

항공사진과 GIS를 이용한 인제지역 산사태 분석

Analysis of Landslide in Inje Region Using Aerial Photograph and GIS

손정우* · 김경탁** · 이창헌*** · 최철웅****

Son, Jung Woo · Kim, Kyung Tak · Lee, Chang Hun · Choi, Chul Uong

要 旨

2006년 7월 중순 강원도 전역에 내린 집중호우로 인해 사상자 48명, 가옥 침수 1,248채에 이르는 인명·재산피해와 3조 5,125억 원에 이르는 피해 복구비용이 발생하였다. 강원도는 지역의 대부분이 산지로 산사태 지역에 대한 접근과 정확한 피해규모 추정에 어려움이 있다. 본 연구는 항공영상촬영 기술을 사용하여 보다 신속하고 정확하게 강원도 산사태 발생 지역 확인 및 특성을 분석하고자 한다.

본 연구를 수행하기 위해 산사태 발생 직후 PKNU 4호 시스템으로 산사태 지역을 촬영하였다. 촬영된 영상은 ERDAS 9.1을 이용하여 정사보정 후 육안판독에 의한 디지털화(Digitizing)으로 산사태 발생지역 1,054개소를 추출하였고, 이 지역에 대해 GIS 프로그램인 ArcGIS 9.2를 이용하여 수치지도, 임상도, 지질도, 토양도와의 중첩분석을 통해서 산사태발생지역에 대한 수문학적, 지형학적, 임상학적, 지질학적, 토양학적 현황과 특성을 DB로 구축, 산사태의 발생현황 및 특성을 분석하였다.

핵심용어 : 산사태, PKNU 4호, GIS, SPSS, 산사태 인자, 항공사진

Abstract

In mid-July, 2006 the torrential rainfall across Gangwon-do region caused 48 casualties and 1,248 houses submerged, resulting in damages with the restoration costs of 3 trillion and 512.5 billion won. This was because the topographic characteristics of Gangwon-do region for which mountainous areas mostly account increased the effects of landslide.

In this study, the landslide region was shot using the PKNU No.4 system immediately after the occurrence of landslide in order to analyze it as objectively, exactly, and rapidly as possible. 1,054 areas with landslide occurrence were extracted by digitizing the shot images through visual reading after orthometric correction using ERDAS 9.1. Using the Arc GIS 9.2, a GIS program, hydrologic, topographic, clinical, geologic, pedologic aspects and characteristics of the landslide region were established in database through overlay analysis of digital map, vegetation map, geologic map, and soil map, and the status and characteristics of the occurrence of the landslide were analyzed.

Keywords : Landslide, PKNU 4th, GIS, SPSS, Landslide factor, Aerial photograph

1. 서 론

산사태는 토양의 응집력을 약화시키는 강우나 지진과 같은 외력으로 토양이나 암석이 균형을 잃어 일시에 붕괴되는 현상을 말한다.

우리나라는 전 국토의 70%가 산지이고 하절기 집중

호우로 인해 빈번하게 산사태가 발생한다(조남춘 등, 2006). 특히 산사태에 취약한 산악 지형을 가진 강원도는 2002년 루사, 2003년 매미로 인한 집중호우로 토석류성 산사태가 연속적으로 발생했다. 이로 인한 피해지역과 규모가 클 뿐만 아니라 접근과 위험 정도의 판단이 어려워 잠재적 피해가 예상되었다.

2009년 4월 27일 접수, 2009년 5월 14일 채택

* 부경대학교 환경해양대학 위성정보과학과 석사과정(ijungwoo@naver.com)

** 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원(ktkim1@kict.re.kr)

*** 부경대학교 환경해양대학 위성정보과학과 박사과정(leechehe@hotmail.com)

**** 교신저자 · 정회원 · 부경대학교 환경해양대학 위성정보과학과 부교수(cuchoi@pknu.ac.kr)

2006년 7월 12~16일에 제3호 태풍 에위니아와 소멸된 제4호 태풍 빌리스의 수증기가 혼합되어 강원도 지역에 발생한 국지적 폭우가 내렸다. 특히 인제지역은 하루 최대강우량이 202.0mm 일일 누가강우량은 579.5mm에 달하는 기록적인 집중호우를 기록하였고, 이로 인해 인제, 평창, 횡성 등에서 대규모 산사태가 일어나(유병욱 등, 2006; 김경수 등, 2006) 사상자 48명, 가옥 침수 1,248채에 이르는 인명·재산피해와 3조 5,125억 원에 이르는 피해 복구비용이 발생했다.

이처럼 많은 피해를 발생시키는 산사태를 예방하기 위해서 산사태의 특성을 파악해야 한다. 전우현(2006)은 산사태의 원인을 강우로 판단하면서 최대지속강우량이 산사태에 미치는 연구를 수행하였고, 김경수 등(2005)은 산사태 모형을 제작하고 강우강도 변화에 따른 산사태 발생가능성에 관한 연구를 하였다. 그리고 지질·지반 조건에 따른 연구에서 산사태는 간극수압과 침투력에 의해 발생하는 것으로 연구되었으며(Montgomery, D. R. et al, 1997), 자연사면의 토층인 풍화암과 암편 등을 포함하는 미고결 물질을 통칭하는 것(Varnes, 1978)으로, 강우에 의해 증가된 간극수압은 토층의 유효응력을 줄이고 전단강도를 감소시킴으로써 결국 붕괴를 유발시킨다(Brand, 1981)는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 산사태 특성과 요인들을 분석하기 위해 GIS와 RS기법을 통해 많은 연구들이 진행되었다. 조남춘 등(2006)은 고해상도 항공사진과 GIS를 이용해 산사태의 위험인자를 분석하여 위험성을 검증하였고, 김경태 등(2005)는 GIS 및 RS기법을 이용해 산사태 영향인자 중 경사도, 경사향, 지질, 토지이용, 식생지수 등을 기초로 공간데이터베이스를 구축한 후, 매트릭스 방법을 이용해 6개 범주로 구분하였다. 차경섭(2006)은 산사태에 영향을 주는 인자들을 GIS에 결합하여 예측하고 검정을 위해 산사태 발생지와 비교 후 92% 정확도를 얻었다.

현재는 산사태 모니터링에 대한 연구가 진행되고 있다. 산사태 피해를 줄이기 위한 예방적 차원으로 박재국(2008)은 지상LiDAR, 정재훈(2008)은 InSAR 영상을 이용해 산사태 모니터링 기법을 연구하고 있으며, 김용균 등(2008)은 유비쿼터스 기반으로 토석류 산사태 모니터링 시스템을 개발하였다.

본 연구는 2006년 7월 12~16일에 발생한 강원도 인제의 산사태 지역을 대상으로 하였다. 먼저 PKNU 4호(부경대학교 위성정보과학과 원격탐사센터에서 개발한 항공사진 촬영용 탑재체) 시스템으로 산사태 지역을 촬영하여 고해상도 항공사진을 획득하고 이를 영상분석

프로그램인 ERDAS를 이용해 정사보정하였다. 그리고 육안관독으로 산사태지역을 발단부, 유하부, 퇴적부로 구분하여 디지털라이징(Digitizing) 후, GIS 프로그램인 ArcGIS를 이용하여 수치지도, 임상도, 지질도, 토양도와의 중첩분석을 통해서 산사태 발생지역에 대한 수문학적, 지형학적, 임상학적, 지질학적, 토양학적 현황과 특성을 DB로 구축하고, 산사태의 발생 현황 및 특성을 분석하였다.

2. 영상취득 및 공간자료 구축

2.1 연구범위

PKNU 4호 시스템을 이용한 항공촬영은 강원도 인제 산사태 발생 직후인 2006년 8월 2일 2회에 걸쳐 강원도 원주시와 인제시 일대의 산림지역을 촬영했으며, 그 결과 오전 353장, 오후 701장의 항공사진을 획득했다. 연구지역 및 항공 촬영 경로는 그림 1과 같다.

2.2 촬영시스템

본 연구에서 사용된 PKNU 4호 시스템은 센서부, 영상저장부, 관제부로 구성된다.

센서부는 Canon 800만 화소 DSLR 카메라와 렌즈액츄에이터를 겸·보정하여 상대적으로 왜곡이 가장 적은 20mm 렌즈를 사용해 방진방적기능이 있는 짐벌에 장착하였다.

영상저장부는 2대의 베이본 컴퓨터를 이용해 구성했으며, 센서에서 촬영되는 대용량의 영상을 저장하였다.

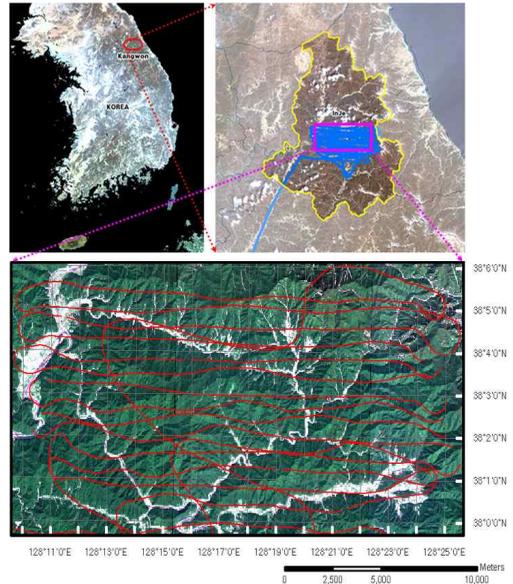


그림 1. 연구지역 & 항공 촬영 경로

관제부는 항공촬영시 자세정보를 제공하여 보다 정확한 항공사진 관독이 가능하도록 하기 위해 고정밀도의 자세 제어센서인 Pni사의 TCM3 Gyro와GPS, 그리고 카메라의 촬영 간격 및 상태를 관제하는 카메라 관제장치로 구성하였다.

2.3. 영상처리

촬영경로 및 영상처리를 위해 연구지역 인근에GPS 임시기준점을 설치하고, 국립 천문대 GPS 상시관측소의 대전 상시기준점을 이용해 기선 처리하였다. GPS 수신 데이터를 분석한 결과, 촬영 고도는 1~2.5km이고, 비행속도는 시속 235km/hr로 촬영하였다. 항공촬영 결과 1,054장의 영상을 획득하였다. GPS 데이터로부터 도출된 6개의 외부표정요소(x, y, z, ω, φ, κ)를 이용해 스트립을 구성 하였다.

정사보정은 획득한 영상 중 산사태 지역을 포함하고 있는 233장의 영상을 선별하여 처리했다. 선택된 영상은 1/5,000 수치지형도에서 획득된 GCP값을 이용하여 영상처리프로그램인 ERDAS 9.1을 이용해 처리하였다. 산사태는 광범위한 지역에서 발생하므로 개별영상으로는 분석할 수 없어 산사태가 일어난 지역을 중심으로 모자이크 처리를 하여 산사태 분포 특성을 확인하고 산사태 피해지역을 시각화 하였다.

3. 산사태 영역별 추출

본 연구는 산사태 발생 후 촬영한 항공영상을 이용해 현재 사용되는 토석류 조사야장(산림청) 분류방식인 발단부, 유하부, 퇴적부로 구분하여 산사태 지역을 추출하였다. 산사태 발생지역의 분류방식은 경사도 변곡점을 기준으로 발생지점 부터 첫 변곡점까지 영역을 발생부로, 첫 변곡점에서 두 번째 변곡점까지 영역을 유하부로, 두 번째 변곡점 이하를 퇴적부로 분류하였다.



그림 2. GPS/INS 연동 PKNU 4호 촬영시스템

표 1. 산사태 발달 단계별 추출 개소

구분	유효값		결측값		합계	
	N	%	N	%	N	%
발단부	708	100	0	0	708	100
유하부	281	100	0	0	281	100
퇴적부	254	100	0	0	254	100

항공사진에 의해 추출된 산사태 지역은 총 1,243(면적: 0.998km²)개소 중 발단부 708(면적: 0.114km²)개소, 유하부 281(면적: 0.585km²)개소, 퇴적부 254(면적: 0.299km²)개소이다(표 1). 산사태의 발달 단계별 면적은 발단부 146~178m²(평균: 162m²), 유하부 1,618~2,542m²(평균: 2,080m²), 퇴적부 973~1,383m²(평균: 1,178m²)이다(표 2).

3.1 지형학적 인자 특성분석

표 2는 산사태 발달 단계에 따른 지형학적 특성을 나타낸 것으로 면적에 따른 특성을 살펴보면 유하부가 가장 넓고, 발단부가 가장 좁다. 유하부에 비해 퇴적부의 면적이 작은 것은 산사태지역을 추출할 때 퇴적부 지역에 하천이 연결되어 기존의 하천부에 포함되는 부분을 제외하고 면적을 설정하였기 때문이다.

산사태 발생고도를 살펴보면 발단부 532~551m, 유하부 493~524m, 퇴적부 467~502m로 발단부가 가장 높고, 퇴적부가 가장 낮은 값으로 산출 되었다. 조용찬(2003)은 강릉지역 산사태 연구를 통해 해발고도 40~100m에서 발생함을 확인하였다. 이는, 일반적으로 산사태의 발생고도는 연구 지역의 특성에 따라 달라질 수 있을 것으로 사료된다.

경사도에 의한 특성을 살펴보면 발단부> 유하부> 퇴적부 순으로 경사도가 높게 나왔다. 본 연구 지역에서 발생한 대부분의 산사태는 18~27°인 것을 알 수 있었고, 35° 이상인 지역에서는 발생하지 않은 것으로 나타나 강원도 지역의 산사태 특성을 연구한 조용찬(2003)의 연구 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이것은 이천용(2002)과 이진덕(2002)은 경사도가 높을수록 산사태 위험도가 높다고 평가한 것과는 다소 상이한 결과를 보였다. 따라서 산림청 산사태 위험지도의 판정기준표에서 23° 이상인 지역을 산사태 위험도가 가장 높은 것으로 산정하는 것은 문제가 있는 것으로 사료된다.

산지의 경사향은 산지 사면의 일조시간과 밀접한 관련을 가지고 있으며, 토양 수분상태, 식생 및 풍화정도에 직접적인 영향을 미친다.

분석결과 발단부는 동, 동남, 남향으로 발생하였고,

표 2. 산사태 발달 단계별 지형학적 특성

구분	면적(m ²)			발생고도(m)			경사도(단위:도)			경사향(단위:도)		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
평균	162	2,080	1,178	541	509	484	26	24	19	186	186	168
95%하한	146	1,618	973	532	493	467	25	23	18	80	176	156
95%상한	178	2,542	1,383	551	524	502	27	25	20	193	196	180
5%절삭평균	13	1,411	923	543	509	483	26	24	19	188	187	168
중위수	108	713	573	555	529	497	26	25	19	187	184	173
분산	48,846	15,469,231	2,746,999	16,061	16,591	20,264	74	56	76	7,896	7,644	10,012
표준편차	221	3,933	1,657	126	128	142	9	7	9	89	87	100
최소값	6	12	44	250	254	202	-	-	-	-	-	-
최대값	3,994	35,419	12,277	854	819	847	58	42	40	355	345	345
범위	3,987	35,407	12,233	604	564	644	58	42	40	355	345	345
사분위수 범위	134	1,570	1,020	170	179	195	11	9	13	143	146	188

구분	면적(m ²)			발생고도(m)			경사도(단위:도)			경사향(단위:도)		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
분포형태												

유하부는 남향으로, 퇴적부는 동남, 남향으로 발생형태를 보여 산사태가 주로 남쪽방향으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러나 조용찬(2003)은 태풍 루사에 의한 강릉지역 산사태는 북향사면에서 주로 발생하고 남향사면의 발생량은 적었다. 현재 그 이유를 파악하기 어려워 향후 연구가 필요하다.

3.2 임상학적 인자 특성분석

기존의 연구는 주로 지질, 토양, 강우를 중심으로 연구하였고, 산림관련 연구자만이 임상학적 인자에 대한 고찰이 있었다. 그러나 본 연구에서 특정 수종 및 수령 지역에 집중적으로 산사태가 발생하는 것으로 분석되어 임상학적 인자에 대한 고찰을 하였다. 본 연구에 사용된 수종구분 및 정의는 표 3과 같다.

임상도를 이용한 산사태와 수목과의 분석결과 표 4와 그림 3, 4에서 발단부와 유하부에서 소나무림이, 퇴적부는 임상이 없는 지역이 가장 높게 나타나, 연구지역은 발단부와 유하부의 상대적 기반지력이 낮은 소나무림 지역에서 산사태가 발생하여 계곡을 따라 유하한 후 산림이 없는 하천변으로 이동한 것으로 판단된다.

차경섭(2006)은 지리정보시스템을 이용한 산사태 위험지 예측에 관한 연구에서 식생은 산사태 억제효과를 촉진한다고 하였으나, 실제 산사태 발생지역은 침엽수(소나무림)에서 집중적으로 발생한 것으로 보아 그의 주장과 다소 다르게 나타났다. 이천용(2002)은 산사태 위험지도 작성기법 개발에서 침엽수, 침엽혼합림을 위

표 3. 임상 분류 기준표

변환 코드	구분	내용
1	침엽혼합림	침엽수, 활엽수의 수관 점유면적 또는 임목본수 각각 비율 5~75%
2	제지	도로, 암석지, 묘지, 군사시설 등 임목육성에 쓰이지 않는 지역
3	활엽수림	활엽수의 수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상
4	소나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분
5	경작지	과수원 기타 농경지 묘포장 등이 임지 내에 있는 농용지역
6	낙엽송림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분
7	잣나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분
8	포푸라림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분
9	소나무인공림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분
10	활엽인공림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분
11	목장	초지
12	임상없음	하천, 해양 등 임상 속성 값을 입력할 수 없는 지역
13	미림목지	지피(잡초, 선태류)의 총 피복도가 50% 이상인 임지
14	침엽수림	침엽수의 수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상
15	밤나무림	수관 점유면적 또는 임목본수 비율이 75% 이상인 임분

험도가 가장 높은 지역으로 선정하였고, 본 연구결과도 소나무를 비롯한 침엽수림 지역이 산사태에 취약하다는 것이 확인되어 동일한 결과를 얻었다.

임상도의 경급 속성을 이용한 산사태 지역의 특징 분석 결과(표 5, 그림 5), 발단부에서 퇴적부로 진행될수록 산림의 흉고직경이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 특히 발단부와 유하부에 비해 퇴적부의 흉고 직경이 현저히 줄었다. 즉 산사태 발생지역은 대경목, 중경목에서 발생 하여 중경목, 소경목 지역을 따라 유하한 후 소경목 혹은 나무가 없는 지역에 퇴적되는 것으로 판단된다.

표 4. 산사태 발생 단계별 임상 면적

(단위 : m²)

변환 코드	구 분	발단부		유하부		퇴적부	
		3차	4차	3차	4차	3차	4차
1	침활 혼효림	16,376	21,323	84,937	68,795	11,886	26,499
2	제지	91	177	164	164	765	6,938
4	소나무	71,004	71,895	242,838	273,247	81,150	72,436
5	경작지	2,105	47	8,100	435	68,619	6,406
6	낙엽송	8,285	8,752	64,674	58,686	22,899	22,819
7	갯나무	10,077	9,401	154,804	152,285	27,733	30,925
9	소나무 인공림	609	735	21,839	21,839	2,366	2,366
11	초지	462	462	-	-	4,280	4,280
12	임상 없음	5,985	2,202	7,221	9,126	79,645	126,675

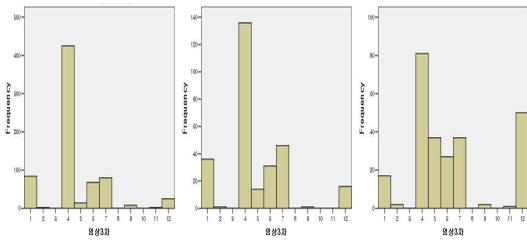


그림 3. 산사태 발생 단계별 임상특성 3차 임상도

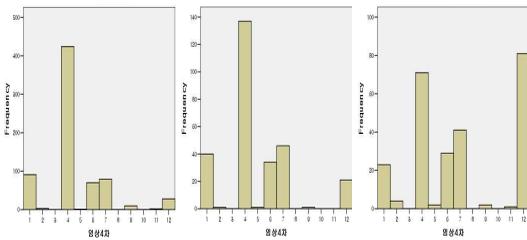


그림 4. 산사태 발생 단계별 임상특성 4차 임상도

표 5. 산사태 발생 단계별 경급 분포

구분	3차 임상도			4차 임상도		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
평균	2.01	1.77	1.16	2.15	2.02	1.32
95% 하한	1.94	1.66	1.03	2.08	1.91	1.18
95% 상한	2.07	1.88	1.29	2.22	2.14	1.46
5% 절삭평균	2.01	1.78	1.12	2.17	2.05	1.29
중위수	2.00	2.00	1.00	2.00	2.00	1.00
분 산	0.83	0.91	1.12	0.87	0.90	1.30
표준편차	0.91	0.96	1.06	0.93	0.95	1.14
최소값	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
최대값	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
범 위	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
사분위수 범위	1.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00

* 분석을 용이하게 하기 위해 경급 속성이 없는 곳은 0, 0경급(치수)은 1, 1경급(소경목)은 2, 2경급(중경목)은 3, 3경급(대경목)은 4로 변환했음

표 6. 산사태 발생 단계별 영급 분포

구분	3차 임상도			4차 임상도		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
평균	2.58	2.27	1.47	3.50	3.20	2.01
95% 하한	2.49	2.11	1.28	3.40	3.03	1.80
95% 상한	2.68	2.44	1.65	3.60	3.37	2.22
5% 절삭평균	2.59	2.26	1.38	3.56	3.25	1.95
중위수	3.00	2.00	1.00	4.00	4.00	2.00
분 산	1.77	1.96	2.22	1.84	2.11	2.97
표준편차	1.33	1.40	1.49	1.36	1.45	1.72
최소값	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
최대값	5.00	5.00	5.00	6.00	6.00	6.00
범 위	5.00	5.00	5.00	6.00	6.00	6.00
사분위수 범위	2.00	2.00	3.00	1.00	2.00	4.00

* 분석을 용이하게 하기 위해 영급 속성이 없는 곳은 1, 1영급은 2, 2영급은 3, 3영급은 4, 5영급은 6, 6영급은 7로 변환했음

임상도 영급 속성 산사태 단계별 분석결과(표 6, 그림 6), 경급 속성과 동일하게 발단부에서 퇴적부로 갈수록 영급이 감소하는 결과를 나타냈다. 이것은 광재하(1994)가 항공사진 판독에 의한 부산지역의 산사태에 관한 연구를 수행한 결과 20년생 소나무지역에서 산사태가 많이 발생한 것과 유사한 결과를 보였다. 또한 산사태 발단부가 유하부와 퇴적부 보다 수령이 많았고 퇴적부가 가장 수령이 작았다. 3차와 4차 임상도에서 영

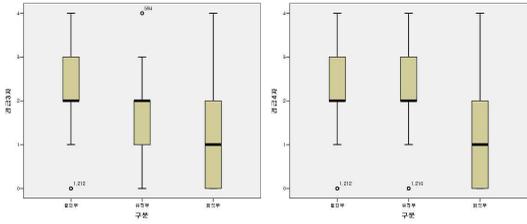


그림 5. 산사태 발생 단계별 경급 특성(3차, 4차 임상도)

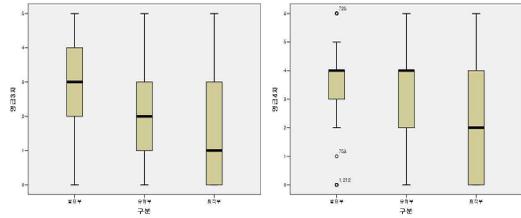


그림 6. 산사태 발생 단계별 영급 특성(3차, 4차 임상도)

급차이를 보이는 것은 3차임상도가 4차 임상도보다 약 10년 차이를 보여 발생한 것으로 판단된다.

3.3 토양학적 인자 특성 분석

토양학적 인자 특성을 분석하기 위해 정밀토양도와 산사태 발생지역을 중첩 분석하였다.

그 결과 SmF2가 발단부, 유하부의 약 70%를 차지하고 있어 토양특성이 산사태와의 밀접한 관계가 있다는

표 7. 정밀토양도의 토양통 분포

(단위: m²)

변환 코드	표준 코드	전체면	발단부	유하부	퇴적부	산사태 합계
16	SmF2	19,376,536	76,530	398,056	47,149	521,736
18	SNF2	6,680,745	570	2,453	1,923	4,947
13	SgE2	5,714,922	10,868	44,611	44,048	99,528
22	SRF2	4,905,752	4,424	22,941	3,578	30,943
8	OdF	4,373,653	14,574	38,597	5,657	58,828
19	SqC	2,403,769	2,590	12,876	33,276	48,742
21	SqE	1,758,647	257	-	5,387	5,645
3	DpF2	1,135,653	237	380	-	617
10	RC	1,100,746	18	-	4,020	4,039
5	JoC	1,073,801	1,261	24,710	50,145	76,117
24	UBC	938,429	755	17,616	27,377	45,749
17	SNE2	884,241	910	11,254	1,874	14,039
20	SqD	882,104	47	98	11,699	11,845
23	StC	732,386	402	3,920	4,434	8,757

것을 알 수 있었다. 또한 JoC 경우에도 전체면적의 약 1%를 차지하고 있지만 퇴적부에서는 약 16%로 SmF2의 퇴적부에서 차지하는 면적 15% 보다 많아 퇴적지역의 특성이 있다고 사료된다(표 7).

토성 분류에 따라 산사태 특성을 분석한 결과, 사양토 지역이 전체 면적의 80%를 차지했고, 산사태 발생도 빈번히 일어남을 확인하였다. 양토는 전체 면적의 15%를 구성하고 있으며, 퇴적부에서 가장 높은 10%를 차지하고 있었다(표 8).

토심은 산림청 산사태 위험지도에서 7개의 산사태 발생인자 중 하나이며, 이천용(2002)과 한국지질자원연구소(2002)에서 산사태를 발생 인자의 하나로 토심도를 이용한 연구를 수행했다.

산사태 단계별 토심특성 분석 결과, 전 지역에서 보통(60~100mm)을 보여 산사태가 보통 유효토심에 발생하고 퇴적되는 것으로 나타났다.

표 8. 정밀토양도의 토성별 분포

(단위: m²)

변환 코드	표준 코드	토성	전체면적	발단부	유하부	퇴적부
1	SL	사양토	50,485,411	98,786	523,700	253,514
2	L	양토	9,574,043	16,211	60,880	45,834
3	SiL	미사질 양토	331,991	-	-	-
4	SiCL	미사질 식양토	-	-	-	-
5	LS	양질 세사토	71,451	-	-	-
6	CL	식양토	-	-	-	-
7	C	물	2,630,079	-	-	-

표 9. 유효토심 속성의 통계 결과

구분	발단부	유하부	퇴적부
평균	1.88	1.92	1.83
95% 하한	1.85	1.86	1.75
95% 상한	1.91	1.97	1.91
5% 절삭평균	1.90	1.91	1.81
중위수	2.00	2.00	2.00
분산	0.15	0.22	0.40
표준편차	0.39	0.47	0.64
최소값	0.00	0.00	1.00
최대값	3.00	3.00	3.00
범위	3.00	3.00	2.00
사분위수 범위	0.00	0.00	1.00
왜도	1.25	0.49	0.16
첨도	2.99	2.18	0.60

표 10. 유효토심 구분

변환코드	유효토심(mm)	토심분류
0	< 20	매우 얇음
1	20~50	얇음
2	50~100	보통
3	> 100	깊음

산림청 산사태 위험도 산정에서 유효토심 100mm 이상 구역에서 위험도 높게 산정하고 낮을수록 위험도가 낮게 산정되었다. 본 연구에서 유효토심이 깊은 지역과 낮은 지역은 산사태가 발생하지 않았다. 이는 낮은 지역은 표토직하부가 암반으로 형성되어 암반지역과 동일한 특성을 보이는 것으로 사료된다. 그러나 유효토심이 깊은 곳에서 산사태발생여부에 대해 향후 보다 많은 자료분석이 요구된다(표 9, 표 10).

3.4 지질학적 인자 특성 분석

본 연구지역은 1/25,000 지질도가 없어 1/50,000 지질도를 이용하여 지질학적 인자 특성을 분석했다. 그 결과 시대 명에 있어서는 발달부, 유하부, 퇴적부 모두 쥘라기가 대부분이고, 암석명은 발달부, 유하부, 퇴적부 모두 화강암이 대부분이다. 그러나 채병근(2002)과 송영석(2007)은 퇴적암지역에서 산사태 발생가능성이 화강암지역 보다 상대적으로 높다는 결과를 보였다. 그러므로 향후, 다양한 암석이 존재하는 지역에서 자료를 보완할 필요가 있을 것으로 사료된다(표 11, 표 12).

표 11. 변환코드에 따른 지질도의 속성

변환 코드	시대명		암석명
	속성값	설 명	속성값
1	PCEkbg	선캄브리아기	호상편마암
2	Jgr	쥘라기	화강암

표 12. 지질도 속성의 산사태 통계 분석 결과

구분	시대명			암석명5		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
평균	1.99	1.99	1.96	1.99	1.99	1.96
95% 하한	1.98	1.97	1.94	1.98	1.97	1.94
95% 상한	2.00	2.00	1.98	2.00	2.00	1.98
5% 절삭평균	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
중위수	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
분 산	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.04
표준편차	0.11	0.12	0.20	0.11	0.12	0.20
최소값	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
최대값	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
범 위	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
사분위수범위	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3.5 수문학적 인자 특성 분석

산사태의 수문학적 특성인자는 흐름장(Flow length), 유역면적(Watershed), Horton 차수가 있다. 흐름장이란 물이 흘러간 길이를 말하며, 유역면적은 임의의 한 점으로 물이 흘러나오는 범위를 뜻한다. Horton 차수는 흐르는 물의 지류가 모인 정도를 나타낸다.

표 13. 산사태 발달 단계별 흐름장의 기술통계

구분	흐름장(단위:m)			유역면적(단위:m ²)			HORTON 차수		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
평균	118	406	1,234	537	6,344	99,528	1.35	1.75	2.27
95% 하한	102	336	802	217	3,373	23,713	0.99	1.51	2.01
95% 상한	133	476	1,666	856	9,315	175,342	1.71	1.99	2.53
5% 절삭평균	85	313	661	56	2,185	12,128	1.28	1.70	2.19
중위수	68	167	259	15	85	327	1.00	2.00	2.00
표준편차	204	595	3,493	4,325	25,301	613,536	0.70	0.81	1.15
최소값	0	25	0	0	5	0	1.00	1.00	1.00
최대값	2,482	4,216	34,204	73,562	336,875	668,322	3.00	4.00	6.00
범 위	2,482	4,191	34,204	73,562	336,870	668,322	2.00	3.00	5.00
사분위수범위	77	300	882	32	1,448	8,129	0.50	1.00	2.00

구분	흐름장(단위:m)			유역면적(단위:m ²)			HORTON 차수		
	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부	발단부	유하부	퇴적부
분포 특성									

흐름장 길이 분석 결과 발단부 102~133(평균 118)m, 유하부 336~476(평균 406)m, 퇴적부 802~1,666(평균 1,234)m 로 확인되었고, 흐름장의 경우 산사태 발생 후 발단부에서 유하부를 거쳐 퇴적부로 갈수록 길어지는 것을 알 수 있었다.

유역면적을 분석한 결과 발단부 0.21~0.85(평균 0.53)km², 유하부 3.37~9.31(평균 6.34)km², 퇴적부 23.71~175.34(평균 99.52)km²로 확인되었다.

Horton 차수 분석 결과 발단부 0.99~1.71(평균 1.35)회, 유하부 1.51~1.99(평균 1.75)회, 퇴적부 2.01~2.53(평균 2.27)회 발생해 발단부에서 유하부를 거쳐 퇴적부로 갈수록 Horton 차수가 더해진다는 것을 알 수 있었다(표 13).

4. 결 론

본 연구는 지형학적, 임상학적, 토양학적, 지질학적, 수문학적 분석을 하였다.

첫째, 지형학적 분석결과 면적은 발단부 146~178m², 유하부 1,618~2,542m², 퇴적부 973~1,383m² 순으로 유하부의 경우 면적이 가장 넓었다. 고도는 발단부 532~551m, 유하부 493~524m, 퇴적부 467~502m이었다. 경사도는 발단부 25.28~26.55°, 유하부 23.22~24.98°, 퇴적부 17.61~19.77°이고 발단부에서 퇴적부로 전개될수록 경사도는 낮아졌다. 경사방향은 발단부 동, 남동, 남향이고, 유하부는 남향이며, 퇴적부는 남동, 남향으로 주로 남향으로 산사태가 발생하였다. 하지만 선행연구의 결과와 달라 이에 대한 연구가 필요하다.

둘째, 임상학적 분석결과 3차 임상도는 4차 임상도와 비교하여 침활혼효립 28%, 소나무립 -38%, 활엽수립 42%의 증가가 있었다. 수종은 발단부가 소나무립 62.52%, 침활혼효립 18.54%, 유하부가 소나무립 46.71%, 잣나무립 26.05%, 퇴적부가 임상없음 42.32%, 소나무립 24.20% 이었다. 경급은 발단부와 유하부 중경목(18~28cm)이고 퇴적부 소경목(6~16cm)이었다. 영급은 발단부 21~30년생, 유하부 21~30년생, 퇴적부 11~20년생이었다. 즉, 산사태는 주로 21~30년생 중경목 침엽수림에서 발생 유하하여 11~20년생 소경목 혹은 무림지역에 퇴적되었다.

셋째, 토양학적 분석결과 토양통은 발단부에서 SmF2 66.55%, SgE2 9.45%, 유하부 SmF2 68.09%, SgE2 7.63%, 퇴적부 SmF2 15.75%, SgE2 14.71%이었다. 표토 특성은 발단부 사양토 85.90%, 양토 14.1%, 유하부 사양토 89.59%, 양토 10.41%, 퇴적부 84.69%, 양토 15.31% 확인하였다. 유효 토심은 발단부, 유하부는

보통, 퇴적부는 전체적으로 보통, 일부 지역 얇음이었다.

넷째, 지질학적 분석결과 암석 생성시기는 발단부, 유하부, 퇴적부 모두 쥐라기이며 암석명은 발단부, 유하부, 퇴적부 모두 화강암이 대부분으로 평가 되었다. 그러나, 퇴적암, 편마암지역이 없어 향후 비교연구가 필요하다.

다섯째, 수문학적 분석결과에 따르면 흐름장 길이는 발단부 102~133m, 유하부 336~476m, 퇴적부 802~1,666m이었다. 유역면적은 발단부 0.21~0.85km², 유하부 3.37~9.31km², 퇴적부 23.71~175.34km²이었다. Horton 차수 분석 결과 발단부 0.99~1.71차 하천, 유하부 1.51~1.92차 하천, 퇴적부 2.01~2.53차 하천에서 발생하였다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 부경대학교 연구년 교수 지원 사업에 의하여 연구되었습니다(PS-2006-032).

참고문헌

1. 광재하, 1994, 항공사진의 지형공간정보를 이용한 산사태 위험예측 기법, 석사학위논문, 부산대학교, pp.12-35.
2. 김경수, 김원영, 채병곤, 송영석, 조용찬, 2005, "강우에 의해 발생한 자연사면 산사태 지질공학적 분석", *한국지질공학회*, 제15권, 2호, pp.105-121.
3. 김경수, 송영석, 조용찬, 김원영, 정교철, 2006, "지질조건에 따른 강우와 산사태의 특성 분석", *대한지질공학회*, 제16권, 2호, pp.201-224.
4. 김경태, 정성관, 박정훈, 오정학, 2005, "GIS 및 RS기법을 활용한 산사태 취약성 평가", *한국지리정보학회지*, 제8권, 1호, pp.75-87.
5. 김용균, 안대영, 강대우, 한병원, 2008, "유비쿼터스 기반 토석류 산사태 모니터링 시스템 개발에 관한 연구", *대한지질공학회*, 제18권, 4호, pp.511-522.
6. 박재국, 2008, "산사태 모니터링을 위한 지상라이다 자료의 정확도 평가", *한국측량학회지*, 제26권, 2호, pp.117-127.
7. 송영석, 홍원표, 2007, "퇴적암 지역에서의 산사태 원인 및 특성분석에 대한 사례연구", *대한지질공학회*, 제17권, 1호, pp.101-113.
8. 유병욱, 송평현, 정찬규, 2006, "2006 강원 인제, 영양, 평창지역 토석류 발생사례분석", *2006 가을 학술대회논문집*, 한국지반공학회, pp.615-625.
9. 이진덕, 연상호, 김성길, 이호찬, 2002, "산사태의 발생

- 가능지 예측을 위한 GIS의 적용”, *한국 지리정보학회지*, 제5권, 1호, pp.38-47.
10. 이천용, 최경, 이종학, 이창우, 2002, “GIS를 이용한 산사태 위험지도 작성기법 개발”, *산림 과학논문집*, 제65권, pp.1-10.
 11. 전우현, 2006, “GIS를 이용한 최대지속 강우량이 산사태 발생에 미치는 영향평가”, *2006년 춘계학술대회*, 한국지형공간정보학회, pp.413-414.
 12. 정재훈, 김상민, 김정환, 손홍규, 2008, “InSAR Coherence 영상을 이용한 산사태 탐측”, *2008년 춘계학술대회*, 한국지형공간 정보학회, pp.301- 305.
 13. 조남춘, 최철웅, 전성우, 한경수, 2006, “RS와 GIS기법을 이용한 산사태 위험성의 검증”, *한국지리정보학회지*, 제9권, 2호, pp.54-66.
 14. 조용찬, 김경수, 이춘오, 채병곤, 김원영, 2003, “태풍 ‘루사’에 의해 발생한 강릉지역 산사태의 특징”, 2003년 춘계 학술대회논문집, *대한지질공학회*, pp.21-25.
 15. 차경섭, 2006, “역학적 기법과 지리정보 시스템을 이용한 산사태 위험지 예측”, *건축도시연구정보센터*, pp.27-38.
 16. 채병곤, 김원영, 김경수, 조용찬, 2002, “퇴적암지역 산사태의 발생특성 분석”, *2002 학술대회 논문집*, 대한지질공학회, pp.33-39.
 17. 한국지질자원연구원, 2002, “GIS와 원격탐사 기술을 이용한 산사태 위험분석 적용기술 개발”, 과학기술부 (KR-05-(T)-02), pp.3-6.
 18. Brand, E. W., 1981, “Some Thoughts on Rainfall-Induced Slope Failures”, *International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering*, pp.373-376.
 19. Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T., Loague, K., 1997, “Hydrologic Response of a Steep, Uachanneled Valley to Natural and Applied Rainfall”, *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 1, pp.91-109.
 20. Varnes, D. J., “Slope Movement Types and Processes, Landslides Analysis and Control”, Special Report, *Transportation Research Board*, Washington, DC, pp.11-80.