

도시지역 토사재해 위험지역의 유형화: 서울시를 사례로

박창열* · 신상영**

Park, Changyeol*, Shin, Sang Young**

Categorize Debris Flow Hazard Zones in Urban Areas: The Case of Seoul

ABSTRACT

The purpose of this study is to classify debris flow hazard zones in urbanized areas using multivariate statistical analyses and to suggest customized management strategies to each areal type. Using field survey data set in Seoul, 49 sample debris hazard zones are selected. Clustering and discriminant analyses show that debris flow hazard zones are classified into two types. Surrounding land use and land slope are major factors influencing to the categorization. The results suggest that, by considering the characteristics of each areal type, more customized management strategies for debris flow hazard are necessary. Particularly, in addition to traditional structural measures, non-structural measures including land use and development control for downstream built-up areas should be emphasized in urbanized areas to mitigate human and property damages from debris flow hazard more fundamentally.

Key words : Urbanized area, Debris flow disaster, Hazard zone, Classification, Management strategies

초록

본 연구는 도시지역 토사재해 위험지역에 대한 특성을 살펴보고, 다변량 통계분석을 이용하여 위험지역들을 유형화하여 관리전략상의 시사점을 도출한다. 사례분석은 서울시 산재된 토사재해 위험지역 49개소 현장조사 표본자료를 대상으로 하며, 조사항목의 특성정보를 이용하여 분석을 수행하였다. 분석 결과, 도시지역 토사재해 위험지역에는 계류부 하단 주변에 공원, 택지, 도로 등이 주로 위치하고 있으며, 다수의 주택가가 위험 지역과 인접해 있음을 알 수 있었다. 또한 군집분석과 판별분석을 통해 토사재해 위험지역은 크게 2가지 유형으로 구분되며, 위험지역에 대해 중점적으로 고려해야 할 요소는 주변 토지이용과 비탈면 경사임을 확인하였다. 이들 인자를 근거로 각 유형별 특성을 고려한 도시지역 토사재해 관리전략상의 시사점을 도출하였다. 본 연구에서 제시한 분석방법과 관리전략상의 시사점은 기존의 산지 중심의 위험지역 관리대책에 더하여 피해 영향권에 해당하는 시가지에 대한 관리대책을 고려함으로써 토사재해에 보다 효과적으로 대응할 수 있는 기초가 될 수 있을 것으로 기대된다.

검색어 : 도시지역, 토사재해, 위험지역, 유형화, 관리전략

1. 서론

전 세계적으로 기상이변 등에 의해 집중호우, 가뭄, 대설 등의 자연재해가 빈번하게 발생하고 있다. 우리나라는 전 국토의 70% 이상이 산지로 이루어져 있으며, 여름철 6~9월 사이의 집중호우 및 태풍으로 인한 산사태, 토석류, 급경사지 붕괴 등과 같은 사면재해가 빈번히 발생하고 있다. 특히, 2011년 우면산 산사태를 계기로 고밀화된 도시지역에서의 사면재해가 중요한 정책적 과제로 대두되고 있다. 이는 기후변화에 의한 집중호우의 영향뿐만 아니라 급격한 도시화 과정에서 부족한 택지를 확보하기 위하여 재해위험이 높은 시가지 경계부의 구릉지 및 비탈면을 과도하게 개발하여 시가지 영역을 확대해왔기 때문이다.

* 정회원 · 교신저자 · 제주발전연구원 환경도시연구부 책임연구원 (Corresponding Author · Jeju Development Institute · cypark@jdi.re.kr)

** 정회원 · 서울연구원 안전환경연구실 연구위원 (Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute · syshin@si.re.kr)

Received February 23, 2016/ revised April 19, 2016/ accepted August 24, 2016

사면재해는 산사태, 토석류 등에 의해 발생하는데, 대부분의 피해는 토석류(debris flow)의 형태를 띠고 있다(Kim and Kim, 2013). 도시지역에서 토석류는 산지 상류부에서 소규모 산사태에 의해 평면 슬라이드(translational slide) 형태를 나타내며, 발생 후에는 하류부로 빠른 속도로 이동·확산하면서 다량의 수분과 주변 암석파편, 토층의 식박물질 등이 혼합된 토석류로 전환되어 하류부에 큰 영향을 미치게 된다(Dikau et al., 1996). 이러한 재해를 예방하기 위한 대책의 기본은 사방댐, 골막이, 비탈면보강공법 등 방재시설을 중심으로 한 구조적 대책이라 할 수 있다. 그런데 방재시설은 대상지역과 시설의 중요도나 안전도를 고려하여 정해진 설계기준과 시설용량의 한계 때문에 설계기준을 초과하는 집중호우에 대한 방어능력이 제한적인 수밖에 없다(Kim et al., 2013). 특히, 기후변화와 도시화에 따라 집중호우의 발생빈도가 증가하는 오늘날의 상황에서는 더욱 그러하다(IPCC, 2007). 따라서 산지부 방재시설뿐만 아니라 잠재적인 피해영향권에 놓여 있는 비탈면 하단부 시가지에서의 방재대책을 병행한 보다 종합적인 대책이 필요하다.

사면재해(산사태, 토석류 등)와 관련된 주요 연구를 살펴보면, 사면재해의 발생원인에 관한 연구(Kim et al., 1998; Kim et al., 2006; Ko et al., 2013; Kim et al., 2013; Cha and Kim, 2014; Kang et al., 2015; Shimizu et al., 1992), 토석류의 영향인자에 관한 연구(Shimizu 1977; 1978; Lorente et al., 2002; Horton et al., 2008), 산사태 발생지역 예측 및 위험도 평가 연구(KIGAM, 2004; Oh et al., 2006; Ma et al., 2008; Park et al., 2008; NEMA, 2008; Lee et al., 2012; Lee et al., 2012; Cha, 2014; Morrissey et al., 2001), 토석류 위험지역 설정에 관한 연구(Yoshikawa et al., 2002; Kawakami et al., 2007; Watanabe et al., 2011), 모형실험 및 수치모의를 통한 토석류 거동 특성에 관한 연구(Kim and Seo, 1997; Kim et al., 2008; Kim and Paik, 2011; Kim et al., 2013; Denlinger and Iverson, 2001), 사면재해 예경보 및 관리방안에 관한 연구(GRI, 2011; Kim et al., 2013) 등으로 구분할 수 있다. 이상과 같은 연구사례들을 살펴보면, 사면재해의 직접적인 원인은 주로 호우에 기인하며, 피해의 대부분은 도로, 건축물, 기반시설 등을 포함한 시가지에서 발생함을 알 수 있다. 그러나 이러한 피해특성에도 불구하고, 관련 연구에서는 우리나라 전역을 대상으로 하여 도시지역 사면재해 특성을 충분히 고려하지 못하거나, 비탈면의 특성만 고려함으로써 주변 또는 하단부의 도로, 주택 등 시가지 토지이용을 고려하지 않고 있다. 근본적인 이유는 지금까지 사방시설 중심의 구조적 대책에 집중해 왔기 때문이며, 피해조사자료의 제한적인 여건 때문이기도 하다. 이로 인해 도시지역 산사태 위험지역에 대한 종합적인 관리대책에 시사점을 제공해줄 수 있는 실증적인 연구는 찾아보기 어렵다.

특히, 2011년 서울시의 우면산 산사태를 비롯한 도시지역의 크고 작은 사면재해 사례는 단 한 번의 발생으로도 대규모 인적·물적 피해로 이어질 수 있음을 보여주었다. 따라서 도시지역에서 토석류 피해저감 및 예방을 위해서는 사방시설과 같은 구조물 대책에 더하여 잠재적인 위험지역 및 피해영향권에 대한 관리, 토지이용 및 건축규제 등과 같은 시가지 대책을 포함한 종합적인 대책이 요구된다.

도시지역에서 토석류 피해규모는 큰 부피와 하중을 갖는 토사물 질이 하류부에 영향을 미치기 때문에 산사태 피해에 비해 더욱 크게 나타난다. 이에 본 연구에서는 토석류에 의한 피해를 토사재해의 대표적 유형으로 간주하고, 서울시의 토석류 위험지역을 사례로 도시지역 토사재해 특성을 분석하고, 다변량 통계분석을 이용하여 이들 지역을 유형화함으로써 각 유형별 토사재해 저감을 위한 전략상의 시사점을 도출하고자 한다.

2. 사례분석 지역의 기본적인 특성

2.1 분석자료 및 사례분석 대상지역

본 연구에서는 서울시에 산재된 토사재해 위험지역들을 사례로 그 특성을 분석하고 통계적으로 유형화하고자 한다. 서울시는 2011년 우면산 산사태 이후, 「사면전수조사 및 산사태 피해저감 시스템 구축 용역」(2012~2015년)을 시행하였으며(SMG, 2012; 2013; 2014), 전수조사는 서울시 전역에 분포된 자연사면, 인공사면 등에 대해 사면재해 위험이 있는 모든 비탈면을 대상으로 한다. 본 연구에서는 시가지 영향권에 대한 영향이 클 것으로 예상되는 지역들을 선별하여 분석하였는데, 전수조사 결과 위험도(A~E등급)가 C·D·E등급으로 분류되어 위험도가 일정 수준 이상이고, 피해원인(산사태, 토석류)이 토석류이며, 시가지에 대한 피해영향이 있을 것으로 예상되는 49개소를 사례분석대상으로 선정하였다. 특성인자는 현장조사에서 수집한 항목들을 이용하였으며, 대상지역의

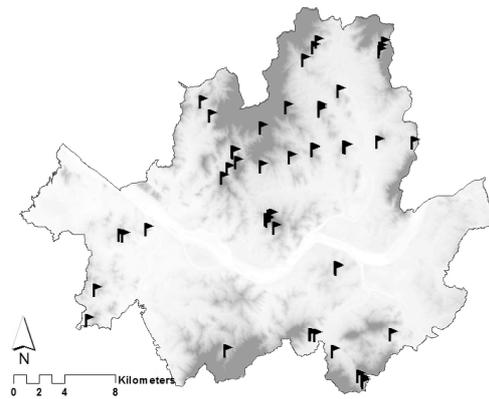


Fig. 1. 49 Sample Debris Flow Fazard Zones Selected for the Analysis

Table 1. Characteristics of Variables for Debris Flow Hazard Zones

Type	Investigating items	Mean or Mode (ratio, %)	Range
Surrounding characteristics	Surrounding topography	Gentle hills (42.9)	Flatland, Gentle hills, Hills, Gentle mountains, Mountains
	Surrounding land use	Housing site (40.8)	Forest land, Park, Housing site, Road, Railroad, etc.
Geological and geotechnical characteristics	Bed rock	Gneiss (59.2)	Granite, Gneiss
	Soil depth (cm)	46.9	10~100 cm
Upper slope	Longitudinal-section shape	Complex (51.1)	Concavity, Straight, Complex, Convexity
	Cross-section shape	Graded slope (40.8)	Convex slope, Graded slope, Concave slope, Complex slope
	Upper slope gradient	23.7	5~52°C
	Slope length (m)	145.1	10~535 m
	Height (m)	40.6	7~146 m
	Collapse record	Not-occurred (63.3)	Not-occurred, Occurred
Vegetation	Forest type	Mixed standforest (65.3)	Broad-leaved forest, Coniferous forest, Mixed standforest, Unstocked forest
	Diameter at breast height	Medium hard wood (87.8)	Small wood, Medium hard wood, Large wood, Sapling forest
	Vegetation density	Medium (67.3)	Low, Medium, High
Stream slope	Stream length	271.5	38~1095 m
	Stream slope gradient	15.3	4~36°C
	Stream width (m)	3.2	1~10 m
	Boulder stone distribution rate	5.4	0~40%
Downstream area	Object to protect	Public facilities or 10 houses < (79.6)	Mountain district, Property damage, 1-5 houses, 5-10 houses, Public facilities or 10 houses <
	Distance from the houses, public facilities and so on. (m)	27.9	1~150 m

위치와 조사항목별 기본적인 통계적 특성은 Fig. 1과 Table 1과 같다.

2.2 사례분석 대상지역의 기본적인 특성

본 연구에서 수집한 토사재해 위험지역 49개소의 특성인자는 크게 주변여건, 지반 및 지질, 사면형태, 상부사면, 식생, 계류사면, 하류부 특성으로 구분된다. 주변여건은 주변 지형, 주변 토지이용으로 구분되며, 지반 및 지질 특성은 구성암종, 토심, 사면형태는 종단형상, 횡단형상, 상부사면 특성은 경사도, 경사길이, 높이, 붕괴 이력, 식생은 임상, 흉고직경, 식생밀도, 계류사면 특성은 계류연장, 계류경사, 계류폭, 전석분포율, 하류시설 특성은 보호대상, 인가 및 공공시설 등과의 거리를 이용하였다. Table 1에 제시된 각 측정인자들에 대한 기본 통계량 중에서 주변 지형, 주변 토지이용, 구성암종, 종단 및 횡단형상 등은 명목척도에 해당하기 때문에 최빈값으로 나타내고, 그 외의 인자들은 평균값으로 나타내었다. 본 연구에서 수집한 자료를 대상으로 특성과 분포를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 대상지의 기본적인 주변여건을 살펴보면, 주변 지형은

원구릉, 구릉, 준산악, 산악, 평지 순으로 많이 나타나고 있으며, 주변 토지이용은 택지, 공원, 도로, 임야 등의 순으로 높은 빈도를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과는 도시지역의 특성상 시민의 편의 및 여가생활 등을 위해 산악지역을 공원화하는 경우가 많고, 도시공간의 확대를 위해 산악지역을 많이 절토하였음을 말해준다.

둘째, 대상지의 지반 및 지질 특성은 화강암이 41%, 편마암이 59%를 차지하고 있으며, 토심의 경우 10~100 cm 범위로 조사되었다. 10 cm 간격으로 살펴보면, 40~50 cm의 경우가 가장 큰 비중(약 50%)을 차지하는 것으로 나타났다. 일반적으로 유효토심이 얕을수록 사면포화현상이 빠르게 진행되어 비탈면붕괴에 취약한 것으로 알려져 있고, 유효토심 20~50 cm 범위에서 사면붕괴 위험이 가장 큰 것으로 조사된 바 있다(Ko et al., 2013). 본 연구의 대상지도 이들 특성과 유사한 범위를 나타내고 있는데, 이는 도시지역 토사재해 위험지역이라 할지라도 상부사면 자체의 위험특성은 자연유역과 유사함을 보여준다.

셋째, 대상지의 종단형상은 복합형, 요형, 직선형, 철형 순으로 나타나며, 횡단형상은 평행사면, 복합사면, 상승사면, 하강사면 순으로 나타난다. 이들 사면형상은 사면붕괴의 주요 요소이며,

일반적으로 비탈면과괴에 불리한 횡단형상은 복합사면, 상승사면, 평행사면, 하강사면 등의 순으로 알려져 있다. 본 연구의 대상지는 평행사면과 복합사면의 비중이 높게 나타나고 있는데, 이러한 특성은 도시유역 산지 특성 중 하나로 이해할 수 있다. 즉, 도시공간의 확대를 위해 기존의 상승사면 형태인 산지지역을 개발한 결과로 볼 수 있다. 또한 상부사면의 경사도는 5~52°C의 범위를 가지며, 평균경사는 약 24°C인 것으로 조사되었다. 10°C 간격으로 구분하여 살펴보면, 10~30°C에서 가장 높은 빈도(약 70%)를 나타내고 있는데, 이는 사면붕괴가 비교적 낮은 경사에서 발생한다는 기존의 연구결과와도 유사함을 알 수 있다(Kim et al., 2007; Kim and Chae, 2009).

넷째, 대상지의 식생분포는 활엽수림, 혼효림, 침엽수림 순으로 조사되었다. 일반적으로 활엽수림이 많은 지역이 산사태에 취약한 것으로 알려져 있으며, 이는 본 연구 대상지의 특성과도 부합함을 알 수 있다. 대상지역의 수목 경급은 대부분이 중경목(약 86%)에 해당하며, 식생밀도는 중밀도가 가장 높은 빈도(약 67%)를 보이며, 고밀도, 소밀도 순으로 조사되었다.

다섯째, 대상지의 계류부 길이는 381,095 m 범위로 조사되었으며, 100 m 간격으로 살펴보면, 200~300 m의 범위에서 가장 높은 빈도(약 33%)를 나타냄을 알 수 있다. 계류부의 경사는 4~36°C의 범위를 나타내며, 평균경사는 15.3°C로 나타났다. 10°C 간격으로 구분하여 살펴보면, 10~20°C의 범위에서 가장 높은 빈도(약 59%)를 나타냄을 알 수 있다.

여섯째, 토사재해 위험지역 하류부의 보호대상은 인가 10호 이상인 경우가 약 80%로 가장 큰 비중을 차지하고, 인가 5~10호인 경우가 10%, 인가 1~5호인 경우가 8% 등으로 나타났다. 즉, 대상지역 중 인가와 인접한 지역은 약 98%를 차지할 정도로 비중이 높은 것으로 나타났다. 또한 토사재해 위험지역의 경계부에서 인가, 시설 등과의 거리는 0~10 m인 경우가 약 43%로 가장 큰 비중을 차지하고, 10~30 m인 경우가 29%인 것으로 조사되었다. 즉, 대상 위험지역은 하류부 인가 및 시설 등과의 거리가 50 m 이내인 지역이 약 90% 이상을 차지함을 알 수 있다.

이상과 같은 대상지 특성을 공간영역별로 살펴보면, 산지 부분의 특성은 기존의 자연유역에 대한 조사결과와 큰 차이를 보이지 않으며, 시가지산지 경계부 주변에는 택지, 공원, 도로 등이 위치하고 있으며, 계류부 하단에는 다수의 인가가 인접해 있음을 알 수 있다. 즉, 도시지역에서는 사면재해 발생 시 주변 및 하류부의 인명 및 재산피해가 크게 나타날 수 있으며, 이에 대응하여 산자시가지 경계부 및 피해영향권에서의 대책을 보다 강화하는 방향의 전략이 필요함을 말해준다.

3. 군집분석을 이용한 토사재해 위험지역의 유형화

3.1 군집분석 기본 이론

군집분석(Cluster Analysis)은 관측대상들 간에 어떤 공통된 특징을 찾아 비슷한 특징을 갖는 관측치들끼리 그룹을 형성하는 방법이다. 군집화 방법은 크게 계층적 방법(hierarchical clustering)과 비계층적 방법(nonhierarchical clustering)으로 구분된다. 먼저, 계층적 방법은 한 군집이 다른 군집 내부에 포함되지만, 군집간의 중복을 허용하지 않는다. 이와 같은 군집화 방법은 각 군집간의 유사성을 계산하는 방법에 따라 최단연결법(single linkage), 최장연결법(complete linkage), 평균연결법(average linkage), 중심연결법(centroid linkage), WARD 연결법(or minimum variance method) 등이 있다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법은 WARD 연결법이며, 군집화 과정에서 발생 가능한 정보량의 손실을 최소화하는 방법이다(Ward, 1963). 비계층적 방법은 개체를 K 개 군집으로 집단화하는데 이용되며, K -평균법이 대표적인 방법이다(MacQueen, 1967).

본 연구에서는 WARD 연결법을 이용하여 계층적 군집분석을 수행하였으며, 이 방법은 군집 평균과 개체간의 편차제곱합(Error Sum of Square: ESS)을 이용하여 군집화 과정에서 발생하는 정보의 손실량을 최소화하기 위한 것이다. 이를 간단히 정리하면, i 번째 군집에서 객체 X_k 에 대한 군집평균을 \bar{X}_{ik} 라 하면, i 번째 군집에서 편차제곱합은 다음과 같다.

$$ESS_i = \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^p (X_{ijk} - \bar{X}_{ik})^2 \quad (1)$$

이때 총 편차제곱합은 다음과 같다.

$$ESS = \sum_{i=1}^j ESS_i \quad (2)$$

군집화의 첫 단계에서 즉, 모든 개체들이 하나의 군집을 이루는 경우에는 모든 i 에 대해 $ESS_i=0$ 이 되지만, 군집화를 진행함에 따라 ESS 는 증가하게 된다. 다시 말해 WARD 연결법은 군집화 과정에서 가용한 군집 쌍에 대해 ESS 의 증가가 최소가 되는 군집을 결정하는 방법이라 할 수 있다.

3.2 변수들 간의 상관관계

다변량 분석에서 설명변수들에 대한 다중공선성(multicollinearity)은 실증적인 사례를 다룰 때 일반적으로 나타나는 문제라 할 수 있다. 특히 본 연구에서와 같이 독립변수의 수가 많은 경우에는

그 영향력이 더욱 크게 나타날 수 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위해 각 인자들 간의 상관관계를 살펴보았으며, 이를 통해 상관성이 크게 나타나는 변수들을 파악하여 분석에서 제외하였다. 상관분석에서 명목형(nominal) 변수에 해당하는 변수들은 연속형(continuous) 변수로 변환하였으며, 이때 변수의 위험정도에 따라 구분된 평가점수를 이용하였다(NEMA, 2012; KFS, 2014).

변수들 간의 상관분석 결과는 Table 2와 같다. 표에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 고려한 영향인자들 사이의 상관성은 경우에 따라 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 횡단사면과 주변 지형은 0.61로 높은 상관성을 보이고 있으며, 경사길이와 높이도 0.52로 높은 상관계수를 나타낸다. 이는 평지, 완구릉, 구릉, 준산악, 산악과 같은 하류부의 지역 특성이 비탈면 형태와 상관성이 있음을 말해주며, 상부사면의 경사길이와 높이의 큰 상관성은 도시지역에서 인공 및 절토사면의 특성으로 볼 수 있다. 이와 같이 상관성이 높은 인자들은 모두 군집분석에 적용될 수 없다. 이 외에도 계류길이와 계류폭의 상관계수는 0.43, 보호대상과 계류폭과의 상관계수는 -0.41, 계류경사와 인가 및 공공시설 등과의 거리도 0.44의 상관계수를 보이고 있으며, 이들 인자들 역시 분석에 모두 적용될 수는 없다.

한편, Shimizu (1977; 1978)에 의하면, 비탈면의 안정성 판별에 영향을 미치는 기여도는 식생, 방위, 하천차수, 경사도, 횡단사면, 종단사면 등의 순으로 높게 나타남을 보인 바 있다. Kang (1986)은 산사태 발생에 기여도가 높은 요인이 식생, 종단사면형, 사면위치,

경사, 방위, 하천차수 순임을 보고한 바 있으며, Choi (1986)은 산사태면적에 영향을 주는 인자가 횡단면형, 경사길이, 모암, 사면 위치, 경사도, 석력함량, 입분경급, 지형, 산사태 깊이, 임상, 횡단면형 순으로 높게 나타남을 보인 바 있다. Ma et al. (2008)은 국립공원 지역의 산사태 발생위험지역 예측기법 연구에서 경사, 방위, 표고, 임상, 토심 등의 인자가 산사태 발생에 기여하며, Jeong (2010)은 산사태 위험예측도 작성에 관한 연구에서 모암, 방위, 경사도, 경사 위치, 경사길이, 종단면형, 입분 경급 등의 인자가 영향을 미치는 것으로 보고한 바 있다. Ma et al. (2014)은 산사태 발생의 영향인자가 횡단사면, 사면위치, 표고, 임상, 모암, 흉고직경 등임을 제시한 바 있다.

이상과 같은 연구를 살펴보면, 사면재해는 지형적 특성, 토질 특성 및 임상적 특성에 따라 복합적이고 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 연구의 궁극적인 목적은 도시지역 토사재해 위험지역의 특성을 조사하여 이를 유형화하고, 각 유형별로 적합한 관리대책상의 시사점을 도출하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 군집분석을 수행하는데 있어 기존 문헌과 영향인자들 간의 상관관계를 고려하여 주변 토지이용, 경사도, 식생밀도, 계류길이, 보호대상 인자 등 5개 변수를 이용하였다.

3.3 군집분석을 이용한 토사재해 위험지역의 유형화

최근 재해 위험지역 또는 위험요인 등의 지역 유형화 사례가

Table 2. Correlation Results Among Candidate Variables

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
①	1.00	0.05	-0.38*	0.11	0.61*	0.13	0.06	-0.19	-0.26	0.18	0.39*	-0.22	0.21	0.15	0.05
②	0.05	1.00	-0.01	-0.23	-0.17	0.36*	-0.25	0.00	0.10	0.18	0.15	0.19	-0.03	-0.12	0.33*
③	-0.38*	-0.01	1.00	0.24	-0.25	-0.38*	0.33*	0.18	0.25	-0.04	-0.33*	0.09	-0.22	0.07	0.28
④	0.11	-0.23	0.24	1.00	0.11	-0.36*	0.35*	0.22	0.01	-0.16	-0.14	-0.25	-0.10	-0.02	-0.18
⑤	0.61*	-0.17	-0.25	0.11	1.00	0.12	-0.07	-0.25	-0.14	0.19	0.23	-0.01	0.13	0.14	0.13
⑥	0.13	0.36*	-0.38*	-0.36*	0.12	1.00	-0.37*	-0.17	-0.13	0.19	0.12	0.22	0.05	-0.16	0.27
⑦	0.06	-0.25	0.33*	0.35*	-0.07	-0.37*	1.00	0.52*	0.21	-0.16	0.10	0.17	-0.30*	0.19	-0.02
⑧	-0.19	0.00	0.18	0.22	-0.25	-0.17	0.52*	1.00	0.07	0.14	0.29*	0.06	-0.12	0.05	-0.22
⑨	-0.26	0.10	0.25	0.01	-0.14	-0.13	0.21	0.07	1.00	-0.07	-0.05	0.18	-0.14	0.11	0.07
⑩	0.18	0.18	-0.04	-0.16	0.19	0.19	-0.16	0.14	-0.07	1.00	0.33*	-0.38*	0.28	-0.05	-0.05
⑪	0.39*	0.15	-0.33*	-0.14	0.23	0.12	0.10	0.29*	-0.05	0.33*	1.00	-0.09	0.43*	-0.09	-0.06
⑫	-0.22	0.19	0.09	-0.25	-0.01	0.22	0.17	0.06	0.18	-0.38*	-0.09	1.00	-0.35*	0.16	0.44*
⑬	0.21	-0.03	-0.22	-0.10	0.13	0.05	-0.30*	-0.12	-0.14	0.28	0.43*	-0.35*	1.00	-0.41*	-0.06
⑭	0.15	-0.12	0.07	-0.02	0.14	-0.16	0.19	0.05	0.11	-0.05	-0.09	0.16	-0.41*	1.00	0.07
⑮	0.05	0.33*	0.28	-0.18	0.13	0.27	-0.02	-0.22	0.07	-0.05	-0.06	0.44*	-0.06	0.07	1.00

1) ①Surrounding topography, ②Surrounding land use, ③Bed rock, ④Soil depth, ⑤Cross-section shape, ⑥Upper slope gradient, ⑦Slope length, ⑧ Height, ⑨Forest type&Diameter at breast height, ⑩Vegetation density, ⑪Stream length, ⑫Stream slope gradient, ⑬Stream width, ⑭Object to protect, ⑮Distance from the houses, public facilities and so on.

2) *: p < 0.05

늘어나고 있다(Park et al., 2013; Koo et al., 2015). 이는 지역 특성을 고려한 맞춤형 관리전략을 수립하기 위함이다. 이에 본 연구에서는 군집분석을 이용하여 토사재해 위험지역을 유형화하고, 각 유형별 특성을 고려하여 관리전략의 시사점을 도출하고자 한다. 한편, 원시자료의 분포가 왜곡된(skewed) 형태를 가질 경우 군집화 결과의 불확실성이 커질 수 있다. 이러한 경우에는 일반적으로 각 인자의 통계특성을 이용하여 자료의 표준화(standardization) 변환을 수행하는데, 본 연구에서는 다음과 같은 z-score 방법을 통해 각 인자들을 표준화하였다.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

여기서, μ 는 평균, σ 는 표준편차, x 는 변수를 나타낸다. 일반적인 군집분석 과정은 유사한 특성을 갖는 집단들로 군집화하면서, 하나의 객체가 한 집단을 이룰 때까지 계속된다. 이때 군집분석 결과는 군집 수에 따라 결정되는 나뭇가지그림(tree

diagram) 또는 덴드로그램(dendrogram)을 이용하여 검토할 수 있다. 군집분석에서 적절한 군집의 수를 결정하기 위해서는 준부분결정계수(Semi-partial R-squared), PST2 (Pseudo Hotelling's T²), CCC (Cubic Clustering Criterion) 등을 이용한다. 일반적으로 준부분결정계수의 기울기가 변화하는 부분을 살펴본 후 최적의 군집의 개수를 결정한다. 토사지역 위험지역의 5개 특성인자들을 이용하여 군집분석을 수행하였다.

Fig. 2에서 살펴볼 수 있듯이, 준부분결정계수를 기울기가 변화하는 군집의 수는 2개 또는 4개 정도가 적절한 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 이들 기준에 근거하여 군집의 수를 2개로 결정하였다.

전체 사례분석 대상지역 49개소 중에서 유형 I 은 31개소, 유형 II는 18개소로 나타나 유형 I 이 가장 흔한 위험지역 유형임을 알 수 있다. 위험지역 유형별 분포를 나타내면 Fig. 3과 같다. 유형화된 결과를 서울시의 지역별로 살펴보면, 유형 I 은 북한산, 개운산, 남산, 우면산 주변의 강북구, 성북구, 용산구, 서초구를 비롯한 노원구, 구로구, 서대문구, 종로구, 중구 등에 위치하며, 유형II는 도봉산, 수락산 주변의 도봉구, 노원구를 비롯한 강남구, 강서구, 관악구, 서대문구, 서초구 등에 위치하는 것을 알 수 있다. 전반적으로 서울지역의 분포 특성을 비교해보면, 위험지역은 지역별로 뚜렷하게 구분되지는 않는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 대상지역의 세부적인 여건에 따라 유형이 상이할 수 있음을 말해주며, 상대적으로 인공사면의 빈도가 높은 도시구역에서 더욱 두드러지는 특성으로 이해할 수 있다.

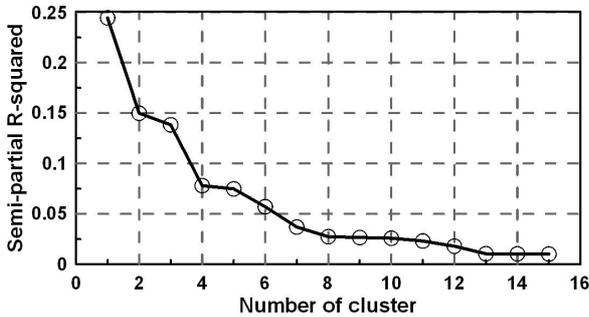


Fig. 2. Number of Clusters by Semi-Partial R-squared

3.4 유형별 특성 비교

토사재해 위험지역의 유형별 특성은 영향인자들의 차이를 통해 보다 자세히 살펴볼 수 있다. 2개의 유형별로 구분된 위험지역 특성의 기본 통계치를 정리하면 Table 3과 같다.

Table 3에 나타난 통계특성을 이용하여 유형별 영향인자들의 분포특성을 살펴보기 위해 박스플롯(box and whisker plot)을 나타내면 Fig. 4와 같다.

Table 3과 Fig. 4를 비교해보면, 위험지역 특성은 유형별로 일부 항목에서 뚜렷이 구분되는 것을 알 수 있는데, 특히 주변 토지이용과 경사도 항목이 유형별로 변별력을 크게 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 이들 인자는 평균값의 차이가 크게 나타나고, 유형별로 변동계수 및 자료의 분포특성이 뚜렷하게 구분됨을 알 수 있다. 식생밀도, 계류길이, 보호대상 항목은 상대적으로 평균적인 특성 차이가 크지 않으며, 변동계수 및 자료의 분포 형태도 불명확하게 나타나 유형을 구분하는데 영향력이 미미한 것으로 나타났다. 유형별로 각 항목의 특성을 비교하여 정리하면 Table 4와 같다.

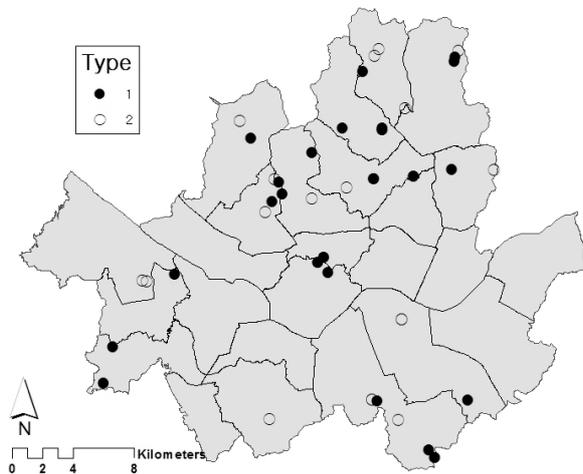


Fig. 3. Distribution of Debris Flow Hazard Zones by Group Based on Cluster Analysis

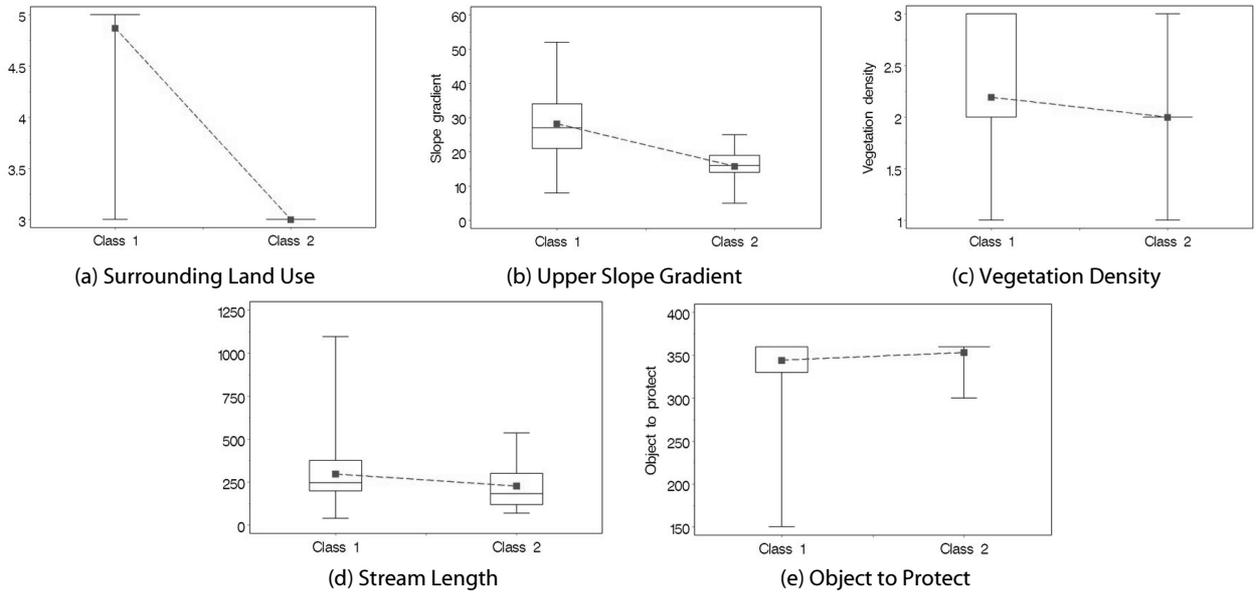


Fig. 4. Box and Whisker Plots of Variables for Groups of Debris Flow Hazard Zones

Table 3. Statistics of Variables for Groups of Debris Flow Hazard Zones

	All (49 sites)		Type I (31 sites)		Type II (18 sites)	
	Mean	Coefficient of variation	Mean	Coefficient of variation	Mean	Coefficient of variation
Surrounding land use	4.2	23.7	4.9	10.3	3.0	0.0
Upper slope gradient	23.7	46.2	28.3	38.4	15.8	33.2
Vegetation	2.1	26.6	2.2	24.7	2.0	29.7
Stream length	271.5	72.1	297.2	73.3	227.3	64.2
Object to protect	347.8	9.8	344.5	11.7	353.3	5.5

Table 4. Characteristics by Group of Debris Flow Hazard Zones

	Type I (31 sites)	Type II (18 sites)
Surrounding land use	Mostly housing sites, roads, etc.	Forest lands, parks all together
Upper slope	Steep and short slopes	Mostly gentle and long slopes
Vegetation	Mostly medium-to-high vegetation density	Mostly medium vegetation density
Stream slope	Mostly long and gentle stream slopes	Mostly short and gentle stream slopes
Downstream area	More than 1 unit of housing very closely	More than 5 unit of housing very closely

4. 판별분석을 이용한 토사재해 위험지역 유형화 검증 및 판별함수 유도

4.1 판별분석 이론

판별분석(discriminant analysis)은 미리 정의된 그룹(토사재해 위험지역 유형)의 정보를 근거로 그룹별 차이를 분석하고, 특정 그룹으로 분류시키는데 필요한 적정기준(판별함수)을 설정하여 어떤 표본이 어떤 그룹에 속할 것인가를 예측하는 기법이다. 다시

말해 판별분석은 이미 알고 있는 그룹의 정보를 이용하여 그룹별 판별식을 구하고, 이에 따라 기존의 개체를 할당할 뿐만 아니라 미지의 새로운 개체를 특정 그룹에 분류하는데 의의가 있다.

판별분석은 기본적으로 한 개의 종속변수와 여러 개의 독립변수를 가지는 선형모형이다. 종속변수는 관측자료들의 소속집단을 나타내는 범주형 변수이고, 여러 개의 독립변수들이 선형 조합되어 인위적인 조합점수 즉, 판별점수(discriminant score)가 만들어진다. 이때 독립변수들을 조합하는 기준은 조합점수의 집단 내 분산

(withingroup sum of square)이 상대적으로 최소화되고, 집단 간 분산(between-groups sum of square)이 상대적으로 최대화되어야 한다는 것이 된다. 판별분석을 통해 찾아내는 모형은 일반적으로 다음과 같다.

$$z = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p \quad (4)$$

여기서, z 는 독립변수들 x_1, x_2, \dots, x_p 의 조합에 의하여 인위적으로 만들어지는 선형조합 점수를 나타내며, a_1, a_2, \dots, a_p 는 판별계수로써 집단 간 분산에 대한 집단 내 분산의 비율이 최대화되도록 하는 상수이다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 Timm (2002)에서 살펴볼 수 있다.

4.2 집단 평균의 동질성에 대한 검증

판별분석의 핵심은 집단구성원(토사재해 위험지역)을 서로 변별하는 것이므로, 각 집단(토사재해 위험지역 유형)의 평균점의 차이에 대한 통계적 검정이 중요한 의미를 갖는다. 평균점의 차이에 대한 동질성 검정에는 Wilks의 Λ 와 F 값 등이 이용된다.

우선 Wilks의 Λ 는 모집단의 다변량정규분포를 가지는 경우 모집단 평균 간의 차이를 검정하는 우도비 통계량(likelihood ratio statistic)이다. Wilks의 Λ 는 판별함수 그 자체에 대한 검정방법이라기보다는 그 판별함수가 유도되기 이전에 시스템에 잔류하는 판별력의 유의성 여부를 검토하는 간접적인 접근방법이며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\Lambda = \frac{\text{집단 내 분산}(SSW)}{\text{총 분산}(= \text{집단 내 분산} + \text{집단 간 분산})(SST)} \quad (5)$$

여기서, Wilks의 Λ 가 1.0이면 관측된 집단 간의 평균이 동일하다는

것(차이가 없음)을 의미하지만, 이 값이 0에 가까우면 집단 내의 분산이 총 분산에 비해 작기 때문에 집단 평균간에는 차이가 있다는 것을 나타낸다. 즉, Wilks의 Λ 값이 작을수록 집단간의 판별력은 높아짐을 의미한다(Timm, 2002). 이를 보다 확실하게 알 수 있는 방법은 자유도를 고려하여 산정한 F 값을 이용하는 것이다. 이 F 값의 의미와 추정절차는 Park (2005)에서 자세히 살펴볼 수 있다. Wilks의 Λ 와 F 값은 서로 반대의 특성을 가져, Wilks의 Λ 값이 크면 F 값이 작아지고, Wilks의 Λ 값이 작으면 F 값이 커진다. 당연히 F 값이 클수록 집단 간의 분산이 커지게 되어 판별력이 높아지게 된다. 본 연구에서는 Wilks의 Λ 와 F 값을 이용하여 유형화된 그룹 간의 동질성 검정을 수행하였으며, 분석결과를 Table 5에 정리하였다.

동질성 검정 결과, 군집분석에 의해 유형화된 토사재해 위험지역들 간의 판별력은 우수한 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 Wilks의 Λ 값과 F 값을 이용하여 판단할 수 있다. 먼저 Wilks의 Λ 값은 0.1로 충분히 작음으로 집단간의 판별력이 높음을 알 수 있다. 또한 자유도를 고려한 F 값도 76.98로 크게 결정되었고, 이에 대한 유의확률이 유의수준($\alpha = 0.05$) 보다 작게 나타났으므로 그룹간의 차이는 뚜렷하다고 판단할 수 있다.

4.3 토사재해 위험지역의 유형별 선형 판별함수

독립변수들의 상대적인 중요성을 판단하기 위해서는 표준화된 정준판별함수가 주로 이용된다. 표준화된 정준판별식은 원시자료를 z -score로 변환한 것이며, 이를 통해 각 변수에 할당된 판별계수의 부호와 절대값을 검토하여 판별함수에 더 큰 영향을 미치는 변수를 살펴볼 수 있다. 군집분석에서 자료의 표준화를 위해 원자료를 z -score로 변환하였으며, 이를 이용하여 판별분석을 수행하였다. 본 연구에서 유도한 표준화된 정준판별함수는 Table 6과 같다.

Table 5. Test of Homogeneity in the Discriminant Analysis

Wilks	F-value	Significance probability
0.1005	76.98	< 0.0001

Table 6. Standardized Discriminant Function Coefficients of Variables

Variable	Fisher's linear discriminant function	
	Type I	Type II
Constant	-2.493	-7.393
Surrounding land use	6.085	-10.479
Upper slope gradient	1.898	-3.268
Vegetation density	-0.321	0.553
Steam slope gradient	0.250	-0.431
Object to protect	0.093	-0.1611

표준화된 정준판별함수에서 각 인자의 절대값이 크다는 것은 각 그룹간의 판별력이 크다는 것을 의미한다. 군집분석을 통해 유형화된 결과를 이용하여 정준판별함수를 구해보면, 각 인자별 계수의 범위는 주변 토지이용, 경사도, 식생밀도, 계류길이, 보호대상 비율 순으로 크게 나타났다. 특히, 상대적으로 큰 값을 갖는 주변 토지이용과 경사도는 토사재해 위험지역을 결정짓는 주요 영향인자임을 알 수 있다. 이러한 결과는 도시구역에서 발생하는 토사재해 위험도가 반영된 것으로 이해할 수 있다. 또한 식생밀도와 계류의 특성 역시 토사재해의 발생위험도와 연관되어 토사재해 위험지역을 구분하는 주요 인자가 된다. 본 연구의 궁극적인 목적이 유형특성별로 관리전략의 시사점을 도출하는 것임을 고려해보면, 이들 주요 인자들을 어떤 식으로 관리하느냐가 매우 중요한 역할을 하게 될 것이다.

정준판별함수를 유도한 후에는 판별식을 이용하여 대상집단들을 재분류하는 과정을 거치게 된다. 이를 오판별 분석이라 하며, 오판별률이 낮을수록 판별식이 큰 변별력을 갖는 것으로 이해할 수 있다. 오판별분석을 위한 방법은 크게 Re-substitution 추정법, 테스트데이터를 이용하는 방법, 교차검증 방법(또는 Jackknife 방법)이 있으며, 본 연구에서는 상대적으로 엄격한 기준을 적용하는 교차검증(cross validation)을 이용하였다. 앞서 유도된 판별함수를 이용하여 재분류를 통한 결과, 교차검증 방법에 의한 판별적중률(hit ratio)은 95.9%로 나타났다(Table 6 참조). 이는 본 연구에서 유도한 판별함수식이 토사재해 위험지역을 각 유형별로 적절히 판별하고 있음을 보여준다. 그러나 이 결과는 군집분석 시 고려한 변수들을 그대로 이용한 것이다. 새로운 토사재해 위험지역이 추가 될 경우 본 연구에서 유도한 판별모형을 이용하여 유형이 구분되어야 한다. 따라서 군집분석에서 이용된 변수를 모두 이용할 수도 있고, 경우에 따라서는 불필요한 변수를 최소화하여 보다 효율적인 판별모형을 유도할 필요가 있다. 이에 판별분석에 유의한 변수를 검증하는 과정이 추가적으로 요구된다.

4.4 변수 조정을 통한 유형별 선형 판별함수

판별분석의 궁극적인 목적은 개체들을 오분류 없이 적절히 분류 하는데 있다. 따라서 다양한 변수 선택방법을 고려해보고, 각각의

경우에 대한 오분류율을 비교하여 오분류를 최소화하는 판별함수를 선정해야 한다. 뿐만 아니라 오분류 비율이 동일하거나 차이가 미미하다면, 변수의 수가 적은 판별방법이 더욱 유리할 것이다. 이는 측정된 자료의 오차 부분과 새로운 개체판별을 위해 측정해야 하는 변수의 수를 최소화해야 보다 경제적이기 때문이다. 이를 위한 방법으로는 Forward 방법, Backward 방법, Stepwise 방법 등이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 이용되는 Stepwise방법을 적용하였다. 그 결과, 유형화된 토사재해 위험지역을 판별하기 위한 모형에 적절한 설명변수는 주변 토지이용, 경사도, 식생밀도이며, 그 영향력은 주변 토지이용, 경사도, 식생밀도 순으로 나타났다. 따라서 이들 변수들은 토사재해 위험지역의 유형을 설명하는데 가장 중요한 변수임을 알 수 있다. 이들 변수만을 이용한 판별함수 결과는 Table 7과 같다.

Table 7과 Table 8을 비교하여 살펴보면, 계류길이와 보호대상 변수의 포함 여부에 따른 판별계수의 차이는 미미한 것을 알 수 있다. 또한 계류길이와 보호대상 변수를 제외한 판별함수의 오판별 분석 결과를 살펴보면, 판별적중률은 95.9%로 동일한 것으로 나타났다. 그러나 보다 경제적인 토사재해 위험지역의 유형 구분을 위해서는 계류길이와 보호대상 변수를 제외하고 주변 토지이용, 경사도, 식생밀도를 이용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 토사재해 위험지역 유형별 관리를 위한 시사점

앞서의 분석에서 도시지역 토사재해 위험지역은 유형별로 명확히 구분되는 특성을 갖고 있는 한편, 일부 특성에서는 유형별로 큰 차이를 보이지 않는 부분도 있음을 확인하였다. 따라서 도시지역 토사재해 위험지역 관리를 위한 대책의 전략적 우선순위도 유형에 따라 달라져야 함은 물론 모든 지역에 걸쳐 공통적으로 적용되어야 할 부분도 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 각 유형별 특성에 따른 우선전략과 공통전략으로 구분하여 시사점을 Table 8과 같이 도출해 보았다.

유형 I의 경우, 기본적으로 비탈면 주변에 택지, 도로 등이 위치한 경우로, 상부사면의 경사가 급하고 경사길이가 상대적으로 짧은 편에 속한다. 이러한 특성은 유형 I의 지역들이 도시공간의 확대에

Table 7. Standardized Canonical Discriminant Function Coefficients using Adjusted Variables

Variable	Fisher's linear discriminant function	
	Type I	Type II
Constant	-2.462	-7.302
Surrounding land use	6.032	-10.388
Upper slope gradient	1.871	-3.223
Vegetation density	-0.243	0.419

Table 8. Strategies for Debris Flow Hazard Zones by Areal Type

	Strategies by Type	Common Strategies
Type I	<ul style="list-style-type: none"> Measures in retaining walls, blocks, drainage facilities, buildings, roads, and so forth since the zones are located around housing sites and roads mostly Measure in retaining walls and blocks since upper sides of the slopes are steep and short Avoidance measures such as land use regulation and relocation to reduce life and property damage since housing sites are closely located in downstream areas 	Measures to reduce life and property damage in affected built-up areas since housing sites are located in and around hazard zones
Type II	<ul style="list-style-type: none"> Measures for development controls to building, ground cutting, fill-up, cultivation, and so forth which impede the stability of slopes since the zones are located around forest lands and parks mostly Measures for development controls to cultivation and for minimizing soil loss such as gutter, grit chamber, etc. since upper sides of the slopes are gentle and long Avoidance measures such as land use regulation, relocation, and evacuation to reduce life and property damage since housing sites are closely located in downstream areas 	

따라 이미 개발이 상당히 이루어진 곳임을 말해주며, 이들 지역은 재해 발생 시 피해규모가 더욱 크게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 위험지역 내 위험사면에 대해서는 옹벽, 축대 등의 안점관리방안을 강화하고, 산자사가지 경계부의 배수시설 설계기준 강화 및 점검방안 등을 마련할 필요가 있을 것이다. 또한 위험지역 하류부와 주변 인가와와의 거리가 매우 가깝고, 인가 1호 이상이 접하고 있으므로, 인명 및 재산피해를 저감하기 위하여 용도제한, 건축물 이전 및 철거 등과 같은 직접적인 회피전략을 강화할 필요가 있다.

유형II의 경우는 도시화가 상대적으로 덜 이뤄진 곳으로, 대상지 주변에는 입자와 공원 등이 위치하고 있다. 이들 지역의 토사재해 관리를 위해서는 우선적으로, 비탈면의 안정성을 저해하는 각종 개발행위(건축, 절·성토, 개간 등)를 제한하고, 불가피할 경우 사방 시설, 골막이 등의 적절한 대책을 마련하도록 해야 할 것이다. 또한 유형II는 상부사면의 경사가 완만하고 경사길이가 긴 편에 속하고 있으므로 토양유실을 방지하기 위해 측구 및 침사지 등을 설치·보완하고, 산지 개간행위를 규제할 필요가 있다. 유형II의 경우도 위험지역 직하류부에 다수의 인가가 인접해 있는데, 건축물 이전 및 철거 등과 같은 회피전략과 피난대피체계 등을 마련하고 주민들에게 홍보할 수 있는 방안도 마련할 필요가 있다.

한편, 대부분의 토사재해 위험지역 하류부에는 다수의 인가가 밀집해 있으므로, 기본적으로 인명 및 재산피해를 최소화하기 위한 전략을 강화할 필요가 있다. 아울러 하류부의 피해영향권 내에 시가지가 인접해 있다는 점을 고려해서, 각종 개발사업·행위 시 주변환경 및 피해예상지역에 대한 영향평가가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 서울시를 사례로 도시지역 토사재해 위험지역에 대한 특성을 살펴보고, 다변량통계분석을 이용하여 위험지역을

유형화하여 관리전략상의 시사점을 도출하였다. 사례분석은 서울시에 산재한 49개 토사재해 위험지역을 대상으로 이뤄졌으며, 조사 항목의 특성을 이용하여 다변량통계분석을 수행하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

사례분석을 통해서 살펴본 바, 도시지역 토사재해 위험지역에는 계류부 하단 주변에 공원, 택지, 도로 등이 위치하며, 다수의 인가가 위험지역과 인접해 있음을 알 수 있었다. 이러한 특성은 도시지역에서 토사재해 위험지역에 대한 관리방안 마련 시 사방시설, 옹벽, 축대 등과 같은 전통적인 구조물적 대책에 대하여 직접적인 피해발생자인 시가지 영향권에서의 안전관리대책을 고려할 필요가 있음을 말해준다. 또한 사례지역에 대한 군집분석 및 판별분석 결과, 대상 위험지역은 크게 2가지 유형으로 구분되었으며, 토사재해 위험지역의 중점 관리요소는 주변 토지이용과 경사도임을 확인하였다. 유형별 특성을 고려하여 관리전략상의 시사점을 살펴보면, 유형 I 은 가장 많이 발견되는 유형으로서, 비탈면 주변에 택지, 도로 등이 위치하고 상부사면의 경사가 비교적 급하기 때문에 옹벽, 축대, 배수시설 등의 정비와 함께 건축물·시설물 차원의 방재대책을 강화할 필요가 있음을 시사하였다. 유형II의 경우는 비탈면의 안정성을 저해하는 각종 개발행위를 제한하고, 토양유실 방지를 위해 측구, 침사지 등의 설치 및 산지 개간행위 규제 등의 대책이 시급함을 시사하였다. 아울러 모든 위험지역 유형에 걸쳐 시가지 인명 및 재산피해 저감을 위한 용도제한, 건축물 이전 및 철거 등과 같은 적극적인 회피전략이 강화되어야 함도 확인할 수 있었다.

이상과 같은 결과는 도시지역 토사재해를 관리하는데 있어 토사재해 발생지역인 산지 상류부 및 산자사가지 경계부 중심의 관리대책만으로 한계가 있고, 위험지역 영향권에 있는 시가지에 대한 관리대책을 병행해야 함을 말해주며, 세부적인 중점관리사항에 있어서는 유형에 따라 차이가 있음을 말해준다. 따라서 본 연구에서와 같이 도시지역 토사재해 위험지역에 대하여 비탈면과 그 주변의

사가지 특성을 고려하여 유형화한다면, 보다 적절한 안전관리전략을 도출하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업(13건설연구S04)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

References

- Cha, A. (2014). "A comparison on the identification of landslide hazard using geomorphological characteristics." *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 67-73.
- Cha, A. and Kim, T. H. (2014). "Analysis on the characteristics of geomorphological features affecting the initial state of landslides." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 10, No. 6, pp. 61-68.
- Choi, G. (1986). Landslides Occurrence and its Prediction in Korea. Gangwon National University, Ph.D dissertation.
- Denlinger, R. P. and Iverson, R. M. (2001). "Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 2. Numerical Predictions and Experimental Tests." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. B1, pp. 553-566.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. and Ibsen, M. L. (1996). *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. Wiley, Chichester.
- Gyeonggi Research Institute (GRI) (2011). *Analysis on the Properties and Systematic Management of Potential Landslide Sites*.
- Horton, P., Jaboyedoff, M. and Bardou, E. (2008). *Debris Flow Susceptibility Mapping at a Regional Scale, Proc. of the 4th Canadian Conference on Geohazards*, Quebec, Canada.
- IPCC (2007). *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeong, G. W. (2010). *Studies on the Causal Characteristics of Landslide and the Development of Hazard Prediction Map for Landslide in Gyeongsangbuk-Do Province, Korea*. Kyungpook National University, Ph. D dissertation.
- Kang, S. H., Lee, S. R., Nikhil, N. V. and Park, J. Y. (2015). "Analysis of differences in geomorphological characteristics on initiation of landslides and debris flows." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 249-258.
- Kang, W. P., Murai, H., Omura, H. and Ma, H. S. (1986). "On the determination of slope stability to landslide by quantification (II)." *Journal of Korean Forestry Society*, Vol. 75, pp. 32-37.
- Kawakami, T., Miki, Y. and Mizuyama, T. (2007). "Tendency of sediment disaster hazard as seen from the area setting status of basic survey based on the sediment-related disaster prevention law." *Conference of Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 56, No. O-55, pp. 168-169.
- Kim, J. H. and Kim, W. Y. (2013). "Review of research trends on landslide hazards." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 23, No. 3, pp. 305-314.
- Kim, K. S., Song, Y. S., Cho, Y. C., Kim, W. Y. and Jeong, G. C. (2006). "Characteristics of rainfall and landslides according to the geological condition." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 2, pp. 201-214.
- Kim, K., Lee, D., Kim, and Lee, S. (2008). "A study on model tests for debris flow characteristics." *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 9, No. 5, pp. 83-89.
- Kim, S. K. and Seo, H. S. (1997). "Analysis of debris flow movements using rheological model." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 5, pp. 133-143.
- Kim, S. W., Chun, K. W., Kim, J. H., Kim, M. S. and Kim, M. S. (2012). "Characteristics of heavy rainfall for landslide-triggering in 2011." *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 101, No. 1, pp. 28-35.
- Kim, S. W., Jung, S. J., Choi, E. K., Kim, S. H., Lee, K. H. and Park, D. G. (2013). "An analysis of the current status of disasters occurring on the steep slopes in Korea." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 22, No. 11, pp. 1529-1538.
- Kim, S., Paik, J. and Kim, K. S. (2013). "Run-out modeling of debris flows in Mt. Umyeon using FLO-2D." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 965-974.
- Kim, W. Y. and Chae, B. G. (2009). "Characteristics of rainfall, geology and failure geometry of the landslide areas on natural terrains, Korea." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, No. 3, pp. 331-344.
- Kim, W. Y., Lee, S. R., Kim, K. S. and Chae, B. G. (1998). "Landslide types and susceptibilities related to geomorphic Characteristics-Yeonchon-Chulwon Area-." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, No. 2, pp. 115-130.
- Kim, Y. and Paik, J. (2011). "Experimental investigation of effects or sediment concentration and bed slope on debris flow deposition in culvert." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 5B, pp. 393-489.
- Ko, S. M., Lee, S. W., Yune, C. Y. and Kim, G. H. (2013). "GIS-based analysis of debris-flow characteristics in Gangwon-do." *The Journal of the Korean of Surveying*, Vol. 31, No. 1, pp. 57-67.
- Koo, Y., Lee, S., Lee, D. and Jung, J. (2015). "A study on mitigation measure by classification of areas based on risk factors of snowfall." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 2, pp. 393-398.
- Korea Forest Service (KFS) (2014). *Guideline for Investigation and Maintenance of Landslide Vulnerable Area*.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (2004). *Development of QRA System and Damage Mitigation Technology of Landslides*.
- Lee, M. J., Lee, S. R. and Jeon, S. W. (2012). "Landslide hazard mapping and verification using probability rainfall and artificial neural networks." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 57-70.

- Lee, S. W., Kim, G. H., Yune, C. Y., Ryu, H. J. and Hong, S. J. (2012). "Development of landslide-risk prediction model thorough database construction." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 23-33.
- Lorente, A., Garcia-Ruiz, J. M., Begueria, S. and Arnaez, J. (2002). "Factors explaining the spatial distribution of hillslope debris flows." *Mountain Research and Development*, Vol. 22, No. 1, pp. 32-39.
- Ma, H. W., Jeong, W. O. and Park, J. W. (2008). "Development of prediction technique of landslide hazard area in Korea national park." *Journal of Korean Forestry Society*, Vol. 97, pp. 326-331.
- MacQueen, J. B. (1967). Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. In *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pp. 281-297.
- Morrissey, M. M., Wiczorek, G. F. and Morgan, B. A. (2001). A Comparative Analysis of Hazard Model for Predicting Debris Flow in Madison County, Virginia. US Geological Survey, Open-file report, pp. 01-67.
- National Emergency Management (NEMA) (2012). Steep Slope Maintenance Manual.
- 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. 22-33.
- Park, C., Shin, S. Y. and Son, E. J. (2013). "Classifying flood prone areas in seoul using multivariate analysis." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 2, pp. 245-255.
- Park, H. J. (2005). Understanding Multivariate Statistical Methods. Hag Yeon Sa.
- Park, J. K., Yang, I. T., Kim, T. H. and Park, H. G. (2008). "Extraction of landslide risk area using GIS." *The Journal of the Korean Society of Surveying*, Vol. 26, No. 1, pp. 27-39.
- Sarle, W. S. (1983). Cubic Clustering Criterion, SAS Technical Report A-108, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2012). Landslide Mitigation System Development and Complete Survey of Land Slope (I).
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2013). Landslide Mitigation System Development and Complete Survey of Land Slope (II).
- Seoul Metropolitan Government (SMG) (2014). Landslide Mitigation System Development and Complete Survey of Land Slope (III).
- Shimizu, T. (1977). "Statistical analysis of the stability of slopes on the granite Area." *Journal of the Japanese Forestry Society*, Vol. 59, No. 5, pp. 186-190.
- Shimizu, T., Kikuya, A. and Tsuboyama, Y. (1992). "Influence of changes in vegetation upon the runoff characteristics of mountainous drainage basins." *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute*, Vol. 363, pp. 21-39.
- Shimizu, T. (1978). "Discrimination of dangerous slope in landslide -theory technology-." *Forest Techniques*, Vol. 439, pp. 23-26.
- Timm, N. H. (2002). Applied Multivariate Analysis. Springer Verlag.
- Ward, J. (1963). "Hierarchical grouping to optimize an abjective function." *Journal of American Statistical Association*, Vol. 58, pp. 236-244.
- Watanabe, Y., Miki, Y., Horiuchi, S., Utiyama, H., Ogawa, N. and Hiramoto, K. (2011). "Introduction of landslides prone areas setting support system (landslide) improved version." *Conference of Japan Society of Erosion Control Engineering*, Vol. 60, No. 05-53, pp. 236-237.