

초기 산사태 발생에 영향을 미치는 지형요소의 특성분석

Analysis on the Characteristics of Geomorphological Features Affecting the Initial State of Landslides

차 아 름¹ Cha, A-Reum

김 태 훈² Kim, Tai-Hoon

Abstract

The main objective of this study is to evaluate the preliminary landslide hazard based on the identification of geomorphological features, which are believed to be critical values in the initial state of landslides. Two methods, SINMAP and Planarity analyses, are used to simulate those characteristics where landslides are actually located. Results showed that both methods well discriminate geomorphic features between stable and unstable domains in the landslide areas. SINMAP analysis which is the consecutive model considering external factors like infiltration identifies the landslide hazard especially for debris flow type landslides better than planarity analysis focusing on a specific area. This analysis combined with other methods dealing with specific characteristics of geomorphological feature, the accurate landslide hazard will be evaluated.

요 지

본 연구는 실제 지형의 특성을 파악, 이를 초기 산사태 위험도 평가에 활용하는데 그 목적이 있다. 지형특성 분석을 위해 SINMAP과 통계적 기법인 평면도(Planarity)를 활용하였으며 이를 실제 산사태 발생지역에 적용, 지형 특성과 산사태 위험도와의 관계를 규명하고자 하였다. 분석결과를 제안한 두 가지 기법 모두 위험도가 높다고 평가한 지역에서는 초기 산사태 위험도가 상대적으로 높게 산정되었다. 이는 본 연구에서 제시한 방법이 지형특성과 산사태 위험도와의 관계성 규명에 있어 합리적임을 보여준다고 할 수 있다. 또한, 실제 현장조사 결과와 비교한 초기 산사태 위험도는 SINMAP 기법이 토석류와 같은 연속성 산사태에 있어 보다 정확하게 판단되었으나, 특정요소의 위험성을 구체적으로 고려할 수 있는 기법을 추가적으로 고려한다면 보다 정확한 초기 산사태 위험도를 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

Keywords : Landslide, Debris flow, SINMAP (Stability INDEX MAPing), Planarity, Eigen value analysis

1 비회원, 국립재난안전연구원 방재연구실 연구원, 한양대학교 토목공학과 박사과정 (Researcher, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Institute, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 국립재난안전연구원 방재연구실 시설연구사 (Member, Analyst, Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Institute, Tel: +82-2-2078-7801, Fax: +82-2-2078-7789, taihoon@ualberta.ca, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

기후변화로 인한 재해발생 형태가 최근 들어 비정형화 및 대형화 되고 있으며, 이로인한 자연재해 인명피해는 연평균 43.5명, 그 중 산사태 등 사면재해 사망자는 연평균 15.1명으로 자연재해 전체 사망자의 34.7%를 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다(NEMA, 2012). 이와 같은 높은 인명피해는 사면재해 예방 및 대응이 무엇보다 중요하다는 것을 보여주는 단적인 예이다. 과거 국내 발생 산사태를 분석한 결과는 대부분의 산사태가 불투수성 기반암 위에 놓여있는 얇은 깊이의 풍화 잔적토 토층에서 발생하고 있으며 이러한 특징은 지하수와 깊은 상관성을 나타내고 있다고 할 수 있다(Oh et al., 2006). 또한, 집중강우, 침투로 인한 지반의 약화, 지질, 인위적 자연훼손 등이 원인으로 분석되고 있다. 이에 본 연구에서는 지형형상의 특징에 따른 초기 산사태 위험도 평가를 위해 수문학과 토질역학의 이론적 기반에 근거한 사면안정 해석모형인 SINMAP과 방향성 데이터를 이용하여 지형요소를 분석한 평면도(Planarity) 기법을 활용하였으며, 이를 2011년 발생한 춘천 ○○지역에 적용하여 모의해석을 실시하였다.

2. 산사태 모의해석 기법

2.1 무한사면 안정해석 : SINMAP(Stability INDEX MAPping)

본 연구에서 활용한 SINMAP은 활동면의 형태를 무한사면으로 가정해 해석법으로 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 큰 사면으로 가정한다. 가정한 무한사면 안정 해석모형에 적용한 안전율(Factor of safety)은 식 (1)에서 산출된다(Pack et al., 1998; Oh et al., 2006).

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

여기서 C_r : 식생의 점착력[N/m²], C_s : 흙의 점착력[N/m²], D : 토층 깊이[m], D_w : 토층내 지하수 깊이[m], ρ_s : 흙의 단위중량[kg/m³], ρ_w : 물의 밀도[kg/m³], θ : 사면경사[Deg.], ϕ : 내부마찰각[Deg.], g : 중력가속도(9.81[m/s²])를 나타낸다. 식 (1)은 흙의 밀도가 습윤상태

와 건조상태가 같다는 가정 하에 유도되었다. 다시, 식 (1) 중 토양 깊이 D 를 토양 두께 h 로 변환하고, 간략화하면 식 (2)를 얻을 수 있다. 여기서 $r = \rho_w/\rho_s$, $h = D\cos\theta$, $C = (C_s + C_r)/(h\rho_s g)$, $w = D_w/D = h_w/h$ 이다.

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

흙의 상대적 점착력 C 는 식생과 흙의 점착력을 합한 전체 점착력과 토양무게와의 상대적인 비를 나타내며 무차원이다. 상대 습윤도(Relative wetness)는 사면의 배수특성과 연관시켜서 $w = Ra/T\sin\theta$ 로 가정할 수 있다. 이때, Ra 는 정상상태 지하수 재충진율(Steady state lateral recharge rate)을 나타내며, a 는 비집수면적(Specific catchment area), R 은 투수계수(Hydraulic conductivity)를 의미한다. 이 중, 비집수면적 a 는 지하수 재충진에 기여하는 집수면적(A)을 지하수가 유입되는 사면의 등고선을 따라 측정된 횡방향 길이(b)로 나눔으로써 정의할 수 있으며, 가정한 상대 습윤도를 이용하여 식 (2)를 나타내면 식 (3)과 같다.

$$FS = \frac{C + \cos\theta[1 - \min(\frac{R}{T} \frac{a}{\sin\theta}, 1)r]\tan\phi}{\sin\theta} \quad (3)$$

식 (3)에서 최소값인 $\min(Ra/T\sin\theta, 1)$ 은 상대 습윤도의 상한계가 1.0임을 의미한다. 한편 식 (4)와 (5)는 사면안정계수를 정의하기 위하여 사용된 식들로, 이 중 집수면적 a 와 사면경사 θ 는 지형자료로 산정이 가능하며, 물과 흙의 밀도비 r 은 0.5로 가정하고 있다. 또한, 복합점착력(C), 흙의 마찰력($\tan\phi$), 지하수 재충진율과 흙의 투수량 계수의 비(R/T) 등은 불확실성을 내포한 매개변수로서 SINMAP을 해석하는데 중요한 요소이다(Pack et al., 1998).

SINMAP에서는 이들 매개변수들이 각각 상한계와 하한계 범위를 가지며, 이 범위 내에서 발생확률이 균일한 확률분포를 갖는 것으로 가정한다. 임의로 지하수 재충진율과 흙의 투수량 계수의 비(R/T)를 x 로 $\tan\phi$ 를 t 로 표현하면 $C \sim U(C_1, C_2)$, $x \sim U(x_1, x_2)$, $t \sim U(t_1, t_2)$ 로 나타낼 수 있다. 이와같은 확률분포 가정하에 하한계 C 값과 t 값 그리고 상한계 x 값(즉, C_1, t_1, x_2)을 가지는 경우, 안전율(FS) 값이 1보다 크며 사면 붕괴 위험성이

적은 지역으로 판단할 수 있다(식 (4)).

$$SI = FS_{\min} = \frac{C_1 + \cos\theta[1 - \min(x_2 \frac{a}{\sin\theta}, 1)r]t_1}{\sin\theta} \quad (4)$$

반면에 상한계 C 값과 t 값 그리고 하한계 x 값(즉, C_2, t_2, x_1)을 가지는 경우, 안전율(FS) 값이 1보다 작으며, 사면붕괴 위험성이 큰 지역으로 판단할 수 있다(식 (5)).

$$SI = FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos\theta[1 - \min(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1)r]t_2}{\sin\theta} \quad (5)$$

SINMAP의 사면안정지수(SI)는 수치적으로 정확하게 해석된 절대값이라기 보다는 상대적인 위험성을 표현하는 지표로서 주로 활용되고 있으며 사면의 안정성을 등분포 확률값으로 평가한 값이다. Table 1은 SINMAP의 사면안정지수(SI)를 6단계로 등급을 구분, 도시한 것이다(Pack et al., 1998; Oh et al., 2006; Cha, 2014).

2.2 방향성 데이터를 활용한 통계적 분석

산사태는 산사태 미발생지역과 달리 발생지역을 중심으로 첨단부의 급경사지, 인장균열, 그리고 사태물질과 같은 다양한 형태의 지형정보를 생성한다(Kim et al., 2012). 이러한 지형정보를 이용한 산사태의 위험도를 결정하는데 있어 필수적으로 요구되는 것은 바로 지형요소의 정량화(Quantification)이다. Hobson(1972)는 평면요소에 수직으로 분포하는 단위벡터를 이용하여 평면의 방향성을 결정한 바 있다. 평면이 아닌 구(sphere)의 형태로 구성된 축방향 자료의 방향성 결정은 고유치(Eigen value) 및 고유벡터(Eigen vector)로 나타낼 수 있다(Watson, 1966). N 개의 단위벡터(l_i, m_i, n_i)가 일정한 방향(u)으로 구평면(spherical surface)에 분포되는 경우,

모멘트 I 는 다음과 같다(식 (6)).

$$I = N - u' M u = N - \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 u_j M_{jk} u_k \quad (6)$$

여기서 M 은 방향 매트릭스(Orientation matrix)이며, 식 (7)과 같이 단위벡터의 방향 코사인(Direction cosine)으로 구성된다.

$$M = \begin{pmatrix} \Sigma l_i^2 & \Sigma l_i m_i & \Sigma l_i n_i \\ \Sigma m_i l_i & \Sigma m_i^2 & \Sigma m_i n_i \\ \Sigma n_i l_i & \Sigma n_i m_i & \Sigma n_i^2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

방향 매트릭스 M 의 고유치(Eigen value)는 특성방정식 M 의 해와 같으며, N 개의 단위벡터로 정규화된 고유치(Eigen value)는 다음과 같다(식 (8)).

$$\lambda_i (i = 1, 2, 3; \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3), S_j = \frac{\lambda_j}{N}, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

이와 같은 통계적 분석은 대량의 지질 및 지형 자료가 확보될 경우 특히 유용하다. Mark(1974)와 Woodcock(1977)은 방향성 데이터를 이용하여 암반의 거칠기 모양과 이와 연관된 변형률의 진행에 대하여 논의한 바 있다.

본 연구에서는 산사태 발생 후 형성되는 지형요소를 확인하기 위해 방향성 자료의 통계적 평가를 통해 얻어지는 고유치(Eigen value)를 분석하였다.

고유치를 활용한 지형요소의 판독은 우선 LiDAR를 통해 취득한 고도정보를 대축척 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)로 변환하는 것으로 시작된다. 다음으로 수치표고모형을 이용, 연구지역의 지형에 대한 기본정보(경사와 경사방향)와 방향 코사인(Direction cosines)을 계산하게 된다. 각각의 방향 코사인은 식 (7)

Table 1. Classification of SINMAP Stability Index (SI) (Pack et al., 1998)

Condition	Class	Predicted state	Parameter range
$SI > 1.5$	1	Stable slope zone	Range cannot model instability
$1.5 > SI > 1.25$	2	Moderately stable zone	Range cannot model instability
$1.25 > SI > 1.0$	3	Quasi-stable slope zone	Range cannot model instability
$1.0 > SI > 0.5$	4	Lower threshold slope zone	Pessimistic half of range required for instability
$0.5 > SI > 0.0$	5	Upper threshold slope zone	Optimistic half of range required for stability
$0.0 > SI$	6	Defended slope zone	Range cannot model stability

에 나타난 방향 매트릭스의 요소로 사용된다.

방향성 자료의 특성을 나타내는 고유치 값은 3차 방정식을 이용하여 계산되었으며(λ_i), 이 값들은 다시 연구지역 전체요소의 수(N)로 나누어 정규화(S_i) 하였다.

마지막으로 정규화된 고유치(S_1, S_2, S_3)간의 비율은 자연로그를 이용, 다음과 같이 구분되어 도시 할 수 있다(Woodcock, 1977; Woodcock and Naylor, 1983).

$$P = \ln\left(\frac{S_1}{S_2}\right) \quad (9)$$

식 (9)의 P 는 고유치 비로 나타낸 지형의 평면정도를 나타내는 값으로 이를 평면도(Planarity)라 정의한다(Kim et al., 2012).

높은 평면도는 각 평면을 구성하는 단위벡터(unit vector)가 일정한 방향으로 수렴하는 경우를 가리키며 결과적으로 매끄러운(smooth) 지형을 형성한다(McKean and Roering, 2004; Kasai et al., 2009). 이와는 반대로 거친(rough) 지표면의 경우 이를 구성하는 단위벡터의 방향이 일정하지 않게 되고 결과적으로 평면도는 낮은 값을 가지게 된다.

3. 해석기법의 적용

3.1 연구지역 개요

춘천 ○○지역(위도 37°56.099', 경도 127°47.591')은

2011년 발생한 2개의 산사태(A, B)로 많은 인명(사망 13명) 및 건물피해(7동)가 발생한 지역이다. 이 현장의 지질특성은 전반적으로 붕적층이 발달되어 있으며 전석이나 자갈이 포함된 점성이 있는 세립질의 토사로 구성되어 있다. 세립질 흙은 강우 등으로 흙이 포화되었을 때 전단강도가 급격히 저하, 토층내에서 사면파괴가 일어나기 쉽게 전단 파괴면(Rupture surface)을 형성할 수 있다. 특히 사면 정상부의 군용 참호는 산사태 초기발생에 직간접적인 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

산사태 발생 당시 강우특성을 살펴보면, 2011년 6월 22일에서 7월 14일까지 23일간 724mm에 상당하는 선형강우가 발생하였고, 산사태 발생 직전 6시간 동안 261mm의 지속강우량이 기록되었다. 또한 7월 26일 23시경에는 65mm의 최대 시우량이 관측되었고, 약 1시간 후 토석류가 발생한 것으로 조사되었다.

현장조사를 통해 조사된 자료를 기반으로 연구지역의 산사태 발생 및 그 대략적인 거동은: ① 집중호우로 인해 산 정상부 인근에서부터 사면이 붕괴; ② 붕괴된 토사물질이 하부로 흘러내리며 확산되면서 지표수와 결합, 토석류(Debris flow) 거동; ③ 사면 하부에 위치하고 있는 가옥 파손 및 인명피해 유발로 요약할 수 있다. 유발된 토석류의 길이는 약 436m이며, 주요 발생원인으로는 집중호우와 같은 외부요인과 임도와 같이 내부적인 요인의 결합으로 발생한 것으로 조사되었다(NDMI, 2011; 차아름, 2014). 산사태 발생 전, 후의 지형 변화는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 연구지역의

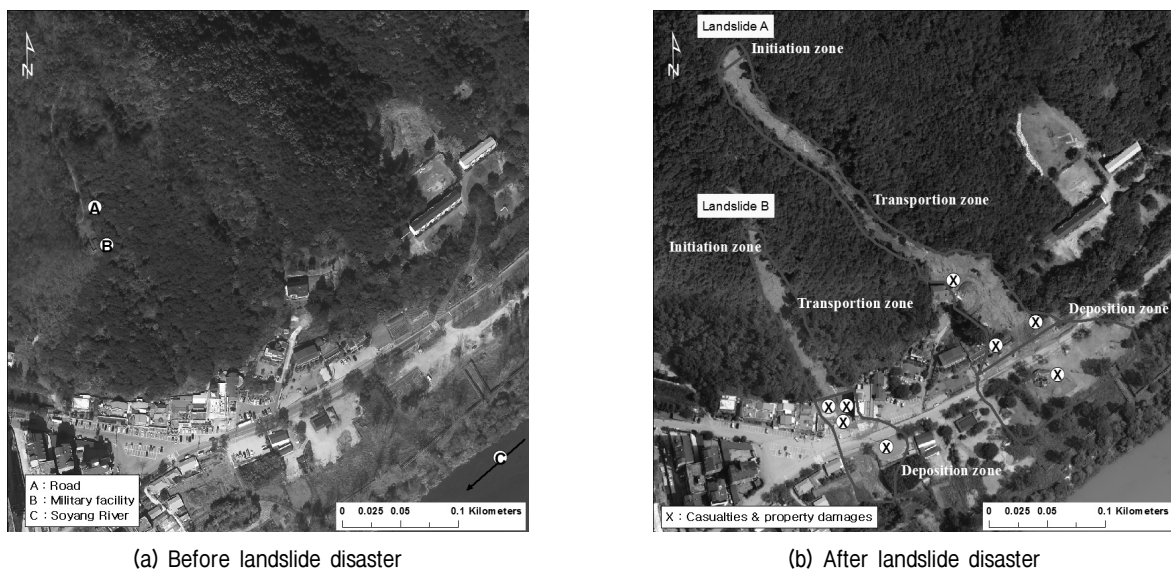


Fig. 1. Change of the ground surface due to landslides in 2011 (Cha, 2014)

산사태 발생 전의 지형을 보면, 연구지역의 북동쪽에서 남서쪽으로 흐르는 소양강을 중심으로 북쪽 지역은 계곡지형의 모습을 보여주고 있다. 특히 하천에 직각으로 발달한 다수의 계곡들이 사면 내의 지표수를 하천으로 손쉽게 유입시키며, 수로형 토석류(Channelized debris flow)로 발전될 위험성을 내포하고 있다. 또한, 계곡지형에 인접하여 하천으로 인한 퇴적지대(River deposit) 및 홍수터(Flood plain)가 존재하고 있으며 이곳에 대부분의 주거지역이 위치하고 있다. 사면 하부의 넓게 분포되어 있는 이러한 지형학적 요소는 산사태 발생시 토사물질로 피해가 가중될 수 있는 특징을 보여준다(Cha et al., 2013; Cha, 2014).

3.2 SINMAP에 의한 토석류 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 먼저, 무한사면 안정해석을 이용한

Table 2. Input variables and their values for SINMAP analysis (Lee and Kim, 2013*)

Variables	Default value		Unit
Gravity constant	9.81		m/s ²
Water density	1,000		kg/m ³
Ratio of transmissivity	Lower bound	1,000	m
	Upper Bound	2,000	
Soil cohesion*	Lower Bound	0.0	t/m ²
	Upper Bound	0.0	
Soil friction angle*	Lower Bound	25	Degree
	Upper Bound	40	
Soil density*	2,000		kg/m ³

SINMAP 모형을 연구지역에 적용하여 사면안정등급(SI)을 산정하였다. 수치지형 자료로는 1m×1m DEM(2009년 LiDAR 자료)을 이용하였으며, SINMAP 분석이 사용되는 입력 변수인 토질 특성값은 연구지역의 대부분을 차지하고 있는 화강풍화토를 대상으로 기 연구된 대표지역의 토질 물성치 결과를 반영하였다(Lee et al., 2013, Table 2). 또한, 분석을 위한 이동경로 범위는 VanDine(1996)이 제시한 바에 따라 발생(Initiation), 이동(Transportation), 퇴적(Deposition) 등 3개 지역으로 분류하였다.

Fig. 2는 2011년 토석류가 발생한 연구지역의 SINMAP 분석 결과를 보여주고 있다. SINMAP 분석에 의한 산사태 위험도를 보면 붕괴가 시작되는 시점은 연구지역 산사태 A, B 각각 Upper threshold가 32%, 60%으로 분석되었으며, 이는 곧 토석류에 취약한 지점임이라는 것을 알 수 있다. 또한, 하부 퇴적지역은 산사태 발생 이전부터 주거지역이 형성된 지역으로 비교적 안정한(Stable) 상태인 것으로 나타났다(A : 95%, B : 89%). 토석류 발생시 이러한 하부 퇴적지역은 토사물질이 확산하는 지역이므로 많은 인명피해를 유발하게 된다.

3.3 평면도(Planarity)를 활용한 지형요소 평가 결과

두 번째로, 지형학적 분석을 위해 전술한 방향성 데이터를 통해 얻어진 고유치(Eigen value)를 활용한 평면도(Planarity)를 산정하여 지형의 평면정도를 평가하였다. SINMAP과 마찬가지로 분석을 위한 이동경로 범위를 VanDine(1996)을 따라 분류하였다. Fig. 3은 연구지역

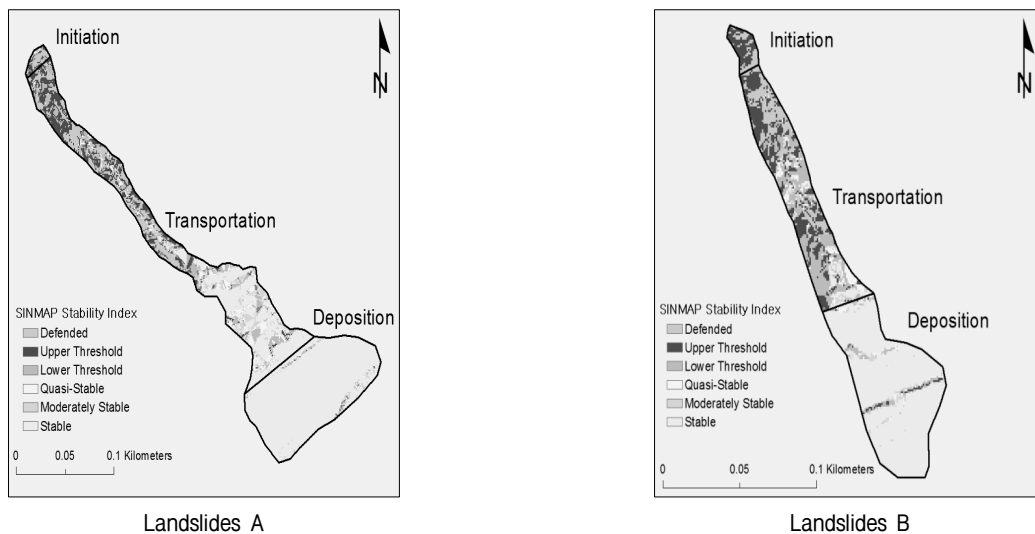


Fig. 2. Distribution of SINMAP

의 평면도를 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 바와 같이 낮은 평면도(Planarity)의 값(3 이하), 즉 단위벡터의 방향이 일정하지 않은 거친(rough) 지표면 상태인 지형은 주로 토석류 이동(Transportation) 지역에 집중되고 있음을 알 수 있다. 또한, 남쪽 지역, 즉, 퇴적(Deposition) 지역의 경우 직선모양의 낮은 평면도의 값(3 이하)이 존재하고 있는 것으로 나타나고 있는데 이는 주거지 사이의 도로 등의 구조물이 보여주는 급경한 경사변화 때문으로 분석되었다. 한편 토석류 발생(Initiation) 지역의 평면도는 3에서 5값으로 나타났다. 이러한 결과는 산사태의 발생이 단순한 지형적 요소로 결정되는 것이 아니며, 전술한 바와 같이 인공물의 설치 및 이로 인한 자연사면의 형상 변경과 같은 내부적인 요인과 집중호우와 같은 외부요인의 상호작용에 의해 유발되는 복합적인 작용임을 간접적으로 보여주는 것이라 할 수 있다.

4. 비교 및 분석

본 연구에는 산사태 지역의 지형 및 수리학적 특성을 조사, 이를 산사태 위험도에 연계하는데 있어 효과적인 방안을 제시하는데 그 최종 목적이 있다. 본 연구에서 제시한 기법들은 결국 개별 산사태의 시공간적 거동, 즉 산사태 발생에서 퇴적에 이르는 일련의 과정을 이해하는데 활용될 수 있다. 또한 본 연구에서 활용된 기법사이의 상관관계 규명을 통해 향후 보다 정확한 산사태 위험도 평가를 위한 기초자료를 제공할 수 있을 것이다. 이를 위한 초기 시도로써 연구지역에서 실제 발생한 산사태로 본 연구에서 제시한 두 가지 기법이 산사태 위험도에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. Fig. 4와 5는 실제 발생 산사태의 고도(Elevation)에 따른 두 기법의 결과 값 분포를 보여주고 있다.

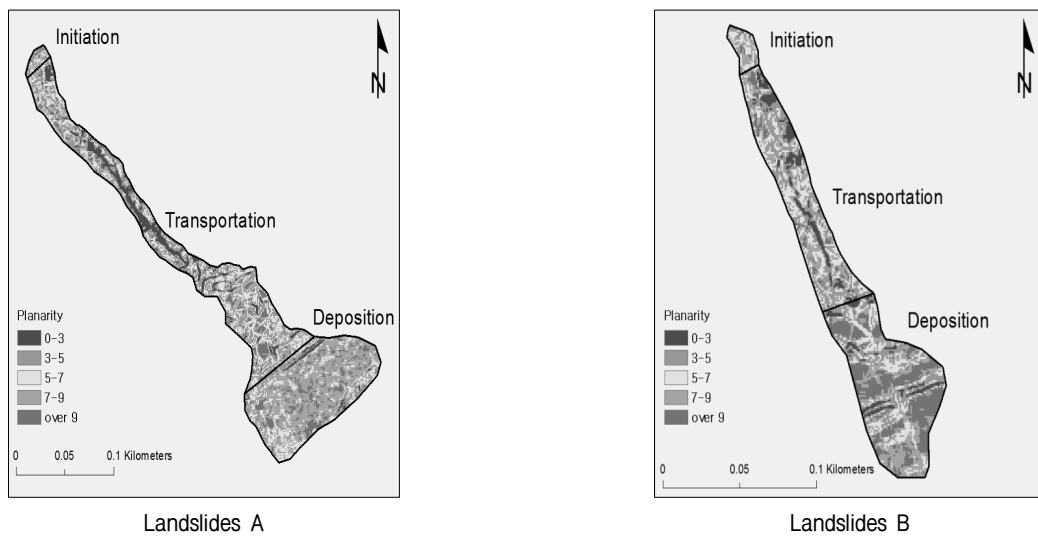


Fig. 3. Distribution of Planarity

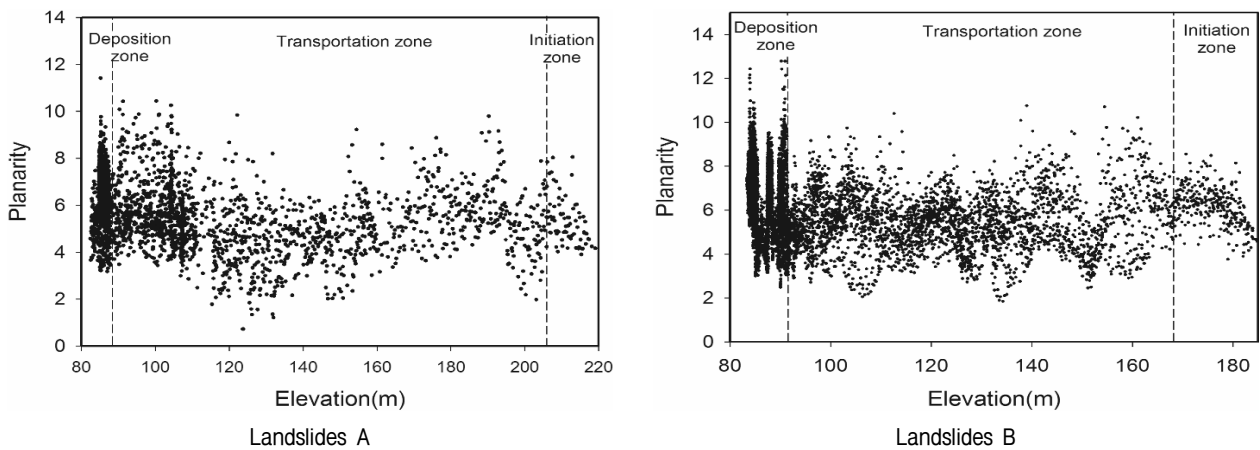


Fig. 4. Distribution of the Planarity along the longitude of landslides

평면도(Planarity)와 고도(Elevation)를 비교해보면 지표면에 가까울수록 즉, 퇴적(Deposition) 지역에서는 평면도 값이 증가하며, 이러한 경향은 산사태 A보다 B에서 두드러진 것으로 나타났다. 한편, 토석류 발생지점(Initiation) 부근에서는 평면도(Planarity) 값이 낮게 나타났다. 이는 토석류 발생에 따른 불규칙한 지형정보가 반영된 것으로 분석된다. 또한, 이동(Transportation) 범위에서는 평면도(Planarity) 값의 증가와 감소가 주기적으로 반복하는 것으로 나타났다.

고도(Elevation)에 따른 사면안정지수(SI)의 분포를 도시하면 시작(Initiation) 부근에서는 사면안정지수(SI) 값이 낮게 나타났으며 이는 높은 산사태 위험도를 보여준다고 할 수 있다. 주거지 인근 즉, 토석류 퇴적부(Deposition)에서는 산사태 A, B 모두 사면안정지수(SI) 값이 높게 나타났으며, 산사태 위험도가 낮은 것으로 볼 수 있다. 그러나 퇴적부(Deposition)에 주거지가 형성되어 이로 인한 인해 인명피해 및 재산피해가 발생하였다.

한편, 산사태 A 110m, 산사태 B 130m 부근에서 사면안정지수(SI) 값이 급격한 증가현상을 나타냈다. 이는 그 부근에서 지형적 변화가 발생하였음을 의미하며, 실제로 DEM 상에서도 일부 사면의 붕괴흔적으로 지형이 완만하게 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 지형적 변형은 동일한 고도에서 산출된 평면도(Planarity) 값의 분포에서도 확인할 수 있다.

보다 현실적인 산사태 위험도 평가를 위한 두 기법간의 상관관계 분석은 기법 간 분석결과의 해석에 있어서의 차이점을 보여주고 있다. SINMAP의 경우 산사태 발생(Initiation) 및 이동(Transportation) 지역에서 모두 위험한 것으로 나타난 반면, 평면도(Planarity) 분석의 결

과는 이동(Transportation) 지역의 특정부분에 한해 그 위험성이 높음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 각 모형의 기본원리에서 비롯된다고 할 수 있는데, SINMAP의 경우 포화된 지역을 연계, 특정방향으로 위험도의 흐름을 보여주는 선구조(Linear)의 연속성을 강조하는 반면, 평면도(Planarity)의 경우, 각 요소 당 내제하고 있는 위험성을 거칠기(Roughness)의 정도로 나타내므로 특정 지역 중심의 위험성을 대별한다고 할 수 있다. 따라서 SINMAP 기법이 토석류와 같은 연속적 거동을 보이는 산사태의 전체적인 안정성 해석에는 다소 유리하다고 할 수 있으나, 산사태 발생 특정요소의 위험성을 구체적으로 설명할 수 있는 벡터분산과 같은 기법을 추가로 고려한다면, 보다 정확한 초기 산사태 위험도 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 SINMAP과 평면도(Planarity) 기법을 산사태의 지형요소 분석에 이용, 이를 통한 초기 산사태 발생 위험도를 평가하는 방안을 제시하고자 하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 지형특성이 산사태 위험도에 미치는 영향을 보여주고 있으며, 개별 모형보다는 다수의 모형을 이용, 각각의 장점을 활용하여 보다 현실적인 산사태 위험성 평가를 수행해야 한다는 것을 잘 보여주고 있다.

이는 결국 산사태의 발생이 단순한 지형적 요소만으로 결정되는 것이 아니며, 내·외부적인 요인들간 상호작용에 의해 유발되는 복합적인 자연현상임을 인지하고 다양한 방법을 통해 산사태 발생 메커니즘에 대

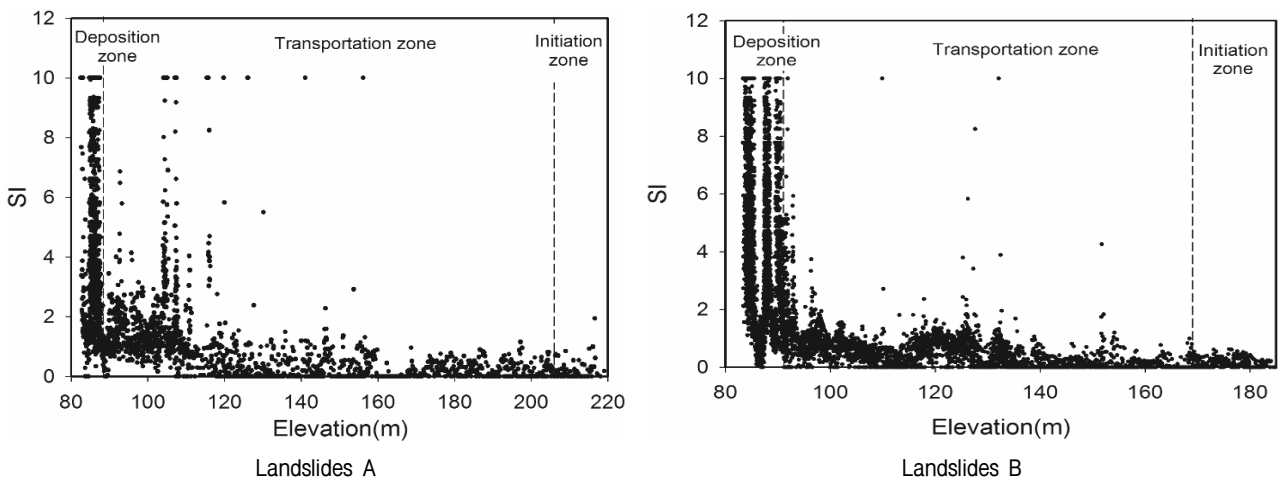


Fig. 5. Distribution of the SINMAP along the longitude of landslides

한 추가적인 연구가 필요함을 의미한다. 또한, 평면도 (Planarity) 해석과 같이 특정요소의 산사태 위험성 평가를 추가적으로 활용한다면 보다 정확한 산사태 위험도 평가가 이루어질 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌 (References)

1. National Emergency Management Agency (2012), "Annual Disaster Report 2012", NEMA, pp.1226-1242.
2. Oh, K. D., Hong, I. P., Jun, B. H., Ahn, W. S., and Lee, M. Y. (2006), "Evaluation of gis-based landslide hazard mapping", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.39, No.1, pp. 23-33.
3. Pack, R. T., Tarboton, D. G., and Goodwin, C. N. (1998), "The SINMAP approach to terrain stability mapping", *In 8th congress of the international association of engineering geology*, Vancouver, British Columbia, Canada, pp.21-25.
4. Cha, A. R. (2014), "A Comparative Study on the Identification of Landslide Hazard Using Geomorphological Characteristics", *Korean Geo-Environmental Society*, Vol.15, No.6, pp.67-73.
5. Kim, T. H., Cruden, D. M., and Martin, C. D. (2012), "Identification of geomorphological features of landslides using airborne laser altimetry", *11th International Symposium on Landslides and 2nd North American Symposium on Landslides*, Banff, Alberta, Canada, pp.567-573.
6. Hobson, R. D. (1972), "Surface roughness in topography: quantitative approach", *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen & Co Ltd., London, Great Britain, pp.221-245.
7. Watson, G. S. (1966), "Statistics of orientation data", *Journal of Geology*, Vol.74, No.5, pp.786-797.
8. Mark, D. M. (1974), "On the interpretation of till fabrics", *Geology*, Vol.2, No.2, pp.101-104.
9. Woodcock, N. H. (1977), "Specification of fabric shapes using an eigenvalue method", *Geological Society of America Bulletin*, Vol.88, No.9, pp.1231-1236.
10. Woodcock, N. H. and Naylor, M. A. (1983), "Randomness testing in 3-dimensional orientation data", *Journal of Structural Geology*, Vol.5, No.5, pp.539-548.
11. McKean, J. and Roering, J. (2004), "Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry", *Geomorphology*, Vol.57, pp.331-351.
12. Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., and Fujisawa, K. (2009), "LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan", *Geomorphology*, Vol.113, No.1-2, pp.57-69.
13. National Disaster Management Institute (2011), *Establishment of collapse warning & evacuation criteria for steep slopes*, *Developments of the GIS based steep slope collapse determination system (I)*, Primary Research Report, NDMI-PR-2011-14-01, 154p.
14. Cha, A. R., Kim, T. H., and Jung, M. S. (2013), "Preliminary risk assessment for landslides using directional vectors", *KGS Fall National Conference*, pp.1041-1046.
15. Lee, J. S. and Kim, Y. T. (2013), "Infiltration and stability analysis of weathered granite slope considering rainfall patterns", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.5, pp.83-91.
16. VanDine, D.F. (1996), *Debris flow control structures for forest engineering*, Research Branch, B.C. Ministry of Forests, Victoria, B.C., Working Paper 08/1996, pp.4-6.

Received : April 28th, 2014
 Revised : June 2nd, 2014
 Accepted : June 5th, 2014