

산사태 발생지 예측을 위한 Topographic Position Index의 적용성 연구

우충식 · 이창우 · 정용호

국립산림과학원 산림환경부 임지보전과

Study on Application of Topographic Position Index for Prediction of the Landslide Occurrence

Woo, Choong-Shik · Lee, Chang-Woo and Jeong, Yongho

Division of Forest Soil Conservation, Korea Forest Research Institute.

ABSTRACT

The objective of the study is to know the relation of landslide occurrence with using TPI (Topographic Position Index) in the Pyungchang County. Total 659 landslide scars were detected from aerial photographs. To analyze TPI, 100m SN (Small-Neighborhood) TPI map, 500m LN (Large-Neighborhood) TPI map, and slope map were generated from the DEM (Digital Elevation Model) data which are made from 1 : 5,000 digital topographic map. 10 classes clustered by regular condition after overlapping each TPI maps and slope map. Through this process, we could make landform classification map. Because it is only to classify landform, 7 classes were finally regrouped by the slope angle information of landslide occurrence detected from aerial photography analysis. The accuracy of reclassified map is about 46%.

Key Words : *Landslide, TPI, DEM, Landform classification, Aerial photographs.*

I. 서 론

지적 집중호우가 빈번하게 발생한다. 이러한 태풍이나 집중호우는 많은 강우량을 기록하며 홍수 및 산사태 등의 피해를 입힌다. 특히 산사태의 경

Corresponding author : Woo, Choong-Shik, Div. of Forest Soil Conservation, Dept. of Forest Environment, Korea Forest Research Institute 207 Cheongnyangni 2-Dong, Dongdaemoongu, Seoul 130-712, Republic of Korea,

Tel : +82-2-961-2634, E-mail : kingccagag@hanmail.net

Received : 31 August, 2007. Accepted : 3 April, 2008.

우는 예측하기가 어려워 인명피해를 발생시키는 주요 원인이 되고 있다. 우리나라는 지형의 기복이 심한 산지가 많고 최근 기상이변과 훼손지 증가로 인하여 매년 산사태 발생이 증가하고 있으며 산사태로 발생한 토석 및 유목은 계곡으로 유입되어 대규모 토석류로 발달하여 하류에 피해를 미친다(산림청, 2006; 이창우 등, 2004; 이창우, 2005). 특히 이러한 토석류는 주위의 가옥이나 농장, 축사 등을 덮쳐 인명 및 재산피해를 줄 수 있다. 2006년 평창, 인제에서 발생한 산사태 대부분이 이러한 토석류인 것을 감안한다면 정확한 산사태 발생지점과 토석류의 유동, 퇴적 장소를 예측하는 기술의 개발이 시급한 실정이다(산림청, 2006).

이러한 산사태를 예측하기 위해 다양한 기술이 도입되었는데 대표적인 것이 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)이다. GIS는 여러 가지 수치지도 및 공간데이터를 이용하여 원하는 정보를 분석해 낼 수 있는 방법으로 매우 다양한 분야에서 이용되고 있다. 특히 최근 산림청에서는 산사태위험지 판정표와 GIS 기법을 이용하여 산사태위험지도를 제작하였다(이천용 등, 2002). 또한 한국지질자원연구원에서도 현장데이터와 결합하여 산사태 예측도를 제작하였다(체병곤 등, 2004). 그러나 현재 산사태 예측을 위해 사용되는 지형관련 정보는 경사도, 사면방위, 사면형 등 기본적인 지형정보에만 의존하고 있어 산사태 발생지형에 대한 면밀한 검토에는 한계가 있다. 이러한 지형정보를 보완하기 위한 방법으로 지형의 위치를 지수화하여 분류를 가능하게 해주는 Topographic Position Index가 개발되었다. TPI는 지형의 凹, 凸을 정량화하여 지형을 분류하는 방법으로 2001년 Weiss에 의해 개발되었다(Weiss, 2001; Dickson and Beier, 2007; Jenness, 2003). 이 기법은 산지의 지형분류를 정량적으로 할 수 있는 장점을 가져 다양한 분야에서 연구되고 있다(박경훈 등, 2007; 장광민 등, 2007).

본 연구에서는 산사태 발생지점의 정확한 예측을 위해 2006년 산사태 발생지(평창)를 대상으로 TPI와 산사태 발생 지점과의 관계를 검토하였다.

II. 연구방법

2006년 산사태 발생지역의 수치지형도를 이용하여 TPI 분석을 실시한 뒤 산지지형을 분류하여 실제 산사태가 발생한 지점과 TPI로 분류된 지점의 연관성을 분석하였다. 분석 일련의 과정은 그림 1과 같다.

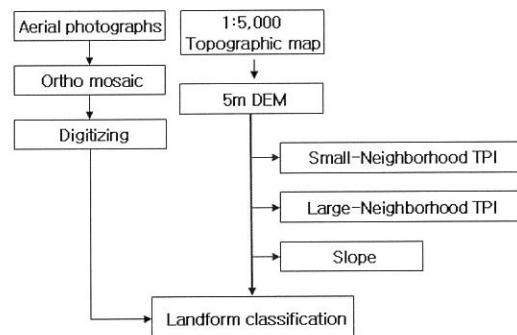


Figure 1. Procedure for analyzing landslide occurrence.

실제 산사태가 발생한 지점은 항공사진을 활용하여 분석하였고 각 TPI 값과 경사도는 1 : 5,000 수치지형도를 이용하여 구하였다. 각각의 TPI 지도와 경사도는 일정 기준에 의해 하나로 중첩하여 지형을 분류할 수 있는 지도로 제작하였다. 그 후 제작된 지도와 항공사진에서 획득한 산사태 발생지와의 연관성 분석을 실시하였다.

1. 항공사진 촬영 및 분석

산사태 발생지역의 분포를 알기 위한 방법은 현장에서 직접 조사하는 방법과 항공사진이나 위성영상 등의 영상을 이용하여 발생위치를 추출 방법 등으로 구분될 수 있다. 현장조사의 경우 인력이 많이 소요되고 접근이 제한된 지역은 조사에 어려움이 많다. 또한 산사태 발생지는 비교적 소면적이기 때문에 공간해상도가 낮은 위성영상

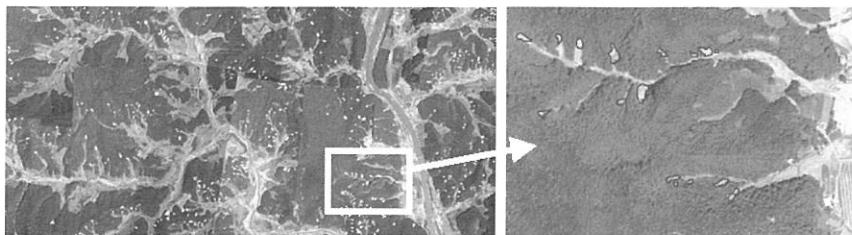


Figure 2. Digitizing the landslide occurrence on aerial photographs.

은 사용하기 어렵다. 반면, 항공사진은 위성영상에 비해 낮게 촬영되기 때문에 공간해상도가 뛰어나고, 단시간에 대면적 산사태 발생지를 파악할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 산사태 발생지역을 항공촬영하여 그 영상을 분석에 이용하였다.

항공사진은 2006년 8월 초 집중호우로 인해 대규모 피해를 입은 평창지역내 전부면을 중심으로 촬영하였다. 항공사진으로부터 산사태 발생지역의 분포를 추출하기 위해 항공사진의 기하학적 왜곡을 보정한 뒤 여러 장의 사진을 한 장으로 만드는 정사모자이크 작업을 수행했으며, 기본적으로 1 : 5,000 수치지형도에 획득한 지상기준점과 5m 크기의 DEM으로 처리를 하였다. 이렇게 처리된 정사모자이크영상을 이용하여 산사태가 발생한 지점을 도화하였다(그림 2).

2. TPI (Topographic Position Index)

TPI는 2001년 Weiss에 의해 개발된 방법으로 지형의 볼록함과 오목함을 정량적으로 나타낸 방법이다. 즉, 능선과 같이 볼록한 지형은 볼록한 정도에 따라 양의 값이 증가되고 계곡과 같이 오목한 지형은 오목할수록 음의 값이 증가한다. 지형이 편평한 평지에 가까울수록 '0'에 가깝게 된다. 이러한 기본적인 원리를 바탕으로 TPI 값을 계산하기 위해 그림 3과 같은 고리형 moving window 방식의 필터링을 거치게 된다.

이 필터링방법은 가운데 고도값에서 작은 원과 큰 원내에 포함되는 고도값 중 평균 고도값을 빼는 방식으로 가운데 값이 주위보다 높은 지역일

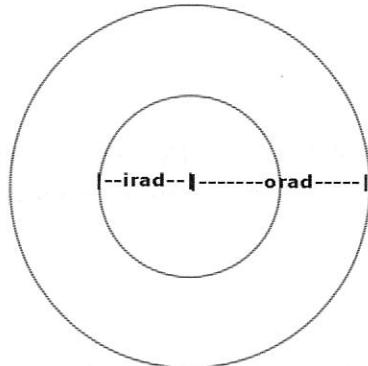


Figure 3. Annulus moving window for calculating TPI.
 $TPI = \text{int}((\text{center elevation} - \text{focalmean(elevation, annulus, irad, orad)}) + 0.5)$
 Negative TPI=depression, Positive TPI=crest,
 Zero TPI=constant slope or flat.

수록 양의 값이 증가하게 되고 주위의 값보다 낮게 되면 음의 값이 증가하게 된다. 필터링방법을 통해 계산되는 TPI값은 orad를 어떻게 정하는가에 따라 지형의 형태를 반영할 수 있는 범위가 달라지는데 여기서 orad와 픽셀의 크기를 곱한 값을 scale factor라고 한다. TPI를 이용하여 지형을 분류하기 위해서는 scale factor가 낮을 때의 TPI 값과 scale factor가 높은 경우의 TPI 값을 이용하여야 한다. 이것은 지형이 가지고 있는 여러 형태를 최대한 반영하기 위한 방법으로 그림 4에 나타내었다.

이렇게 두 가지의 다른 scale factor를 통해 산출된 TPI와 경사도를 이용하여 일정 기준에 의해 10개의 클래스로 지형을 분류할 수 있다. 그러나 두 개의 다른 TPI는 정규화가 되어 있지 않아 10개의 클래스로 지형을 구분하기 위한 기준설정이

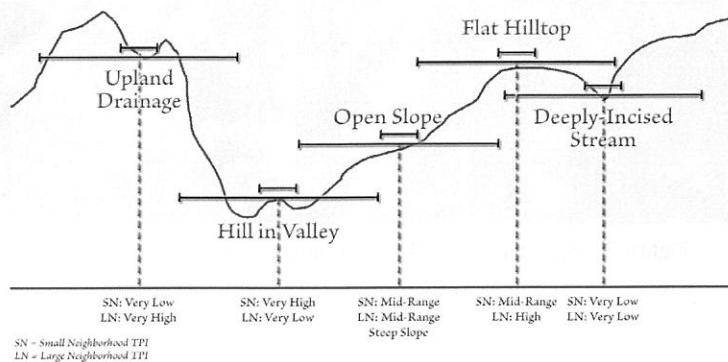


Figure 4. Determined classifying the landscape using two TPI at different scale(Weiss, 2001).

어렵다. 따라서 scale factor가 다른 두 TPI를 정규화 시키기 위해 평균과의 편차를 표준편차로 나누어 주었다

$$\text{normalize_TPI} = \text{int}((\text{elevation}-\text{mean})/\text{std dev}) \times 100$$

지형분류는 SN(Small-Neighborhood) TPI, LN(Large-Neighborhood) TPI, Slope을 기준에 따라 분류하는 과정이며 표 1에서와 같은 조건으로 분류한다.

지형분류는 깊은 계곡에서 평지, 능선, 산정까지 10단계로 나누어 분류하며 표 1에 나타난 TPI 기준은 식에서 계산된 정규화된 TPI 값이다. 분류기준을 살펴보면 SN에서 표준편차와 양의 방

향 또는 음의 방향으로 차이가 큰 부분을 각각 능선과 계곡으로 분류하고 표준편차와의 차이가 적은 부분을 평지로 정의하였다. 이 후 능선, 평지, 계곡을 더욱 세밀하게 분류하기 위해 LN의 TPI 분포에 따라 3단계씩으로 분류하였다. 평지의 경우는 같은 TPI를 가져도 경사도에 따라 다시 2단계로 세분화하여 총 4단계로 분류하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 산사태 발생지 추출

정사모자이크 영상을 이용하여 산사태 발생지 를 추출하였는데 약 3,000ha에서 659개소 약 9ha

Table 1. Basis indices for geographic form classification.

Classification		SN(normalize_TPI)	LN(normalize_TPI)	Slope($^{\circ}$)
Class	Zone			
1	Canyons, Deeply Incised Streams	$-100 \geq \text{TPI}$	$-100 \geq \text{TPI}$	
2	Midslope Drainages, Shallow Valleys	$-100 \geq \text{TPI}$	$-100 < \text{TPI} < 100$	
3	Upland Drainages, Headwaters	$-100 \geq \text{TPI}$	$100 \leq \text{TPI}$	
4	U-shaped Valleys	$-100 < \text{TPI} < 100$	$-100 \geq \text{TPI}$	
5	Plains	$-100 < \text{TPI} < 100$	$-100 < \text{TPI} < 100$	≤ 5
6	Open Slope	$-100 < \text{TPI} < 100$	$-100 < \text{TPI} < 100$	≥ 5
7	Upper Slope, Mesas	$-100 < \text{TPI} < 100$	$100 \leq \text{TPI}$	
8	Local Ridges/Hills in Valleys	$100 \leq \text{TPI}$	$-100 \geq \text{TPI}$	
9	Midslope Ridges, Small Hills in Plains	$100 \leq \text{TPI}$	$-100 < \text{TPI} < 100$	
10	Mountain Tops, High Ridges	$100 \leq \text{TPI}$	$100 \leq \text{TPI}$	

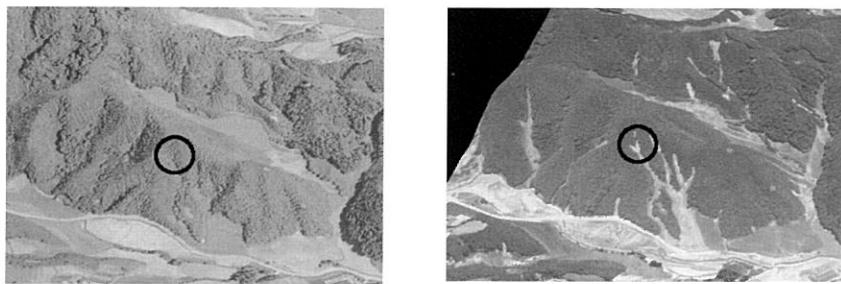


Figure 5. Before and after aerial photographs of the landslide occurrence.

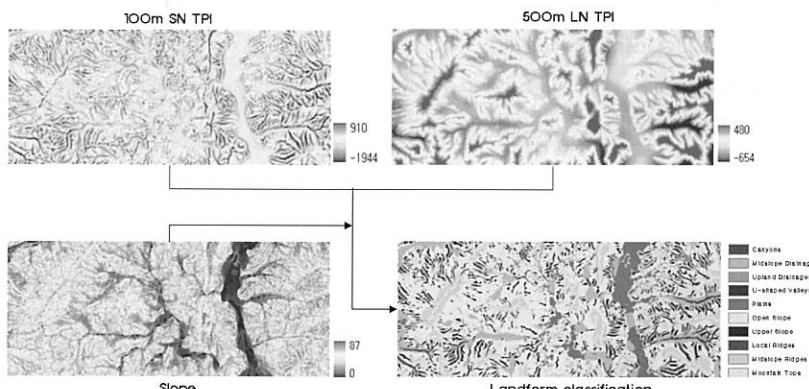


Figure 6. Processing for making landform classification map.

의 산사태 발생지를 추출하였다. 산사태 발생지를 좀 더 정확하게 추출하기 위해 산사태가 발생하기 전의 항공사진과 비교하여 추출하였다(그림 5).

2. TPI를 이용한 지형분류 및 산사태 발생지 분석

TPI를 산출하기 위해서 SN TPI와 LN TPI의 scale factor를 결정해야한다. scale factor는 지역에 따라 지형이 다르기 때문에 일률적으로 적용하기가 어렵다. 따라서 보다 합리적인 결정방법이 제시되어야 한다. 본 연구에서는 scale factor의 결정 시 1 : 5,000 수치지형도를 이용하였다. 이것은 연구지역 내의 포함되는 능선과 능선 사이의 거리가 가장 짧은 거리와 가장 긴 거리를 측정하여 가장 짧은 거리는 SN TPI로, 가장 긴 거리는 LN TPI의 scale factor로 결정하는 방법으로 그림 4에 나타난 TPI의 기본 원리에 가장 부합되는 방법이라고 판단되어 제시하였으며 다른

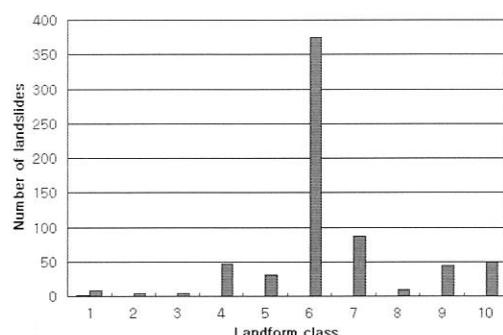
지역에 적용하기가 간편한 장점이 있다. 이러한 방법을 통해 SN TPI의 scale factor는 100m, LN TPI의 scale factor는 500m로 결정하였다.

1 : 5,000 수치지형도에서 등고선 간격을 고려하여 5m 크기의 DEM을 제작하였다. 그림 3에 제시된 방법을 이용하여 100m SN TPI와 500m LN TPI를 각각 계산하였으며 정규화시키기 위해 식 1을 이용하여 정규화된 TPI를 획득하였다. 정규화된 SN, LN TPI와 GIS 공간분석 기법으로 제작한 경사도를 함께 그림 1에 제시된 기준을 통하여 지형분류를 실시하였다(그림 6).

지형분류결과 보통 평지보다 경사가 조금 있는 경사지(Open slope)가 52.5%로 가장 많이 분포하고 있으며 그 뒤로 얇은 계곡지(Midslope Drainages)가 8.6%, 작은 언덕(Midslope Ridges)이 8.5% 등으로 평창지역의 산악지형을 잘 나타내고 있다(표 2).

Table 2. Characteristics of geographic form classification map.

Class	Classification	Area(ha)	Rate(%)
	Zone		
1	Canyons, Deeply Incised Streams	98.1	2.6
2	Midslope Drainages, Shallow Valleys	321.7	8.6
3	Upland Drainages, Headwaters	2.1	0.1
4	U-shaped Valleys	228.5	6.1
5	Plains	262.3	7.0
6	Open Slope	1,972.2	52.5
7	Upper Slope, Mesas	309.6	8.2
8	Local Ridges/Hills in Valleys	7.3	0.2
9	Midslope Ridges, Small Hills in Plains	319.0	8.5
10	Mountain Tops, High Ridges	237.2	6.3



(1 : Canyons, 2 : Midslope Drainages, 3 : Upland Drainages, 4 : U-shaped Valleys, 5 : Plains, 6 : Open Slope, 7 : Upper Slope, 8 : Local Ridges, 9 : Midslope Ridges, 10 : Mountain Tops)

Figure 7. Result of overlaying landform classification map with landslide area.

지형분류지도와 산사태 발생지 659개소를 중첩하여 산사태 발생지 내에 포함된 지형 클래스의 분포를 분석하였다(그림 7).

분석결과 산사태 발생은 경사지(Open slope)에서 59%가 발생하였고 급경사지(Upper slope)에서는 13%, 능선부(Midslope ridge+High ridge)에서는 15%로 나타났다. 즉, 경사지와 급경사지를 합쳐 볼 때 산사태가 이 지역에서 대부분 발생하였다고 말할 수 있으며 능선부에서도 비교적 많이 발생하였다.

연구지역 내 산사태 발생지의 평균 경사는 약 28° 이며 범위는 최소 22° 에서 최대 35° 까지 분포하고 있다(산림청, 2006). 지형분류지도에서 산사태 발생이 가장 많은 경사지의 평균 경사는 29.7° 이고 급경사지는 27.1° , 능선부는 $26.8\sim31.9^{\circ}$ 의 분포를 보인다. 산사태 발생지가 가장 많은 경사지의 평균 경사가 실제 발생확률이 높은 경사와 비슷한 값을 나타내고 있으며 급경사지와 능선부 또한 산사태 발생확률이 높은 경사 범위에 포함되고 있다.

3. 산사태 예측지도 작성

표 1은 미국에 적합한 지형분류 기준이기 때문에 우리나라에 적합한 기준이 필요하다. 이러한 지형 10개 클래스를 표 2, 3의 비율에 따라 크게 계곡, 경사지, 능선의 3개 부분으로 구분할 수 있으며 각 지형에서 산사태 발생이 높은 지역을 세부 구분하여 일반 지형 3개 클래스에 산사태 발생 가능지역 3개 지역을 추가하여 6개 클래스로 구분하였다. 그러나 계곡은 깊이에 따라 구분이 필요해 계곡 지형은 두 부분으로 구분하여 표 4 와 같이 계곡부(1, 2)와 경사지(4), 능선(6) 그리고 각 지형별 산사태 발생위험지(3, 5, 7)로 총 7 개의 클래스로 분류하였다.

Table 3. Compared an average slope angle of landform classification map with landslides.

Classification		Landform classification map(°)	Number of landslides	Landslides (°)
Class	Zone			
1	Canyons, Deeply Incised Streams	24.9	10	27.1
2	Midslope Drainages, Shallow Valleys	17.2	7	34.6
3	Upland Drainages, Headwaters	30.8	-	-
4	U-shaped Valleys	22.9	60	26.8
5	Plains	1.7	6	2.6
6	Open Slope	24.3	394	29.7
7	Upper Slope, Mesas	25.8	83	27.1
8	Local Ridges/Hills in Valleys	32.6	-	-
9	Midslope Ridges, Small Hills in Plains	30.0	45	31.9
10	Mountain Tops, High Ridges	27.7	54	26.8

표 4의 기준에 따라 지형분류를 수행하여 그림 8과 같은 산사태 예측지도를 제작하였다. 산사태 예측지도의 각 클래스별 분포를 분석해 보면 경사지가 전체면적의 68%를 차지하고 있으며 이 중 산사태 발생 가능한 지역이 27%를 차지하고 있다. 전체 면적에서 산사태 발생이 가능한 지형의 분포는 경사지가 27%로 가장 높게 나타났으며 그 뒤로 능선부가 7%, 계곡이 2%로 나타나 총 산사태 발생 가능한 면적은 전체면적의 36%를 차지하고 있다. 산사태 예측지도의 정확도를 검증하기위해 추출된 산사태 659개소와 비교분

석하여 표 5와 같은 결과를 획득하였다.

산사태 발생은 총 659개소의 산사태 발생지에서 302개소가 산사태 발생이 가능한 3, 5, 7 클래스에 약 46%가 포함되었으며 산사태 총 발생면적 9.65ha 중 3, 5, 7 클래스가 차지하고 있는 면적비율은 44%로 나타났다. 일반적으로 산사태는 다양한 요소들이 서로 복합되어 발생되는 특성을 보이므로 산사태 예측을 위해서는 다양한 데이터를 축적, 분석해야 한다. 즉 산사태는 경사도, 임상, 지질, 강우량, 토심, 사면길이 등 다양한 인자에 의해 발생되어 산사태를 예측하는데 이때 수

Table 4. Basis indices for prediction of landslide.

Classification		SN(normalize_TPI)	LN(normalize_TPI)	Slope(°)
Class	Zone			
1	Valleys	$-100 \geq TPI$		
2	U-shaped Valleys	$-100 < TPI < 100$	$-100 \geq TPI$	$22 \geq \text{Slope} \text{ or } 35 \leq \text{Slope}$
3	Landslide in Valleys	$-100 < TPI < 100$	$-100 \geq TPI$	$22 < \text{Slope} < 35$
4	Slope	$-100 < TPI < 100$	$-100 < TPI$	$22 \geq \text{Slope} \text{ or } 35 \leq \text{Slope}$
5	Landslide in Slope	$-100 < TPI < 100$	$-100 < TPI$	$22 < \text{Slope} < 35$
6	Ridges	$100 \leq TPI$		$22 \geq \text{Slope} \text{ or } 35 \leq \text{Slope}$
7	Landslide in Ridges	$100 \leq TPI$		$22 < \text{Slope} < 35$

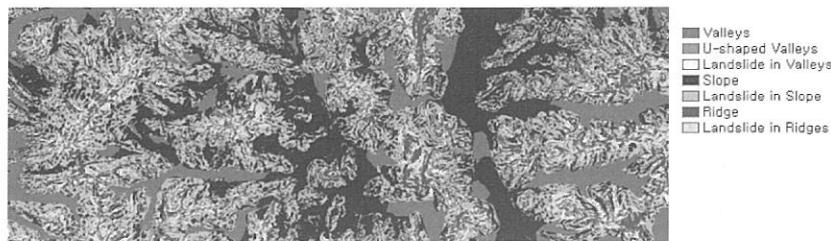


Figure 8. Landslide prediction map.

치지형도와 임상도, 지질도, 강우자료, 산림입지도, 그밖에 현지조사자료 등 여러 가지 자료를 효과적으로 분석해야 하다. 그러나 본 연구에서 제작한 산사태 예측지도는 1 : 5,000 수치지형도만을 이용하여 TPI 분석을 통해 제작할 수 있었다. 산사태 예측지도가 갖는 정확도는 높은 수준은 아니지만 산사태 발생률이 높은 경사도와 지형의 특성이 동시에 반영되어 있어 산사태 발생을 예측하는데 사용될 수 있는 중요한 인자로써의 새롭게 의미가 부여될 수 있다. 즉, 산사태 발생 예측에서 경사도나 임상, 강우량, 지질 등 1차적인 기본 자료뿐 아니라 TPI와 같은 공간분석에 의한 새로운 자료를 생산하여 적용시킨다면 산사태 예측이 크게 발전될 수 있을 것이라 생각한다.

IV. 결 론

산사태 발생을 예측하기 위해 산사태가 발생한 직후 촬영한 항공사진과 연구지역의 1 : 5,000 수치지형도를 이용하였다. 항공사진을 정사보정

및 모자이크 영상으로 처리하여 659개소의 산사태 발생지를 추출하였다. 또한 1 : 5,000 수치지형도를 이용하여 SN TPI와 LN TPI 및 경사도를 각각 산출하였다. SN TPI와 LN TPI, 그리고 경사도를 이용하여 일반적인 지형분류를 실시하여 연구지역의 지형분류지도를 제작하였고 항공사진에서 추출한 산사태 발생지의 경사법위를 참조하여 산사태 발생지 예측에 필요한 새로운 TPI 분류기준을 제시하였다. 이 기준을 이용하여 최종 산사태 예측지도를 제작하였다.

본 연구에서는 TPI가 산사태 발생지 예측에 어떠한 가능성을 가지고 있는지 검증을 실시해보았으며 산사태 발생 예측에 필요한 새로운 인자로써의 활용가치를 알 수 있었다. TPI에 관한 연구가 아직은 초기단계이고 국내에서는 많은 연구가 이루어지지 않아 아직은 활용성이 미진하지만 앞으로 많은 연구를 바탕으로 TPI가 산사태 발생 예측뿐 아니라 여러 분야에서 다양한 방법으로 의미있게 활용되기를 바란다.

Table 5. Areal distribution of landslides in landslide prediction map.

Classification		Area(ha)	Number of landslides	Area of landslides (ha)
Class	Zone			
1	Valleys	421.87	17	0.34
2	U-shaped Valleys	140.36	34	0.50
3	Landslide in Valleys	88.10	24	0.42
4	Slope	1,539.82	246	3.50
5	Landslide in Slope	1,004.29	240	3.20
6	Ridges	282.77	60	1.00
7	Landslide in Ridges	280.84	38	0.69

인용문헌

- 박경훈 · 김경태 · 곽행구 · 이우성. 2007. Topographic Position Index를 활용한 산지습지 분포예측. *한국지리정보학회지* 10(1) : 194-204.
- 산림청. 2006. 2006년 산지토사재해 특성파악 및 영향인자 분석. pp.145.
- 이창우 · 이천용 · 김재현 · 윤호중 · 최경. 2004. 고성 산불피해임지의 토사유출 특성. *한국 임학회지* 93(3) : 198-204.
- 이창우. 2005. 자연재해와 산지토사재해에 의한 희생자 수의 변화경향. *한국임학회지* 94(4) : 252-257.
- 이천용 · 최경 · 이종학 · 이창우. 2002. GIS를 이용한 산사태 위험지도 작성기법 개발. *산림 과학논문집* 65 : 1-10.
- 장광민 · 정주상 · 박경 · 송정은. 2007. 지형특성을 고려한 Scale factor 결정 및 Topographic Position Index를 이용한 산지지형구분. *한국지리정보학회 춘계학술발표* 347-351.
- 채병곤 · 김원영 · 조용찬 · 김경수 · 이춘오 · 최영섭. 2004. 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모형 개발. *대한지질공학회지* 14(2) : 211-222.
- Dickson, B., and Beier, P. 2007. Quantifying the influence of Topographic Position on Cougar Movement in Southern California. *Journal of Zoology*, 271(3) : 278-287.
- Jenness, J. 2003. Grid Surface Areas : Surface Area and Ratios from Elevation Grids. http://www.jennessent.com/arcview/arcview_extensions.htm.
- Weiss, A. D. 2001. Topographic Positions and landforms analysis, Proceeding of 21st Annual ESRI User Conference(Map Gallery Poster), San Diego, CA.