단에 있는 경우 사면 하단에서 사면 길이의 대략 10% 정도까지 췌기형의 완전 포화된 지하수대를 형성하는 것으로 나타났다.

한편, 본 논문에서 검토한 T/R 중에서 가장 큰 값인 2,000~3,000m인 경우는 대부분의 산사태 발생지점 흙들이 사실상 건조한 상태에 있는 것으로 예측되고 있다. 이 경우도 역시 앞의 T/R이 1~30m인 경우와 마찬가지로 달봉산 산사태 현장의 조건에 부합되지 않는 것으로 판단된다. 한편, T/R이 5~100m인 경우 244개의 산사태발생시작점들 중에서 35개 지점(14.3%)이 완전 포화된 지역(fully saturated zone)에 포함되며, 나머지 209개 지점(85.7%)은 포화되었거나 일부 포화된 흙(partially saturated or possibly saturated zone)에 포함되는 것으로 예측하고 있다. T/R을 증가시킴에 따라 포화된 지반(saturated zone)과 비포화된 지반(unsaturated zone)을 구분하는 집수면적의 기준은 더욱 증가하게 되어 더욱 많은 산사태 발생지점들이 더욱 건조한 흙 조건 쪽으로 이동하게 된다. 앞에서 적정 매개변수들로 결정된 흙의 내부 마찰각 38°~43°와 흙과 식생의 점착력을 무시하는 경우(Run No. 21~25)에 대하여 본 논문에서 검토한 5가지 경우의 T/R에 대해 가중평균치를 비교해 볼 때 5~100m인 경우가 달봉산 산사태를 가장 적절하게 재현하고 있는 것으로 보인다.

5. 결론 및 발전방향

SINMAP은 정상상태 수문모형(steady state topo-

graphic hydrologic model)과 무한평면사면해석모형 (infinite plane slope stability model)을 결합한 GIS 기반의 산사태 위험도 산정 프로그램이다. 본 논문에서는 서울에서 남쪽으로 약 78킬로미터 지점에 위치한 용인시 소재 달봉산에 1991년 7월 집중호우시 발생한 산사태에 대하여 SINMAP을 적용하였으며, SINMAP 예측은 기록된 산사태 발생지역과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. SINMAP 프로그램의 3가지 매개변수(흙의 내부마찰각, 점착력, T/R)에 대하여 실측 산사태자료와의 비교를 통하여 검토한 결과 달봉산 지역에 대한 흙의 내부마찰각은 38°~43°가 적절한 것으로 분석되었다. 또한 25°~35°는 이 지역의 산사태 위험도를 과도하게 높게 예측할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 한편, 식생뿌리와 흙의 점착력이 산사태 역지에 미치는 효과는 무시할 수 있는 것으로 분석되었다. 이 것은 이 지역의 지반이 모래질 흙(SM)으로 흙의 점착력이 무시할 수 있을 정도로 작고, 식생의 뿌리도 기반암을 뚫고 들어가지 못하고 1.0m 이내의 얇은 토층에 머무르고 있기 때문으로 추정된다. 한편, 지반의 배수특성을 반영하는 T/R의 경우 달봉산 지역은 5~100m가 적절한 것으로 분석되었다.

본 논문을 통하여 SINMAP의 적용성을 검토해 본 결과 SINMAP은 사면 경사가 급하고 토층 깊이가 얇은 국내산지의 산사태 위험도를 예비적으로 평가하는 유용한 도구가 될 수 있을 것으로 보인다. 앞으로 국내에서의 활발한 산사태 연구와 적절한 대책수립을 위해서는 발생했던 산사태에 대한 정밀한 측량과 기록의 유지가 선행되어야 할 것으로 사료된다. 산사태가 발생하고 나서 시간이 경과하기 전에 산사태에 대한 상세한 조사와 기록을 작성하는 것이 중요하며 이에 대한 법적 제도적 및 예산의 뒷받침이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 달봉산 지역 산사태에 국한하여 검토하였지만 국내에서의 적용성을 높이기 위해서는 앞으로 다양한 사면 조건(식생, 지반, 사면경사, 토층 두께 등)에 대한 폭 넓은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

경기도 (2001). **경기도 치수종합대책수립 연구용역 결과보고서**, pp. 797-861.
 김원영 (2001). "토석류 산사태(Debris flow)의 발생원

과 예측." **방재연구**, Vol. 3, No. 4, 국립방재연구소, pp. 4-14.
 박덕근 (2004). **土石流의 發生作用 및 被害低減에 관한 研究**. Report No. NIDP-2003-07, 행정자치부/국립방재연구소.
 백운일, 김원영, 노승규 (2004). "GIS를 이용한 한탄강댐 유역의 산사태 위험도 예측." **방재정보지**, Vol. 6, No. 1 (제17권), 한국방재협회, pp. 18-24.
 조선일보 (2002). "태풍이 할퀴고 간 백두대간." 9월 4일 (항공사진).
 최경 (2001). "산사태 예보와 위험지 판정기술." **방재연구**, Vol. 3, No. 4, 국립방재연구소, pp. 15-27.
 Jang, Y.S., Kim, S.K., Shin, S.M., and Ryu, C.H. (1994). "A Study on the Landslides and Their Shape of Failure in Yongin-Ansung County." *Proc. the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows*, Seoul, Korea, pp. 291-306.
 Kim, S.K., Jang, Y.S., Seo, H.S., and Han, S.K. (1994). "Failure Mechanisms of the Landslides in Yongin-Ansung County." *Proc. the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows*, Seoul, Korea, pp. 107-117.
 Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, V.N. (no publishing date). *SINMAP-A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, SINMAP User Manual*.
 Pack, R.T., Tarboton, D.G., and Goodwin, V.N. (2001). "Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP." *Proc. 15th annual GIS conference, GIS 2001*, Vancouver, British Columbia.
 Park, Y.W. (1994). "On the Rainstorm Induced Landslides in Yongin-Ansung Region." *Proc. the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows*, Seoul, Korea, pp. 323-330.

(논문번호:05-93/접수:2005.07.06/심사완료:2005.10.28)