GIS를 이용한 강원지역 토석류 특성분석

GIS-based Analysis of Debris-flow Characteristics in Gangwon-do

고석민¹⁾ · 이승우²⁾ · 윤찬영³⁾ · 김기홍⁴⁾

Ko, Suk Min · Lee, Seung Woo · Yune, Chan Young · Kim, Gi Hong

Abstract

In Korea, there are debris-flow disasters induced by typhoon and localized torrential rainfall annually. There are particularly extensive debris-flow disasters in Gangwon-do because of its geomorphological characteristics; the extensive coverage of mountainous region, steep slope, and shallow soil. In this paper, we constructed a GIS database about topological characteristics of debris-flow basin in Gangwon-do by years of field survey. Also, we conducted frequency analysis based on this database with the digital forest type map and the digital soil map. We analyzed frequencies of debris-flow by simple count for topological characteristics, whereas we analyzed by considering an area ratio based on GIS for physiognomic and geologic characteristics. We used slope, aspect, width, depth and destruction shapes for analysis about topological characteristics of debris-flow basin. Also we used attributes of forest physiognomy, diameter, age, and density about physiognomic characteristics, and in terms of geologic characteristics, we used attributes of drainage class, effective soil depth, subsoil properties, subsoil grave content, erosion class, parent material of soil, and topsoil properties. In consequence, we figured out topographic, forest physiognomic, and geologic characteristics of debris-flow basin. This result is applicable to establish a rational disaster prevention policy as a fundamental information.

Keywords : Debris-Flow, Field survey, Frequency Analysis, GIS, Gangwon-do

초 록

우리나라에서는 매년 태풍 혹은 국지성 집중호우로 유발되는 산사태 및 토석류로 인한 피해가 발생하고 있다. 특히, 강원도 지역은 대부분 산지로 이루어져 있고 지형의 경사가 가파르고 토심 또한 얇아 많은 피해가 발생하고 있다. 본 논문에서는 강원도의 피해지역을 대상으로 5년간 현장조사를 통해 수집된 위치 및 지형특성에 관한 GIS 자료를 기반으로 임상도 및 토양도 등과 함께 활용하여 토석류 발생구역의 특성을 추출하여 빈도 분석을 수행하였다. 지형적 특성은 토석류 발생구역의 발생부와 유하부의 지형적 특성에 따른 단순 계수에 의한 방법으로 빈도 분석을 수행하였으며, 임상 및 토양 특성은 GIS 기반으로 해당 속성의 면적비를 고려한 방법으로 빈도 분석을 수행하였다. 토석류 발생구역의 지형적 특성은 발생부의 경사, 폭, 심도, 거리, 경사향, 파괴 형태 등을 사용하여 분석하였으며, 또한 유하부의 유하거리, 경사, 폭, 심도 등을 사용하여 분석을 수행하였다. 토석류 발생구역의 임상 특성은 임상, 영급, 경급, 밀도 등의 속성을 사용하였으며, 토양 특성은 배수등급, 유효토심, 심토토성, 심토자갈, 침식등급, 토양 모재, 표토토성 등의 속성을 사용하였다. 빈도 분석 수행결과 토석류 발생부 및 유하부에 대한 지형적 특성과 토석류 발생 구역의 임상·토양 특성을 파악할 수 있었다. 이는 토석류 피해예방을 위한 합리적인 방재대책의 개발 및 적용 등에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

핵심어 : 토석류, 현장조사, 빈도분석, GIS, 강원도

1) 강릉원주대학교 대학원 토목공학과 석사과정(E-mail:seaintosky@naver.com)

2) 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail:swl@gwnu.ac.kr)

3) 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail:yune@gwnu.ac.kr)

4) 교신저자 · 정희원 · 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail:ghkim@gwnu.ac.kr)

1. 서 론

1.1 연구목적 및 배경

우리나라는 전 국토의 70% 이상이 산지로 이루어져 있으며, 매년 여름철 6월~9월 사이에 태풍 및 집중호우로 인해 발생한 사면붕괴 및 토석류와 같은 사면재해로 많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 2002년 태풍 ‘루사’의 경우 총 321명의 인명피해와 5조 1,479억원의 재산피해가 발생한 것으로 집계되었으며(National Disaster Management Institute, 2002), 2003년 태풍 ‘매미’의 경우 총 132명의 인명피해와 4조 7,757억원의 재산피해가 발생한 것으로 집계되었다(National Disaster Management Institute, 2003). 또한, 2006년 태풍 ‘에위니아’에 이은 집중호우로 인해 총 61명의 인명피해와 2조 1,485억원의 재산피해가 발생한 것으로 집계되었다(Ministry of Construction & Transportation, 2006).

강원도 지역에서 발생한 산사태는 전일과 발생 당일 강우량에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 이러한 토석류의 발생은 집중강우에 의한 지표수의 지반침투로 지반의 포화와 단위중량 및 간극수압의 증가, 기반암 경계면을 따르는 침투수압의 작용과 지반 전단강도 감소 등의 원인으로 사면활동이 상부사면에서 발생하였고 지속적인 강우에 의하여 토석류가 형성하여 하부까지의 산사태를 발생시킨 것으로 판단된다(Yoo et al., 2008). 토석류를 발생시키는 원인에는 크게 내적요인과 외적요인의 두 가지로 나눌 수 있으며 이들 요인과 함께 구비 되었을 때 비로소 산사태 및 토석류가 발생하게 된다. 즉, 내적으로 취약한 구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적요인이 가하여 질 경우 산사태가 작은 영향에도 쉽게 발생할 수 있다. 토석류는 토사와 물의 혼합물이 섞여 이동하는 현상으로 빠른 속도로 산지의 계곡부와 소하천을 따라 여러 입자들이 산 아래로 이동 및 퇴적하는 현상이다. 토석류는 발생부, 유하부, 퇴적부로 구분할 수 있으며 각각의 거동 매커니즘에 대한 해석은 여전히 연구단계에 있다. 실태파악 관련 연구는 토석류 피해 최소화화를 위해 대규모 피해지를 대상으로 현장조사를 수행하는 등 사례연구가 주류를 이루고 있다(Jun et al., 2011).

따라서 본 논문에서는 2006년부터 2011년까지 발생한 토석류 피해지역에 대한 현장조사를 2008년부터 2012년까지 수행하여 데이터를 구축하였고, 구축한 데이터를 활용하여 토석류의 발생, 유하의 지형과 입상, 토양에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 위치 및 지형특성에 관하여 조사한 위치 데이터를 기반으로 입상, 토양의 주제도와 중첩하여 토석류 발생유역의 특성을 추출하였다. 추출한 특성은 단순계수와 면적을 고려한 빈도분석을 실시하여 각각의 특성을 파악하였다.

1.2 연구대상지역

본 연구를 수행하기 위하여 강원도를 대상으로 2008년부터 2012년까지 약 5년간 현장조사를 수행하였다. 특히 2002년 ‘루사’와 2003년 ‘매미’, 그리고 2006년 ‘에위니아’ 및 다수의 집중호우로 유발된 산사태 및 토석류가 대표적인 예라 할 수 있다. 집중호우로 산사태 및 토석류에 의한 인명 및 재산피해가 이 기간 중 발생하였다. 강원도지역은 매우 가파르고 험준한 지형을 띄고 있고 토석류 발생지역이 광범위 하여 2008년부터 2012년까지 단계적으로 원주·춘천·태백 지역 7개 유역, 인제군 42개 유역, 평창군 53개 유역 총 102개 유역에 대하여 현장조사를 진행하였다.

2. 연구데이터 수집

2.1 현장조사 및 DB구축

자료취득 방법은 현장조사와 항공사진 판독을 실시하여 자료를 취득하였다. 산사태 발생 이후 강원도 지역에 대한 현장조사를 실시하였다(그림1). 현장조사야장 분류 방식을 적용하여 레이저 거리 측정기(클리노미터) 휴대용 GPS 등을 이용하여 발생부의 위치, 경사, 사면 형상, 수목종류, 수목의 직경 등의 정보를 수집하고 현장조사야장에 기록하였고 유하부 또한 측정이 가능한 범위 안에서 약 10~50m의 거리 간격으로 경사도, 진행방향, 좌우측 침도, 폭 등을 조사하였다(그림2).

Fig 1. Field survey

앞서 조사한 현장조사 자료와 주제도를 이용해 구축한 자료를 유역별로 상세현장조사 DB에 정리 하였다. 정리된 DB를 이용하여 각 인자별 분석을 실시하였다. 그러나 퇴적부의 경우 현장조사 시점이 대부분 토석류가 발생하고 일정 시간이 지난 후 조사되어 퇴적면의 높이, 폭 등에 대한 자료를 조사함에 있어 많은 어려움이 있어 분석에서 제외 하였다. 정리가 완료된 토석류 상세현장조사 DB는 그림3과 같다.

ID		발 생 부(천전리 SITE2)									
		조사 일자 : 2011 년 8 월 5 일									
GPS좌표							경사		경사각		
-N 37.93575				-E 127.79197			38		172		
폭(상)	26	폭(중)	24	폭(하)	20	평균값	23	길이	44	부피	404.8
길이(상)	0.8	길이(중)	0.8	길이(하)	0.9	평균값	0.8				
파괴형태							식생종류				
평면	원주	쇄기	복합		침엽수	활엽수	원주	활엽수	활엽수	경작지

Fig 2. Field survey note

토석류 상세 현장조사 DB							No.		
위치(주소)	춘천시 신북읍 천전리 site1				경위도좌표 (WGS 84)	N 37.93437			
피해일시	2011년 7월 27일 0시 10분					E 127.79211			
현장조사기관	강릉원주대학교				조사일자	2011년 08월 05일			
발생부 번호	1				발생형태	토석류

발생부 특성									
파괴형태	사면경사(°)	폭(m)			심도(m)			길이(m)	경사각
		상	중	하	상	중	하		
원호파괴	39	8	15	19.7	0.8	0.5	1	45	SW
비고 :									
유하부 특성									
경사(°)	경사각	전변효율사 거리(m)	폭(m)	계곡심도(m)		특징	나무둘레(cm)	-	-
				좌	우				
45	SE	9	15.3	1.1	1.4	-	-	-	-
26	SE	10	13.7	1.2	1.5	-	-	-	-
22	SE	16	16.6	1	1.5	-	-	-	-
16	SE	20	16.2	1.2	1.4	기반암노출	-	-	-
46	SE	24	14.4	1.2	1.3	기반암노출	-	-	-
비고 :									
퇴적부 특성									
경사(°)	경사각	폭(m)			퇴적높이(m)			길이(m)	-
		상	중	하	상	중	하		
11	SE	-	33	-	-	1.2	-	62	-
비고 :									
배수구조물 및 사방시설									
구조물종류		배수구조물			사방구조물			-	-
배수	사방	폭(m)	높이(m)	경사(°)	폭(m)	높이(m)	용량(m³)		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
비고 :									
암상지질특성 및 산물유무									
암상	경도	영도	밀도	기반암	산물유무				
소나무림	소경목	3영도	고밀도	편마암	무				
토양 특성									
토양모재	심토자갈(%)	침식등급	유표토심(cm)	심토포성	표토포성	배수등급			
변질암	>35	있음	20-50	식양질	양토	매우 양토			
토석류 규모예측									
이승우	서훈석	김기훈	윤찬영	최병구	현장조사자	평균			
-	-	-	-	-	-	-			

Fig 3. Debris-flow specific field survey DB

2.2 기존 GIS 데이터

토석류 피해 후 촬영된 항공사진과 DEM을 이용하여 현장 조사에 앞서 퇴적지역을 판독하여 유역을 생성하였다. 생성된 유역을 기반으로 직접 현장조사를 실시하였으며 야장에 기록하였다. 현장조사를 통해 취득한 위치정보를 Shp형식의 벡터 데이터로 생성하였으며, 생성된 자료를 기반으로 임상도, 토양도와 중첩분석을 실시하였다. 임상에 대한 정보는 산림청에서 제공하는 1:25,000 수치임상도를 이용하여 수집하였고, 분석에 활용된 수치임상도의 주요 속성정보에는 수종, 영급, 경급, 밀도가 있다. 토양에 대한 정보는 농촌진흥청에서 제공되는 1:25,000 수치 토양도를 이용하여 수집하였고, 분석에 활용된 수치 토양도의 주요 속성정보는 표토토성, 심토자갈, 토양모재, 침식등급, 유효토심, 심토토성 등이다. 토양 및 임상, 지질 특성을 파악하는 가장 확실한 방법은 현장조사를 통한 시료채취 방법이 있으나 이는 시간과 비용이 많이 소모되고 각 분야의 전문적인 지식이 없는 상태에서의 현장조사는 객관적인 자료 수집이 어렵다는 단점이 있다. 주제도를 이용하면 위치정보만을 가지고 객관적인 자료를 수집할 수 있으며 시간과 비용을 절감할 수 있다.

3. 토석류 발생유역의 특성분석

토석류의 발생특성은 토석류의 발달단계인 발생부, 유하부, 퇴적부로 나누었으며 각각의 인자들에 대하여 빈도분석을 실시하였다. 발생부는 경사, 폭, 심도, 경사향 등에 대하여 빈도 분석을 실시하였으며, 유하부는 유하거리, 경사, 폭, 심도 등에 대하여 빈도분석을 실시하였다. 그러나 퇴적부의 대부분은 하천에서 유입되거나 발생지점과 현장조사와의 시차로 인하여 많은 자료를 획득하기 못하여 제외하였다. 발생부와 유하부의 빈도 분석은 해당경사나 해당길이의 합을 계산하여 횡수로 나타내어 빈도 분석을 실시하였다.

3.1 발생부 특성분석

토석류 상세현장조사 DB의 102개소 유역을 대상으로 단순 빈도 분석을 실시하였다. 분석에 사용된 발생부의 평균 경사는 33.68°, 평균 폭 15.57m, 평균 심도 1.97m, 평균 길이 25.56m 이다.

토석류 발생부의 경사 분포를 파악하기 위해 11개의 범위로 나누어 나타내었다. 그림 4에서 보듯이 발생부 경사는 30~35° 사이의 범주에서 가장 높은 빈도를 보였으며, 25~40° 사이의 빈도는 전체 빈도수의 70% 이상을 차지하였다. 기존의 연구를 살펴보면, 토석류 발생부의 경사 중 가장 높은 빈

도가 한국의 경우에는 26~30°(Kim et al., 2006), 일본의 경우 10~20°(Ikeya, 1989)인 것으로 나타났다. 사면발생은 20~45° 경사를 가진 사면에서 발생하며 경사각이 작은 사면에서는 토석류 발생 에너지가 충분치 않다(Yoo et al., 2009). 따라서 강원도 지역의 발생부 경사도는 25~40°가 적당한 토층을 가지고 있으면서 급경사를 동시에 지니고 있어 토석류 발생경사에 가장 많이 분포 한다고 사료 된다.

Fig 4. Slope of generating part

토석류 발생부의 평균 폭은 15.57m이며, 그림 5에 표현되어 있듯이 20m 이상의 범주에서 가장 높은 빈도를 보였고, 다음으로 5~10m에서 높은 빈도를 보였다.

Fig 5. Width of generating part

토석류 발생부의 평균 심도는 약 1.97m이다. 그림 6에 나타나 있듯이 1~2m의 심도에서 가장 높은 빈도를 보였고 대부분 3m이내의 얇은 심도를 보였다. 이는 토석류 발생부 대부분 기반암 위에 얇은 토층을 구성하고 있으며 강우에 의해 쉽게 포화되고, 그 무게가 마찰력을 지탱하기 못하여 흘러내려 토석류가 발생한다고 사료된다.

Fig 6. Depth of generating part

토석류 발단부의 파괴된 사면 평균 길이는 약 25.56m이다. 그림 7과 같이 빈도는 30m 이상 범주의 빈도가 가장 높았고 다음으로 5~10m의 빈도였다. 강원도 지역의 발생부는 급경사가 많아 가장 긴 길이로는 50m에 이르렀으며 급경사일수록 발생부의 길이가 길게 관측되었다.

Fig 7. Length of generating part

토석류 발생부의 파괴형태는 그림 8과 같이 평면파괴가 가장 많았으며, 그 다음으로 원호 파괴가 많았다. 대부분의 사면이 원호와 평면파괴를 보이는 것으로 보아 사면활동으로 인한 자연사면의 파괴가 토석류로 발전할 수 있음을 추정할 수 있다.

발생부의 경사향은 경사의 방향을 8방위로 구분하여 나타낸 것이다. 그림 9에서 보듯이 남동쪽의 빈도 수가 가장 높았으며, 북서쪽, 남서쪽, 북동쪽 순서이다. 경사향의 경우 단순 빈도 수 이므로 토석류의 발생이 특정방향이라고 보기는 어렵다고 판단된다.

Fig 8. Shape of generating part destruction

Fig 9. Aspect of generation part

3.2 유하부 특성분석

구축한 토석류 상세현장조사 DB 중 102개소의 자료를 이용하여 유하부의 경사도, 폭, 침도, 경사향, 유하거리 등 빈도 분석을 수행하였다. 유하부의 평균 경사는 19.58° , 평균 폭 14.14m, 평균 침도 3.46m, 유하거리 814m로 나타났다.

토석류 유하부의 경사도 산정은 각 유역별 측정된 유하부 경사의 평균값을 이용하였다. 유하부의 경사도는 발생부보다 낮은 경사인 $10\sim15^\circ$ 사이의 빈도가 가장 높았고 5° 이하와 40° 이상의 경사도는 없었으며, 경사에 따른 유하부의 빈도는 그림 10에 나타나 있다. 기존 연구에서 스위스 알프스 지역의 유하부 평균 경사를 조사한 결과 $30\sim40^\circ$ 의 범위에서 가장 높은 빈도를 보였는데(Zimmermann et al., 1997) 나타난 사례를 볼 때 강원지역 대부분의 유하부는 5° 이하의 경사에서는 더 이상 진행하기 않고 퇴적이 된다고 추정할 수 있다.

Fig 10. Slope of flowing part

각 유역별 폭의 평균값을 이용하여 유하부 폭을 산정하였다. 그림 11에서 보듯이 가장 높은 빈도를 보인 유하부의 폭은 5~10m 사이이나 평균 폭이 14.14m로 5~15m까지의 분포를 보였다. 발생부의 폭과 비슷한 폭을 보였으며 토석류가 진행하면서 흐름방향에 의해 증대된 토량으로 인해 폭이 비슷하게 유지되는 것으로 판단된다.

Fig 11. Width of flowing part

각 유역별 좌우심도의 평균값을 이용하여 유하부의 심도를 산정하였다. 유하부의 심도는 1~2m의 빈도가 가장 높았고 평균 심도가 3.46m로 발생부 보다 깊은 심도를 보였다. 그림 12는 유하부의 심도에 따른 토석류의 발생 빈도를 표현하고 있다. 이는 토석류가 진행하면서 유량의 증가로 유하부의 토층을 침식하며 내려가기 때문인 것으로 판단된다.

Fig 12. Depth of flowing part

토석류의 유하거리는 현장조사를 통해 취득한 이동 거리의 총합으로 환산하였다. 그림 13에 표현되어 있듯이 1000m 이상의 빈도가 가장 높은 빈도를 보였으며, 강원도 한계령 지역이 2km에서 최대 4km까지 유하거리가 형성되어 있었으며, 평균 유하거리는 814m였다. 기존 연구에서 스위스 알프스 지역의 경우 200~400m 정도의 빈도가 많은 것으로 나타났으며 (VAW, 1992), 일본 Yakedake산 Kamikamihori 계곡의 경우에는 토석류 조사결과 57.1%가 600~800m 정도를 이동하는 것으로 분석되었다(Okuda and Suwa, 1984).

Fig 13. Flow length

3.3 임상 특성 분석

임상도는 임상, 영급, 경급, 밀도로 구분하여 산림을 구별할 수 있는 주제도이다. 토석류 발생 유역의 임상특성을 파악하기 위해 1:25,000 임상도를 이용하였으며, 해당 속성의 면적비를 고려한 빈도 분석을 유역 106개소를 대상으로 실시하였다. 빈도 산출식은 식1과 같다.

$$\frac{\frac{N}{\Sigma N}}{\frac{A}{\Sigma A}} \quad (1)$$

여기서 ΣA 는 주제도의 전체면적, A 는 해당되는 속성의 전체면적, ΣN 은 전체 토석류 발생횟수, N 은 해당속성의 토석류 발생횟수이다. 식1의 결과는 면적의 비율과 발생횟수의 비율이 같으면 1의 값을 가진다. 즉 1보다 크면 토석류 발생에 영향을 미치는 인자로 판단할 수 있으며, 1보다 작으면 토석류 발생에 영향을 미치지 않는 인자로 판단할 수 있다. 면적 비를 고려한 빈도 분석은 임상도 4개 인자를 대상으로 실시하였다.

기존 연구에서 강우량이 많은 경우 우산효과에 의해 침엽수림 보다 활엽수림과 혼효림에서 지표에 도달하는 강우가 더 적기 때문에 임상은 산사태 및 토석류 발생에 중요한 인자로 판단된다(Lee et al., 2009). 임상도로 추출한 임상분은 활엽수림지역이 가장 많았고 침활혼효림, 소나무림, 낙엽송림 순으로 분포하였다. 면적 비를 고려한 빈도 분석 결과 침활혼효림, 낙엽송림, 목장, 제지의 빈도가 1 이상의 값을 보여 면적에 비해 높은 발생빈도를 보였다. 활엽수림에서 발생횟수는 2번째로 높았으나 면적 비가 가장 높아 1이하의 낮은 빈도를 보였다. 이와 반대로 목장과 제지의 경우 발생횟수는 적었으나 임상에서 차지하는 면적 비가 적어 3~4정도의 빈도를 보였다. 그림 14는 임상인자 별 토석류의 발생빈도를 표현하고 있다.

Fig 14. Debris-flow frequency of forest physiognomy

경급이란 입목의 흉고 직경에 따라 치수, 소경목, 중경목, 대경목으로 나눈 것이다. 그림 15에서 보듯이 토석류 발생유역의 경급은 치수와 소경목, 중경목이 1 이하로 토석류 발생 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있으며, 대경목은 약 15로 매우 높은 빈도를 보였다. 강원도는 산지지역이 대경목의 비가

높아 나무의 크기가 크다고 할 수 있으며, 경급 중 대경목이 토석류 발생에 영향을 준다고 판단된다.

Fig 15. Debris-flow frequency of tree diameters

영급이란 임령을 일정한 폭으로 묶어 같은 급으로 분류해 놓은 것이다. 일반적으로 10년을 한 영급으로 묶어 표시한다. 그림 16에 표현되어 있듯이 영급은 경급의 경향과 같이 수령이 높아질수록 높은 빈도를 보였다. 1영급, 2영급, 3영급, 4영급은 1보다 낮은 값을 보여 영향이 적은 것으로 판단되며, 특히 6영급은 적은 면적 분포에도 불구하고 많은 발생빈도를 보여 약 9정도의 높은 값을 보였다. 이는 수령의 증가는 곧 흉고 직경의 증가로 판단할 수 있으므로 나무의 노화로 인해 뿌리 인장강도가 약해지기 때문으로 판단된다.

Fig 16. Debris-flow frequency of tree ages

밀도란 면적에 비례하여 교목의 수관 점유율을 소밀도, 중밀도, 고밀도 각각 세 등급으로 구분하여 나타낸 것이다. 토석류 발생유역의 밀도는 그림 17과 같이 소밀도와 중밀도가 1 이상의 값을 보였고, 기준 값인 1과 많은 차이를 보이지 않아 표본의 추가를 통하여 추가적인 분석이 필요하다고 판단된다.

Fig 17. Debris-flow frequency of tree densities

3.4 토양 특성 분석

토양도는 표토토성, 심토자갈, 토양모재, 침식등급, 유효토심, 심토토성, 토양모재로 구분하여 각 속성별로 구별할 수 있도록 된 주제도이다. 토석류 발생 영역의 토양학적 특성을 파악하기 위해 1:25,000 토양도를 이용하였으며, 임상 특성 분석과 마찬가지로 유역 106개소를 대상으로 면적 비를 고려한 빈도분석을 실시하였다.

배수등급이란 토양이 물에 불포화되는 지속기간이나 빈도를 나타내는 것이다. 등급으로는 불량, 약간불량, 약간양호, 양호, 매우양호로 구분된다. 강원도 지역 배수등급의 분포는 매우양호 지역이 약 65% 이상으로 가장 넓고, 양호, 약간양호, 약간불량, 불량 순으로 분포 되어 있다. 면적을 고려한 빈도는 그림 18과 같이 매우양호, 양호, 불량 빈도가 1보다 높은 값을 보여주며 토석류 발생에 영향을 줄 수 있다고 판단할 수 있었다. 토양의 투수성이 양호하면 토층이 더 쉽게 포화되어 물이 더 빠르게 토층과 암반의 경계부에 도달함으로써 영향을 크게 줄 수 있다고 판단된다. 그러나 강원도 지역의 약 65%가 매우양호로 각 속성별로 구분하면 지하수위와 분포

Fig 18. Debris-flow frequency of drainage class

등을 이용하여 경향을 파악하기에는 다소 무리가 있고, 약간양호와 불량 속성을 갖는 데이터 수가 적으므로 각 속성별로 구분하면 지하수위와 분포 등을 이용하여 경향을 파악하기에는 다소 무리가 있다고 사료된다.

유효토심이란 작물의 뿌리가 땅속으로 충분히 뻗을 수 있는 깊이를 말한다. 일반적으로 굳은 토층까지 거리를 말한다. 토석류 발생영역의 모든 유효토심은 20~100cm 사이의 값을 나타냈다. 면적을 고려한 빈도는 그림 19에 나타나 있듯이 20~50cm의 빈도가 1이상으로 면적 비보다 높은 빈도를 나타냈고 20cm이하의 0에 가까워 토석류 발생에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이전 사례를 볼 때, 유효토심이 얕을수록 강우에 의한 사면포화현상이 빠르게 진행되어 산사태 발생에 취약하다고 한다(Lee et al., 2012) 그러나 20cm 이하의 토심은 너무 얕아 토석류 발생이 관측 되지 않거나 토층이 유실된 지형이라 같은 결과가 나온 것으로 추정된다. 따라서 얇은 토층보다는 1m이내의 적당한 토층을 가지는 지역이 토석류 발생 조건에 더 부합된다고 판단된다.

Fig 19. Debris-flow frequency of effective soil depth

심토토성은 표면에서부터 약 15cm 이상의 토양을 말하며 점토, 모래, 미사의 함량에 따라 구분되어 진 것이다. 그림 20에 나타나 있듯이 사양질의 빈도가 1이상으로 면적 비보다 높은 빈도를 나타냈고, 식양질과 식질은 1이하로 면적 비보다 낮은 빈도를 보였다. 따라서 사양질이 토석류 발생에 영향을 미칠 수 있다고 판단할 수 있었다. 사양질은 점토의 함량이 적은 토양으로 점성이 작고 강우에 의한 영향이 큰 토양으로 토석류 발생에 영향을 미친다고 사료된다.

심토자갈은 표면에서부터 20cm 이상의 깊이에 직경 2mm 이상의 자갈 함유량을 말한다. 식생의 뿌리 신장에 영향을 미친다. 토석류 발생영역의 모든 심토자갈의 분포는 고르게 분포 되어져 있다. 면적을 고려한 빈도분석에서는 그림 21과 같이 10mm 이하와 35mm이상의 빈도가 1이상으로 면적 비

Fig 20. Debris-flow frequency of subsoil properties

다 높은 빈도를 나타냈고 10~35cm에서는 1이하로 토석류 발생에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 강원도 지역은 면적에 비해 심토자갈의 분포가 고르게 분포되어있고 발생빈도 또한 고르게 분포 되어져 있어 경향을 파악하기에는 다소 무리가 있다고 판단된다.

Fig 21. Debris-flow frequency of subsoil grave content

침식등급은 물, 바람, 중력에 의해 토양이 유실되는 정도를 표시한 것이다. 토석류 발생유역에서 빈도 분석의 결과 그림 22에 나타나 있듯이 침식이 없는 유역보다 있는 유역이 1이상으로 면적 비 보다 높은 빈도를 나타내었다. 침식은 15~20cm 이내의 표층에서 일어나며 표층의 손실여부를 따져 놓은 것이므로 표층이 유실된 유역에서 발생빈도가 높게 나온 것으로 판단된다.

토양 모재란 토양이 생성됨에 있어 모재가 된 암석이나 지층을 말한다. 빈도 분석 결과 그림 23에 나타나 있듯이 산성암과 퇴적암의 빈도가 1이상으로 면적 비 보다 높은 빈도를 나타내 토석류 발생에 영향을 준다고 판단되고, 토양광물에 포함된 여러 가지 물질에 따라 토양의 특성이 크게 좌우되고 암석의 혼합물에 의해 영향이 있다고 추정된다.

표토토성은 흙의 표면에서부터 약 15cm 이하의 토양을 말

Fig 22. Debris-flow frequency of erosion class

Fig 23. Debris-flow frequency of parent material of soil

하며 점토, 모래, 미사의 함량에 따라 나타난 것을 말한다. 그림 24에 표현되어 있듯이 미사질양토의 빈도가 1이상으로 면적비 보다 높은 빈도를 나타냈고, 사양토와 식양토는 1이하로 면적 비 보다 낮은 빈도를 보였다. 따라서 미사질양토가 토석류 발생에 영향을 미칠 수 있다고 판단할 수 있었다. 미사질양토는 미사함량이 50% 이상이고 토양 중 미사함량이 80% 이상으로 강우에 의한 영향이 큰 토양이므로 토석류 발생에 영향을 미친다고 사료된다.

Fig 24. Debris-flow frequency of topsoil properties

4. 결 론

본 연구에서는 2006년부터 2011년까지 강원도 지역에서 발생한 토석류 피해 지역에 대해 2008년부터 2012년까지 5년간 현장조사를 실시하였다. 현장조사를 통해 구축한 자료와 주제를 이용해 토석류의 발생부, 유하부, 임상, 토양 등에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 지형특성은 128개소 유역, 주제도 특성은 115개소 유역을 바탕으로 단순 계수에 의한 방법과 면적을 고려한 빈도분석을 실시하였고, 결론은 다음과 같다.

첫째, 토석류의 발생부 평균 경사는 33.68° 이며, $25\sim40^\circ$ 사이의 빈도가 70% 이상을 차지하였다. 평균 폭은 15.57m이며 20m이상에서 가장 높은 빈도를 보였다. 평균 심도는 1.97m이며 대부분 3m 이내였고, 평균길이는 25.56m로 나타났다. 파괴형상은 평면파괴가 높은 빈도를 보였고, 경사향은 남동쪽이 가장 높지만, 일관성이 없어 위험인자로 판단하기에는 무리가 있다. 토석류의 발생부는 좁고 긴 형상을 가지고 있다고 판단된다.

둘째, 토석류 유하부의 평균 경사는 19.58° 이며 $10\sim15^\circ$ 사이의 빈도가 높았고, 평균 폭은 14.14m로 $5\sim10$ m의 빈도가 높았다. 평균 심도는 3.46m로 발생부 보다 깊은 심도를 보였으며, 유하거리 1000m 이상의 빈도가 가장 높았고 평균 값은 814m로 나타났다. 토석류 유하부는 흐름방향에 의해 증대된 토양의 영향으로 폭과 심도가 증가하는 것으로 사료된다. 5° 이하의 경사에서는 더 이상 진행하지 않고 퇴적된다고 추정할 수 있다.

셋째, 임상도로 추출한 임상분은 활엽수림 지역이 가장 많았으며 면적을 고려한 빈도 분석에서는 발생횟수가 2번째로 높았으나 면적비율이 가장 높아 1이하의 빈도를 보였다. 목장과 제지의 경우 발생면적과 횟수 모두 작아 1이상의 $3\sim4$ 정도의 빈도를 보였다. 경급은 대경목이 빈도 분석에서 많은 차이를 보여 영향을 미친다고 판단된다. 연관성을 보인 영급 또한 수령이 높을수록 높은 빈도를 보였는데, 이는 나무의 크기가 클수록 무게와 길이가 오히려 토석류 발생에 영향을 준다고 판단된다.

넷째, 배수등급의 면적을 고려한 빈도는 매우양호, 양호, 불량 빈도가 1보다 높은 값을 보여 영향을 줄 수 있다고 판단할 수 있었다. 유효토심의 빈도 분석에서는 얇은 토층 보다는 1m이내의 적당한 토층을 가지는 지역이 토석류 발생 조건에 더 부합된다고 판단된다. 심토토성의 사양질의 빈도가 1보다 높은 값을 보였고, 심토자갈의 분석은 빈도와 분포가 고르게 되어있어 경향을 파악하기에는 다소 무리가 있다고 판단된다. 토양모재에서 산성암과 퇴적암의 빈도가 1이상으로 토양광물

에 포함된 여러 가지 물질에 따라 토양의 특성이 좌우되기 때문이라 판단된다. 표토토성의 미사질양토의 빈도가 1이상으로 면적 비 보다 높은 빈도를 나타냈다. 토양 중 미사함량이 크고 점성이 작고 강우에 의한 액상화 현상으로 인하여 흙의 혼합비율에 따라 흐름특성이 달라지므로 토석류 발생에 영향을 미친다고 판단된다.

토석류의 발생원인 규명과 특성해석을 위해서는 철저한 현장조사가 반드시 수행되어야 하며, 현장조사를 기반으로 공학적인 특성을 고려한 여러 인자들과 상관관계 연구도 지속적으로 진행해야만 토석류 예측 모델 개발 및 위험도 평가 연구에 보다 효율적으로 진행할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-050979).

References

- Ikeya, H. (1989), Debris Flow and Its Countermeasures in Japan, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 40, pp. 15-33.
- Jun, K.W., Oh, C.Y., and Jun, B.H. (2011) Study on analyzing characteristics which causes a debris flow - focusing on the relation with slope and river -, *Journal of Safety and Crisis Management*, Vol. 7, No. 3, pp. 223-232.
- Kim, K.S., Kim, W.Y., Chae, B.G., Cho, Y.C., Lee, C.O., and Song, Y.S. (2006), Geometry of debris flow occurrence on natural slopes, *KSEG Conference*, Daejeon, Korea, pp. 51-59.
- Lee, M.S., Kim, K.S., Song, Y.S., and Ryu J.C. (2009) Analyzed change of soil characteristics by rainfall and vegetation, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 19, No. 1, pp. 33-41.
- 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 constuction, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 4, pp. 23-33.
- Ministry of Construction & Transportation (2006), *Typhoon and torrential rainfall hazard investigation in*

- Jul. 2006*, pp. 545–549.
- National Disaster Management Institute (2002), *Field investigation report of typhoon Rusa disaster in 2002*, pp. 3–8.
- National Disaster Management Institute (2003), *Field investigation report of typhoon Maemi disaster in 2003*, pp. 2–5.
- Okuda, S. and Suwa, H. (1984), Some relationships between debris flow motion and micro-topography for the Kamikamihori fan, North Japan Alps. In: Burt T. P. & Walling D. E (1984, eds.) - *Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology*. GeoBooks, Norwick, UK., pp. 447–464.
- VAW (1992), Murgange 1987: Dokumentation und Analyse. *Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, ETH, Zurich, NO. 97.6, p. 620(unpublished).
- Yoo, N.J., Cheon, S.H., and Park, N.S. (2008), Research for debris-flow and landslide characteristics in Gangwon, *Journal of Industrial Technology*, Vol.26, No. A, pp. 3–10.
- Yoo, N.J., Choi, Y.J., and Lee, C.J. (2009) Characteristic analysis of debris-flow using field investigation, *Journal of Industrial Technology*, Vol.29, No. A, pp. 135–143.
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., and Hunziker, G. (1997), *Murganggefahr und Klmaenderung: ein GIS-Basierter Ansatz*. vdf Hochschulverlag AG, ETH, Zurich, Schlussbericht NFP 31, p. 161.

(접수일 2013. 01. 21, 심사일 2013. 01. 23, 심사완료일 2013. 02. 20)