

# 지형특성을 활용한 산사태 위험도 판단을 위한 비교

## A Comparison on the Identification of Landslide Hazard using Geomorphological Characteristics

차 아 름<sup>†</sup>  
Areum Cha

Received: March 27<sup>th</sup>, 2014; Revised: April 8<sup>th</sup>, 2014; Accepted: May 7<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT** : Landslide disasters including debris flows are the one of the most frequent natural disasters in Korea, and losses of lives and property damages due to these catastrophic events have been increased every year. Various mitigation programs and related policies have been conducted in order to respond and prepare landslide disasters. Most landslide reduction programs are, however, focused on recovery actions after the disasters and lead to unrealistic consequences to the affected people and their properties. The main objective of this study, therefore, is to evaluate the landslide hazard based on the identification of geomorphological features, which is for the preparedness of the landslide disasters. Two methodologies, SINMAP and vector dispersion 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. This proves that geomorphological characteristics well describe a relationship with the existing landslide hazard. SINMAP analysis which is based on the consecutive model considering external factors like infiltration is well identify the landslide hazard especially for debris flow type landslides rather than vector dispersion focusing on a specific area. Combining with other methods focusing specific characteristics of geomorphological feature, accurate landslide hazard assessments are implemented.

**Keywords** : Debris flow, SINMAP (Stability INDEX MAPping), Directional data, Statistical evaluation, Vector dispersion

**요 지** : 토석류를 포함하는 산사태 재해는 우리나라에서 그 발생빈도가 상대적으로 큰 자연재해 중 하나이며 이로 인한 인명 및 재산피해는 매년 증가하고 있다. 이에 정부에서는 사면재해 대응 및 예방을 위한 다양한 방지대책을 추진하고 있으나, 대부분 재해 발생 이후 발생지역을 중심으로 복구대책을 수립하는 것이 대부분이라 실질적인 국민의 생명과 재산을 보호하는 예방대책이라고 보기는 어렵다. 이에 본 연구는 산사태 재해 예방을 목적으로 실제 지형의 특성을 파악, 이를 위험도 평가에 활용하는 방안에 대해 알아보려고 하였다. 지형특성 분석을 위해 SINMAP(Stability INDEX MAPping)과 통계적 기법인 벡터 분산을 활용하였으며 이를 실제 산사태 발생현장에 적용, 지형특성과 산사태와의 관계를 규명하고자 하였다. 분석결과는 제안한 두 가지 기법이 동일하게 위험도가 높다고 평가한 지역에서는 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 산사태 위험도는 SINMAP 기법이 토석류와 같은 연속성 산사태에 있어 보다 정확하게 판단되었으나 특정요소의 위험성을 구체적으로 고려할 수 있는 기법을 추가적으로 고려한다면 보다 정확한 산사태 위험을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

**주요어** : 토석류, 신맵, 방향성 데이터, 통계적 평가, 벡터 분산

## 1. 서 론

기후변화로 인한 재해발생 형태가 최근 들어 비정형화 및 대형화되고 있으며, 돌발적인 호우를 보면 자연재해로 평균 43.5명이 사망하였고, 그중 산사태 등 사면재해 사망자는 평균 15.1명으로 자연재해 전체 사망자의 34.7 %를 차지하고 있다. 이는 사면재해 예방 및 대응이 중요하다는 것을 보여주는 단적인 예이다. 이에 본 연구에서는 산사태

재해 사전예방을 목적으로 실제 지형의 특성을 파악, 이를 산사태 위험도 평가에 활용하는 방안에 대해 알아보려고 하였다.

산사태는 산사태 미발생지역과 달리 발생지역을 중심으로 침단부의 급경사지, 인장균열, 그리고 사태물질과 같은 다양한 형태의 지형정보를 생성한다(Kim et al., 2012). 뿐만 아니라 과거 국내 발생 산사태를 분석한 결과, 대부분의 산사태가 불투수성 기반암 위에 놓여있는 얇은 깊이의 풍화

<sup>†</sup> Disaster Prevention Research Division, National Disaster Management Institute, Department of Civil Engineering, Hanyang University  
(Corresponding Author : areumcha@gmail.com)

잔적토 토층에서 발생하고 있으며 이러한 특징은 지하수와 깊은 상관성을 나타내고 있다(Oh et al., 2006).

따라서 본 연구에서는 지형형상의 특징에 따른 산사태 위험도 평가를 위해 수문학과 토질역학적 이론적 기반에 근거한 사면안정 해석모형인 SINMAP과 방향성 벡터를 이용하여 지형요소를 분석한 벡터 분산(vector dispersion)을 활용하였으며, 이를 2011년 실제 인명피해가 발생한 춘천 ○○ 지역에 적용하여 모의해석을 실시하였다.

## 2. 산사태 모의해석 기법

### 2.1 SINMAP(Stability INdex MAPping) 무한사면 안정해석

본 연구에서 적용한 SINMAP은 활동면의 형태를 사면 표면에 평행한 직선으로 가정한 해석법으로 길이가 활동면의 깊이에 비하여 충분히 큰 사면으로 가정하게 된다. 가정한 무한사면 안정 해석모형에 적용한 안전율(factor of safety)은 Eq. (1)과 같다(Pack et al., 1998; Oh et al., 2006).

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

여기서  $C_r$  : 식생의 점착력[N/m<sup>2</sup>],  $C_s$  : 흙의 점착력[N/m<sup>2</sup>],  $D$  : 토층 깊이[m],  $D_w$  : 토층 내 지하수 깊이[m],  $\rho_s$  : 흙의 단위중량[kg/m<sup>3</sup>],  $\rho_w$  : 물의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $\theta$  : 사면경사[Deg.],  $\phi$  : 내부마찰각[Deg.],  $g$  : 중력가속도(9.81[m/s<sup>2</sup>])를 나타낸다. Eq. (1)은 습윤상태와 건조상태의 흙의 밀도가 같다는 가정 하에 유도되었다. Eq. (1)에서 토양 깊이  $D$ 를 토양 두께  $h$ 로 변환하고, 간략화하면 Eq. (2)와 같다. 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. 또한 상대 습윤도(relative wetness)는 사면의 배수특성과 연관시켜서  $w = Ra / T \sin\theta$ 로 가정하였다. 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  $A/b$ 와 같이 정의할 수 있으며, 가정한 상대습윤도를 이용하여 Eq. (2)를 나타내면 Eq. (3)과 같다.

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

Eq. (3)에서 최소값인  $\min(Ra / T \sin\theta, 1)$ 은 상대 습윤도의 상한계가 1.0임을 의미한다. Eq. (4)와 Eq. (5)는 사면안정계수를 정의하기 위하여 사용된 식들이다. 이 중 집수면적  $a$ 와 사면경사  $\theta$ 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.

SINMAP에서는 이들 매개변수가 각각 상한계와 하한계 범위를 가지며, 이 범위 내에서 발생확률이 균일한 확률분포를 갖는 것으로 가정한다. 임의로  $R/T$ 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. 이와 같은 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(Eq. (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  $C_2, t_1, x_2$ )

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

을 가지는 경우, 안전율( $FS$ ) 값이 1보다 작으며, 사면붕괴 위험성을 큰 지역으로 판단할 수 있다(Eq. (5)).

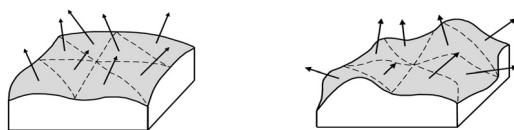
$$SI = FS_{\max} = \frac{C_2 + \cos\theta [1 - \min(x_1 \frac{a}{\sin\theta}, 1)] r t_2}{\sin\theta} \quad (5)$$

SINMAP의 사면안정지수( $SI$ )는 수치적으로 정확하게 해석된 절대값이라기 보다는 상대적인 위험성을 표현하는 지표로서 주로 활용되고 있다. Table 1은 SINMAP의 사면안정지수( $SI$ )를 6단계의 분류등급으로 구분, 도시한 것이다 (Pack et al., 1998).

## 2.2 방향성 벡터를 활용한 지형요소 분석

산사태를 통해 생성되는 다양한 지형요소들(사면 상부의 균열, 퇴적물질 등)은 산사태가 발생한 지역을 발생하지 않은 지역과 구분할 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 지형 요소는 과거에 발생한 곳에서 발생하는 경우가 대다수이고 (Varnes & IAEG Commission on Landslides and other Mass Movement on Slopes, 1984), 지표면의 거칠기(roughness)를 증가시키는 주요 원인으로 작용한다. 그러므로 지표면의 형상정보는 과거 산사태 발생지역을 보여줄 뿐만 아니라 잠재적인 산사태의 발생 위험도를 확인하는데 유용한 기초자료로 활용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 산사태로 발생하는 지형요소의 거칠기를 방향성 벡터를 활용해 분석, 이를 산사태 위험도와 연관시키고자 하였다.

방향성 벡터를 활용한 지형요소의 분석은 지형을 구성하고 있는 표면의 지형학적 이질성(heterogeneity)의 정도를 정량적으로 평가하는 방법의 하나로(Kim, 2012), 연구대상 지표면의 방향과 그 분포를 평가하여 지표면의 거칠기를 결정한다. Hobson(1972)은 특정 지역의 한 영역(domain) 안의 지표면은 다수의 평면으로 구성되어 있으며 이들은 서로 연결되어 있다고 가정하고, 이러한 평면들의 거칠기 정도를 평면에 수직인 단위벡터의 형태로 나타낼 수 있다고 하였다. 결국 전체 단위벡터의 합은 거친 지표면에서 작은 값을, 평평한 지표면에서는 큰 값을 가지게 된다(Fig. 1). 이와 같은 단위벡터와 지표면의 거칠기 간의 관계는 벡터



(a) Uniform ground surface (b) Non-uniform ground surface

Fig. 1. Direction and shape of the ground surface (Modified from Hobson (1972))

강도(vector strength)와 분산(vector dispersion)이라는 두 가지 매개변수로 정의할 수 있으며(Hobson, 1972), 단위 벡터의  $x, y, z$  성분은 방향 코사인(directional cosine)으로 얻을 수 있다(Eq. (6)).

$$\begin{aligned} z &= 1 \cdot \cos\alpha \\ xy &= 1 \cdot \sin\alpha \\ x &= xy \cdot \sin\beta = \sin\alpha \sin\beta \\ y &= xy \cdot \cos\beta = \sin\alpha \cos\beta \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\alpha$  = 사면 경사(slope),  $\beta$  = 사면 방향(aspect)

벡터 강도는 단위벡터 합의 길이  $R$ 을 단위 벡터의 수  $N$ 으로 나눈 값이며, 벡터 분산은 1에서 벡터 강도 값을 뺀 값으로 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다.

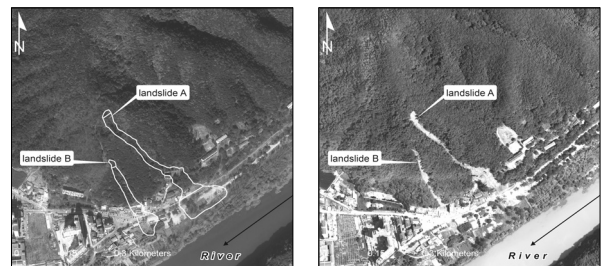
$$\begin{aligned} \text{벡터 강도}(VS) &= \frac{R}{N} = \frac{\sqrt{(\sum x)^2 + (\sum y)^2 + (\sum z)^2}}{N} \quad (7) \\ \text{벡터 분산}(VD) &= 1 - \text{벡터 강도}(VS) = 1 - \frac{R}{N} \end{aligned}$$

Eq. (7)의 물리적인 의미는 다음과 같다. 벡터 합  $R$ 이 벡터 수  $N$ 에 근접하게 되면 지표면은 균등하게 되고(즉 평평한 지면) 벡터 강도는 1이 된다. 반면 벡터 분산은 0이 된다. 반대로 벡터 합  $R$ 이 0에 가까워지면 벡터 강도는 0, 벡터 분산은 1, 그리고 지표면은 비균등 상태, 즉 거칠게 된다.

## 3. 해석기법의 적용

### 3.1 연구지역 개요

춘천 ○○지역(위도 37°56.099', 경도 127°47.591')은 2011년 발생한 21건의 인명피해 유발 산사태 재해 지역의 하나로 많은 인명(사망 13명) 및 건물피해(7동)가 발생한 지역이다(Fig. 2). 현장의 지질특성은 전반적으로 붕적층이 발달되어 있으며 전석이나 자갈이 포함된 점성이 있는 세립질의 토사로 구성되어 있다. 세립질 흙은 강우 등으로 흩어



(a) Before landslide disaster (b) After landslide disaster

Fig. 2. Change of the ground surface due to landslides in 2011

포화되었을 때 전단강도가 급격히 저하, 토층 내에서 사면 파괴가 일어나기 쉽게 전단 파괴면(rupture surface)을 형성할 수 있다.

산사태 발생 당시 강우 특성을 살펴보면, 2011년 6월 22일에서 7월 14일까지 724 mm에 상당하는 선행강우가 발생하였고, 산사태 발생 직전 6시간 동안의 지속강우량은 261 mm로 관측되었다. 또한 7월 26일 23시에는 65 mm의 최대 시우량을 기록, 이후 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 확산하면서 지표수와 결합, 토석류(debris flow) 거동; ③ 사면 하부에 위치하고 있는 가옥 파손 및 인명피해 유발로 요약할 수 있다. 특히 사면 정상부의 균용 참호는 산사태 초기발생에 직간접적인 원인으로 작용한 것으로 판단된다. 유발된 토석류의 길이는 약 436 m이며, 주요 발생 원인으로는 집중호우와 같은 외부요인과 임도와 같이 내부적인 요인의 결합으로 발생한 것으로 조사되었다(NDMI, 2011). 산사태 발생 전후의 지형 변화는 Fig. 2에 나타내었다.

연구지역의 산사태 발생 전의 지형을 보면, 연구지역의 북동쪽에서 남서쪽으로 흐르는 하천을 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 퇴적 지대(river deposit) 및 홍수터(flood plain)가 존재하고 있으며 이곳에 대부분의 주거지역이 위치하고 있다. 사면 하부에 넓게 분포되어 있는 이러한 지형학적 요소는 산사태 발생 시 토사물질에 의한 피해가 가중되는 특징을 보여준다(Cha et al., 2013).

Table 2. Input variables and their values for SINMAP analysis

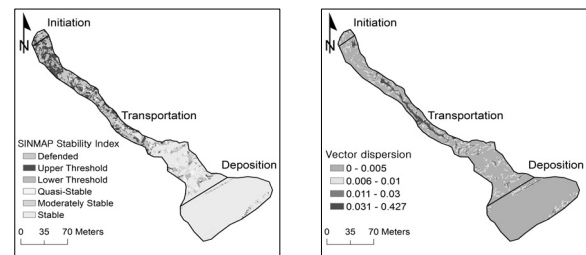
Variables	Default value	Unit
Gravity constant	9.81	$m/s^2$
Water density	1,000	$kg/m^3$
Ratio of transmissivity	Lower Bound	1,000
	Upper Bound	2,000
Soil cohesion	Lower Bound	0.0
	Upper Bound	0.0
Soil friction angle	Lower Bound	25
	Upper Bound	40
Soil density	2,000	$kg/m^3$

### 3.2 SINMAP에 의한 토석류 시뮬레이션 결과

무한사면 안정해석을 이용한 SINMAP 모형을 연구지역에 적용, 토석류의 사면안정등급을 도출하였다. 수치지형 자료로는 1 m × 1 m DEM(2009 측정)을 이용하였으며, Table 2에 나타낸 바와 같이 기존 유사지역의 토질물성치 결과를 활용, SINMAP의 사면안정지수(SI) 산정에 활용하였다(Lee & Kim, 2013). 여기서 흙의 투수량 계수비(ratio of transmissivity)는 일반적으로 내부마찰각이 36~43°인 경우 1,000에서 2,000인 것으로 가정하였다(Pack et al., 1998).

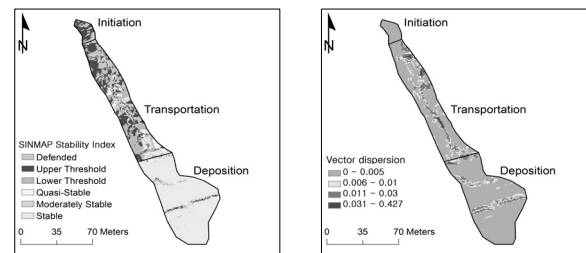
Fig. 3과 Fig. 4는 2011년 토석류가 발생한 연구지역의 산사태 범위 내에 존재하는 산사태 발생 이전의 지형요소를 분석한 결과를 보여주고 있다. SINMAP 분석에 의한 산사태 위험도를 보면 붕괴가 시작되는 시점은 연구지역 산사태 A, B 모두 Upper threshold가 대부분인 것으로 분석되었으며 토석류에 취약한 지점임을 알 수 있다(Fig. 3(a), Fig. 4(a)).

각각의 산사태는 토석류 산사태의 특성에 적합하게 3개의 구역, 시작(initiation)-이동(transportation)-퇴적(deposition) 지역으로 구분하였는데, 실제로 2011년 산사태가 일어난 지역에 적용했을 때, 시뮬레이션 결과는 기존 수계를 따라 전술한 3개의 구역 특징을 보이며, 산사태가 일어난 것으로 확인되었다. 또한 산사태가 발생하는 시작지역의 경우 불안정한 상태를 나타내는 사면안정지수에 해당되는 값이 다른 두 지역에 비해 상대적으로 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다(57 % 이상).



(a) Distribution of SINMAP (b) Distribution of Vector dispersion

Fig. 3. Extent of landslide A and distributions of the analyzed values



(a) Distribution of SINMAP (b) Distribution of Vector dispersion

Fig. 4. Extent of landslide B and distributions of the analyzed values

### 3.3 방향성 벡터를 활용한 지형요소 평가 결과

본 연구지역의 지형학적 분석을 위해 전술한 방향 벡터를 활용한 벡터 분산을 도출하여 지표면의 거칠기를 평가하였다. Fig. 3(b), Fig. 4(b)는 연구지역의 벡터 분산 값을 보여주고 있다. 그림에서 나타낸 바와 같이 높은 벡터 분산 값(0.03 이상), 즉 비균등 상태가 심한 지형은 주로 계곡의 중간 부분인 이동지역에 집중되고 있음을 알 수 있다. 이를 조금 더 살펴보면 하천과 인접하고 있는 남쪽 지역, 즉 퇴적지역의 경우 직선 모양의 비균등 지형(0.03 이하의 벡터 분산 값)이 존재하고 있는 것으로 나타나고 있는데 이는 하천의 침식작용으로 인해 하천과 맞닿아 있는 사면하부가 수직으로 형성되어 있기 때문으로 판단된다. 한편 사면경사가 급하고( $28^\circ$  이상), 상대적으로 매우 비균등한(벡터 분산 값 0.01 이상) 지형요소는 연구지역 내 정상부 및 사면 하부로 내려가는 경로를 따라 대부분 위치하고 있으며, 이는 피해범위 전체 대비 각각 0.19%(산사태 A), 0.20%(산사태 B)에 해당하는 것으로 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 목적이 있다. 이러한 기법들은 결국 개별 산사태의 시공간적 거동, 즉 산사태 발생에서 퇴적에 이르는 일련의 과정을 이해하는데 활용될 수 있다. 또한 본 연구

에서 활용된 기법 사이의 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. 5와 Fig. 6은 실제 발생 산사태 범위와 그 범위 내에 존재하는 두 기법에 의한 결과값의 분포를 보여주고 있다.

본 연구에서 살펴본 연구지역 내 실제 산사태 A, B 모두 이동지역이 차지하는 범위가 다른 두 개의 지역보다 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 이는 상대적으로 이동 거리가 큰 토석류 산사태의 특징과 일치하고 있다. 또한 불안정한 상태를 나타내는 낮은 SINMAP 값이 두 산사태 모두 시작 및 이동지역에 대부분 분포하고 있으며, 이와는 반대로 퇴적지역에는 주거지 형성으로 인해 안정과 불안정 값이 등분포 형태로 위치하고 있는 것을 알 수 있다.

특히 산사태 A의 SINMAP 분포를 나타내는 Fig. 5(a)의 경우, 이동지역의 하부에서는 일부 안정한 모습 즉 SINMAP 값이 높아지는 양상을 보이고 있는데, 이는 이 지역에 지형적 변화가 발생하였음을 의미한다. 즉 실제로 산사태 A의 하부 형상을 보면 과거 산사태로 인한 토사물질의 퇴적으로 사면의 경사가 완만하게 형성되어 있는 지역이 존재함을 알 수 있으며, 이러한 변화된 지형학적 요인이 SINMAP 결과를 안정한 분포로 구성될 수 있도록 작용한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 동일한 산사태 A, B 내부에 분포하고 있는 벡터 분산 값을 보여주고 있다. 벡터 분산을 통해 도출된 결과를 Fig. 5와 마찬가지로 3개의 구역으로 구분하여 그 분포를 도시한 결과, 이동지역에서의 결과값이 가장 많은 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 산정된 벡터 분산 값의 비균등 정보를 구역별로 비교하여 보면, 두 산사태 모두 이동지역에서 값이 상대적으로 크게 도시된 것을 알 수 있다.

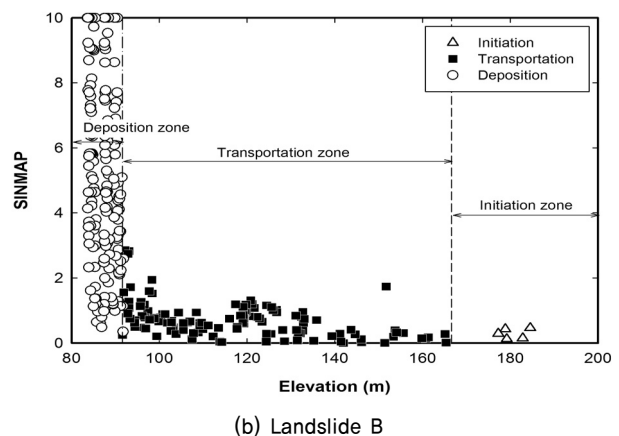
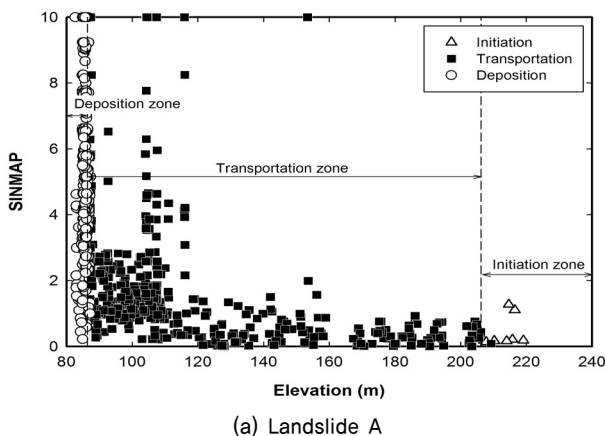
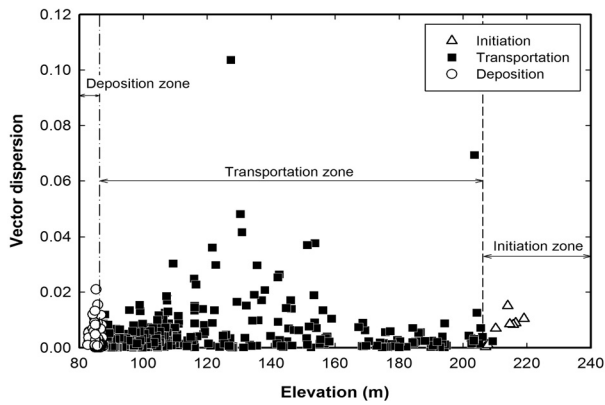
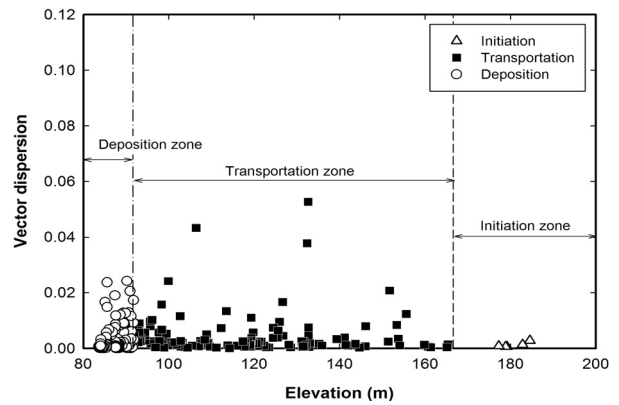


Fig. 5. Distribution of the SINMAP along the longitude of landslides



(a) Landslide A



(b) Landslide B

Fig. 6. Distribution of the vector dispersion along the longitude of landslides

이러한 지형의 비균등성은 강우 등으로 발생한 지표수가 이동지역 내에서의 지표 거칠기 증가로 하부로 유하하지 않고 적체, 사면안정을 저해하여(지표로의 침투 및 흙의 자중 증가), 결국 산사태 발생 위험(hazard)을 가중시키는 원인으로 작용할 수 있다. 뿐만 아니라 이동지역 내의 위험요소(element at risk)의 존재는 산사태로 인한 위험발생 확률(vulnerability)을 추가적으로 높이고, 이러한 두 가지 조건(hazard와 vulnerability의 증가)이 충족되었을 경우 산사태 위험도(risk) 또한 증가하게 된다.

한편 보다 현실적인 산사태 위험도 평가를 위한 두 기법 간의 상관관계 분석은 기법 간 분석결과와 해석에 있어서의 차이점을 보여주고 있다. SINMAP의 경우 산사태 시작 및 이동 지역에서 모두 위험한 것으로 나타난 반면, 벡터 분산의 결과는 이동지역의 특정 부분에 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, 벡터 분산의 경우 각 요소당 내재하고 있는 위험성을 거칠기의 정도로 나타내므로 특정지역 중심의 위험성을 대별한다고 할 수 있다. 따라서 SINMAP이 토석류와 같은 연속적 거동을 보이는 산사태의 전체적인 안정성 해석에는 다소 유리하다고 할 수 있으나, 산사태 발생 특정요소의 위험성을 구체적으로 설명할 수 있는 벡터 분산과 같은 기법을 추가로 고려하여, 보다 정확한 산사태 위험도 평가를 수행하여야 할 것이다.

## 5. 결 론

본 연구는 수문학과 토질역학의 이론적 기반에 근거한 SINMAP과 방향성 벡터를 산사태의 지형요소 분석에 이용,

이를 통한 산사태 발생 위험도를 평가하는 방안을 제시하고자 하였다. 분석결과 토석류와 같은 연속적 거동을 보이는 산사태의 경우 각 요소당 내재하고 있는 위험성을 거칠기의 정도로 보여주는 벡터 분산보다 포화된 지역을 따라 위험도의 확산 정도를 보여주는 SINMAP 기법이 다소 유리한 것으로 나타났다. 하지만 SINMAP 기법의 경우 경사도에 민감하기에 광역지역의 평가 시에는 정확한 위험도의 확산과정을 보여주는 데 한계가 있다.

그러므로 지형특성이 산사태 위험도에 미치는 영향을 정확하게 보여주기 위해서는 개별 모형보다는 다수의 모형을 이용, 각각의 장점을 활용하여 보다 현실적인 산사태 위험성 평가를 수행해야 할 것으로 판단된다.

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 대한 추가적인 연구가 필요함을 의미한다. 또한 벡터 분산과 같이 특정요소의 산사태 위험성 평가를 추가적으로 활용한다면 보다 정확한 산사태 위험도 평가가 이루어질 수 있을 것이라 사료된다.

## References

1. 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 (in Korean).
2. Hobson, R. D. (1972), Surface roughness in topography: quantitative approach, Spatial Analysis in Geomorphology, Methuen & Co Ltd., London, Great Britain, pp. 221~245.
3. Kim, T. H. (2012), Landslide hazard assessment, town of peace river, Alberta, Ph.D. dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, pp. 261~278.
4. Kim, T. H., Cruden, D. M. and Martin, C. D. (2012), Identification of geomorphological features of landslides using airborne laser

- altimetry, Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding Comprises the Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides and 2nd North American Symposium on Landslides, Banff, Alberta, Canada, pp. 567~573.
5. 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 (in Korean).
  6. 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 14, 154 p. (in Korean).
  7. 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 (in Korean).
  8. 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.
  9. Varnes, D. J. and International Association of Engineering Geology (IAEG) Commission on Landslides and Other Mass Movement on Slopes (1984), *Landslide hazard zonation: a review of principles and practices*. UNESCO, Paris, pp. 11~15.