

집중호우시 산사태 원인분석에 관한 사례연구

A Case Study of Landslides due to Heavy Rainfall

유 남 재* 박 병 수**
Yoo, Nam-Jae Park, Byung-Soo

ABSTRACT

This study is a research result of investigating causes of landslides occurred at Uijongbu in Kyonggi Province, Korea. For works of this research, informations and data about landslides occurred at the site, geological and topographical informations were collected to analyze causes of landslides, and mapping landslides was performed by using results of field investigation. Data about rainfall during occurrence of landslides around Uijongbu was also used to find the effect of intense rainfall on occurrence of landslides.

Based on informations obtained from field investigation and collected data, the scale and the pattern of landslides were analyzed and influencing factors on landslide such as intensity and duration of rainfall, topography, geologic condition, geotechnical engineering properties of ground, forestry were investigated statistically to find causes of landslides.

On the other hands, for geotechnical engineering respects, slope stability analysis was performed for the typical sites chosen from the sites where the landslides occurred, using informations obtained from detailed topographical survey with total stations, field reconnaissance and results from laboratory tests.

키워드 : 산사태, 사면안정, 집중호우, 의정부

Keywords : *Landslide, Slope Stability, Heavy Rainfall, Uijongbu*

1. 서 론

산사태는 산악지역이 많은 국가인 브라질, 캐나다, 칠레, 홍콩, 이란, 이탈리아, 일본, 한국, 노르웨이, 멕시코, 파나마, 스위스, 유고슬라비아 등에서 자주 발생한다. 우리나라의 경우에는 해마다 하절기에 찾아오는 집중호우로 인해 많은 산사태가 발생하여 많은 인명과 재산상의 피해를 입고 있다.

우리나라의 산사태는 대부분 집중호우에 의하여 발생하는데 특히, 1998년에는 엘니뇨의 영향으로 국

지적인 집중호우가 전국에 걸쳐 내려 강우시 자연 사면이 갑자기 붕괴되는 산사태와 더불어 국토개발의 영향으로 형성된 절개사면과 축대에서 많은 붕괴사고가 발생하였다. 이러한 절개사면과 축대의 붕괴는 자연사면에서 발생하는 산사태에 비하여 인적, 물적 관점에서 훨씬 심각한 피해를 주고 있다. 앞에서 우리나라 산사태 발생 원인에 대하여 전반적으로 살펴보았지만 근본적으로 산사태의 발생은 예측하기 매우 어려운 기상 이변(호우)과 그 지역의 자연 지반조건이 복합적으로 작용하여 발생하기 때문에 이에 대한 예측과 대책을 강구하기 위해서는 많은 산사태 발생 사례에 대한 면밀한 연구와 자료의 축적이 요구된다.

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

**** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

따라서, 본 연구에서는 1998년 8월 5일부터 8월 12일 사이에 산사태가 집중적으로 발생한 의정부 지역을

연구 대상 지역으로 선정하여 산사태 발생지역의 지형 특성, 지질 및 토질 특성, 임상특성 등을 관련문헌과 현지조사 결과를 바탕으로 조사 분석하고 당시의 기상 자료를 토대로 강우특성을 분석하여 산사태 발생 원인을 규명하였으며 산사태 발생에 영향을 미치는 환경인자와의 관계를 분석하였다.

2. 조사내용 및 조사결과

2.1 산사태 발생현황

의정부 지역에서는 1998년 8월 5일부터 12일 사이에 내린 집중호우로 인한 홍수피해는 사망 및 실종 17명, 재산피해액 362억 6천 5백여만원의 엄청난 재해가 발생했다. 이중 산사태로 인한 피해는 의정부시 전체 14개동중 10개동에서 184개소의 산사태가 발생하고 31.46ha의 피해면적과 4명(사망 3명 실종 1명)의 인명피해 그리고 14억 6천여만원의 재산피해를 가져왔다. 의정부시 수해백서, '수해조사 보고서' 및 '지역주민들의 증언'에 의하면 98년 8월 6일 새벽 3-5시 사이에 대부분의 사태가 발생된 것으로 확인되었다. 산사태 발생면적 및 피해금액은 가능동, 의정부동, 호원동, 신곡동, 자일동, 녹양동, 용현동, 고산동, 민락동, 금오동 순으로 각각 [그림 1] 및 [그림 2]에 도시하였다.

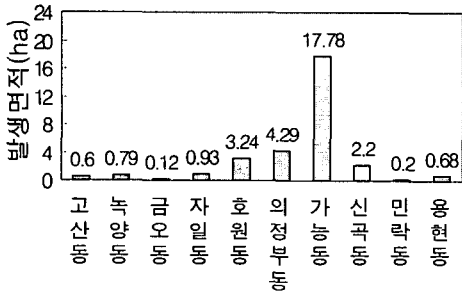


그림 1 각 동별 산사태 발생면적

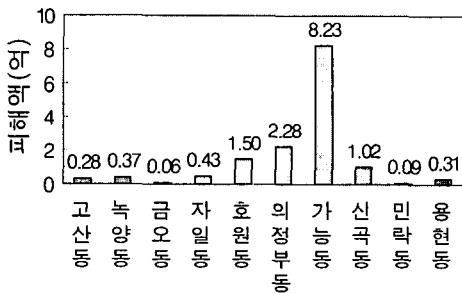


그림 2 각 동별 산사태 피해액

2.2 조사내용

2.2.1 산사태지 기록조사

'98년 집중호우 기간 중에 발생된 산사태 발생현황 및 발생원인을 분석하기 위하여 의정부시 방재담당자, 지역주민, '의정부시 수해백서', '수해조사보고서' 및 신문 등에 의하여 사전에 사태위치 및 사태발생 개소수를 파악하였다.

따라서, 본 연구에서는 산사태가 발생된 전지역을 조사 대상으로 삼았으나 주로 가능 1동 입석마을, 가능 3동의 안골계곡, 시청 I/C 부근의 사패산, 호원동 원도봉산 유원지, 약수선원, 회룡천 계곡, 호암사 계곡, 신곡동, 용현동 등을 집중적으로 조사하였다. <표 1>은 의정부시 14개동중 사태가 발생한 10개동에 대한 산사태 발생 개소수와 현장 조사 개소수를 기록하였다.

표 1 산사태 발생 개소수 및 조사 개소수 현황

동명	의정부동	호원동	가능동	녹양동	금오동	용현동	신곡동	고산동	민락동	자일동	계
산사태 개소수	5	38	82	11	1	9	30	2	3	3	184
현장 조사 개소수	5	35	70	10	1	9	30	2	3	3	168

2.2.2 강우특성

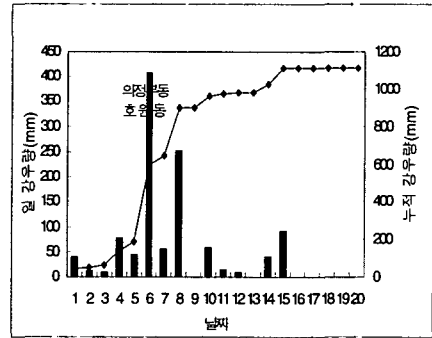
1998년 8월의 우리나라 기상은 북태평양 고기압 연변에 위치하여 대기가 불안정한 가운데 중국 양쯔강 상류에서 발생한 저기압의 통과와 전선의 발달로 의정부시에도 엄청난 집중호우가 발생하였다. 이같은 집중호우로 인해 8월 한달동안 내린 강우량은 980mm(의정부 T/M 관측소 기준)로 연 평균강우량(1278.8mm)의 77%, 8월 평균 강우량의 3배에 달하는 기록적인 집중호우가 의정부 전역에 걸쳐 쏟아졌다.

<표 2>는 재현기간별 강우지속기간별 확률강우량(의정부 T/M 관측자료)으로 평균적으로 시우량은 200년 빈도, 일강우량은 100년 빈도의 강우가 내렸다. 그러나, 국지적으로 최대시우량 100mm 이상으로 2시간 연속해서 내린 지역도 있으며, 이는 2시간 강우로는 1,000년 빈도의 강우에 해당된다.

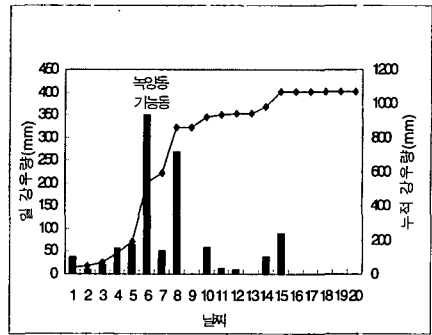
표 2 의정부 T/M 관측소의 재현기간별 지속
기간별 확률 강우량(98년 자료제외)

재현 기간 (년)	지속 기간		
	1시간(mm)	2시간(mm)	24시간(mm)
2	35.9	52.1	139.2
5	51.1	74.3	198.9
10	61.3	89.0	238.5
20	71.0	103.1	276.4
50	83.5	121.4	325.5
100	92.9	135.0	362.3
200	102.3	148.7	398.9
1000	124.1	180.2	483.8

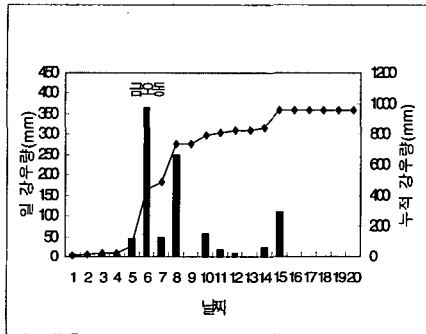
<그림 3>은 의정부시에 위치한 4개 강우 관측소 (의정부 T/M, 시청, 녹양동, 송산동)에서 측정된 8월 1일-20일 사이의 일강우량 및 누적 강우량을 나타낸 것으로 최대 일우량은 모든 관측소 공히 산사태 발생 당일인 8월 6일에 최고치를 기록하였으며, 그 값은 약 300mm 이상으로, 이는 1965년 이후 의정부 지역내의 강우관측소에서 측정된 강우량 중 처음 있는 일이었다. 누적강우량 곡선을 보면 8월 5~6일 사이에 급격히 증가하는 경향을 볼 수 있다.



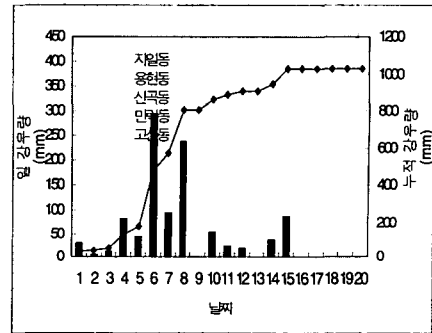
(b) 시청 관측소



(c) 녹양동 관측소



(a) 의정부 T/M 관측소

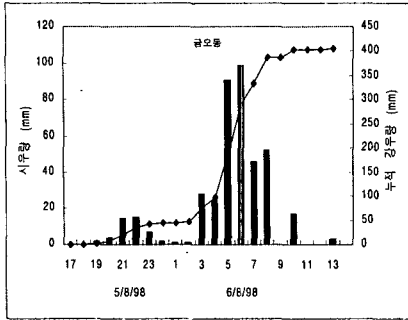


(d) 송산동 관측소

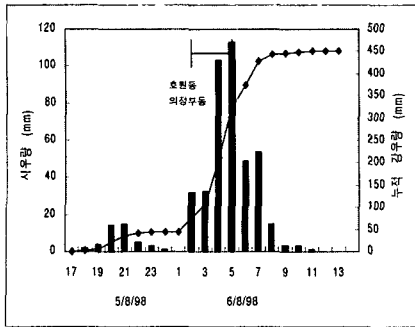
그림 3 각 관측소별 8월의 일강우량 및 누적강우량(98. 8.1~8.20)

산사태 발생 당일인 8월 6일 전후에 내린 강우량을 좀더 자세히 살펴보면, 8월 5일 17시부터 6일 13시 까지 21시간 동안 의정부 전역에 걸쳐 내린 강우량은 의정부 T/M 관측소 406mm, 시청 450mm, 녹양동 404mm, 송산동 340mm로 강우량이 지역에 따라 매우 큰 편차(약 110mm 정도)를 보임을 알 수 있다. [그림 4]는 이 기간동안의 시우량 및 누적 강우량을 나타낸다. 최대 시우량은 의정부 T/M 관측

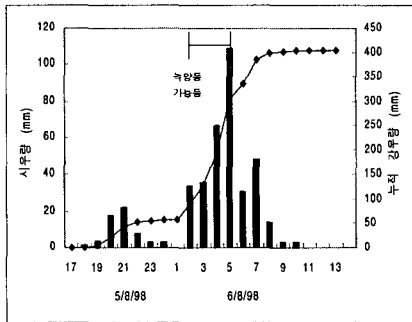
소의 경우 8월 6일 06시에, 그 이외의 관측소에서는 8월 6일 05시에 기록되었는데, 이 최대 시우량 역시 의정부 강우 관측소가 생긴 이래 역대 최고치임을 보여준다. 8월 5일 17시를 시점으로 하여 산정된 누적 강우량은 최대 시우량을 나타내기 2시간 전부터 급격히 증가하였으며, 이 시간동안 대부분의 산사태가 발생하였던 것으로 알려져 있다.



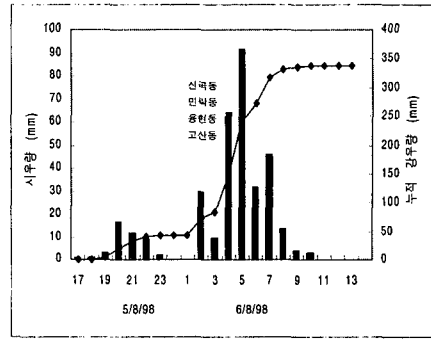
(a) 의정부 T/M 관측소



(b) 시청 관측소



(c) 녹양동 관측소



(d) 송산동 관측소

그림 4 사태 발생 전후의 시우량 및 누적강우량

2.2.3 현지조사

현지조사에서는 산사태 규모, 사태면의 경사 및 경사방향, 산사태 지역의 지질 및 토질, 임상, 토사 유출량 및 토석류의 하천 유입 경로 등에 초점을 맞춰 조사하였다. 또한 산사태 발생지역의 토질특성 파악을 위해 현장시료를 채취하여 비중, 액소성, 입도분석 시험 등을 실시하였다.

2.3 조사결과

2.3.1 산사태 흔적도 작성

'98년 의정부시에서 발생한 산사태지에 대한 전반적인 현황파악을 위해 기파악된 자료 및 10여 차례에 걸친 현지조사를 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 각 동별 산사태 발생 흔적도를 1:5,000 지형도에 작성하여 [그림 5]에 도시하였다. 특히, 가능동의 입석마을, 안골계곡 그리고 호원동의 호암사 계곡, 회룡사 계곡, 원도봉산 유원지 계곡 등에 대해서는 산사태지와 인근 수계를 함께 나타내었다.

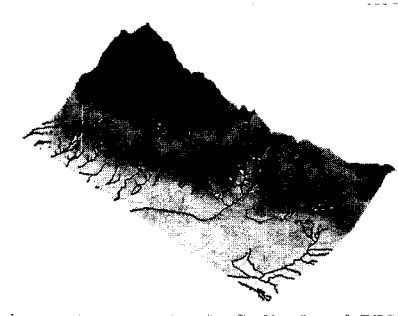


그림 5 산사태 흔적도

2.3.2 현지조사결과

한편, 현장에서 채취한 대표적 시료에 대한 토성 시험 결과를 <표 3>에 표기하였다. 산사태 발생원인을 분석하기 위해 전체 조사 개소중 90개소의 산사태지에 대한 산사태 규모, 사태면의 경사 및 경사 방향, 산사태 지역의 지질 및 토질, 임상, 토사 유출량 및 토석류의 하천 유입 경로 등을 조사하여 <표 4>에 요약 정리하였다.

표 3 대표적 시료의 토성시험 성과표

조사지점	비중 (Gs)	체분석				통일분류법 (USCS)
		#4체 통과량 (%)	#200체 통과량 (%)	균등 계수 (Cu)	곡률 계수 (Cg)	
의정부동 I/C	2.68	98.46	1.69	7.78	0.84	SP
안골 유원지	2.66	97.52	2.46	8.72	0.88	SP
임석마을	2.64	92.76	12.85	28.43	2.62	SM
호암사 계곡	2.66	95.79	1.95	8.5	1.02	SW
신곡동	2.65	91.03	12.04	31	1.96	SM
원도봉산 유원지	2.67	94.54	0.95	6.25	0.71	SP
회룡천 계곡	2.64	87.78	12.53	29.17	2.38	SM
녹양동	2.64	85.02	12.37	48.89	2.09	SM
용현동	2.66	91.61	0.71	8.6	1.19	SW
평균	2.66	92.72	6.39	19.7	1.52	

3. 산사태 발생원인 분석

일반적으로 산사태 발생원인은 크게 내적요인과 외적요인으로 구분된다. 내적요인은 사면의 지형, 지질, 토질 및 임상등과 같은 잠재적인 요인으로서 진행성 파괴, 풍화작용, 침식에 의하여 사면구성물질의 전단강도를 감소시키는 원인이 되며, 외적요인은 지형의 변화, 토피하중의 감소, 하중의 증가, 진동과 충격, 지하수위의 변동으로서 내적요인과 결합하여 산사태를 유발시킨다. 그리고 검토대상이 광역적 지역이나 협의적 지점이냐에 따라 고려하는 대상조건이 다르다. '지역'이 대상일 때는 계곡의 깊이, 사면의 경사, 계곡간 표고차 등이 주 고려사항이고 한 '지점'이 대상인 경우는 경사, 사면길이, 사면의 중횡단 형상, 경사변환대, 방위 등이 고려항

목이 된다.

지질조건으로서는 기반암의 종류와 상태로서 절리와 불연속면의 밀도, 크기, 주향과 경사, 인장균열, 풍화도 등이 검토대상이 되고, 표토층에 대해서는 토층의 깊이, 입도, 전단강도, 투수성, 건조균열, 이질 지층, 기반암과의 접착상태 등이 고려대상이다. 기반암에 따른 산사태 발생확률은 화강 편마암, 점판암 및 사질암, 천매암, 석회암의 순서로서 이 순서는 산사태 위험도 판정에 사용되고 있다.

식생은 산사태를 억제하는 효과와 동시에 촉진하는 효과를 동시에 갖고 있다. 억제효과는 나뭇잎의 차양막 효과, 수분 흡수 증발에 의한 유효 강우 감소 효과, 근계의 보강효과, 근계의 수분흡수에 의한 지반 함수비 감소효과, 근계에 의한 조립자 탈착효과 등이고 촉진효과로서는 태풍과 강우시 지하수위의 상승, 암사면에서 뿌리의 썩기작용, 강풍에 의해 지반을 교란시킴으로서 침투로를 형성하고 전단강도를 감소시키며, 수목의 무게의 의한 상재압의 증가는 활동력 증가효과와 저항력 증가효과를 함께 가지고 있으나 강풍이 불어 큰 수평하중이 수목에 전달되면 주로 활동력을 증가시켜 산사태를 촉진하는 요인으로 작용한다. 그러므로, 임상이 산사태 억제효과를 충분히 가지려면 근계가 활동면 깊이보다 충분히 깊고 견고하게 뿌리내려 보강기능 역할을 할 수 있어야 한다.

여기서는 <표 4>의 현지조사 결과를 바탕으로 통계 처리하여 확률론적 접근법에 의한 산사태의 규모 및 유형 그리고 산사태와 발생요인인 강우, 지형, 지질, 토질, 임상 등과의 관계를 분석하였다.

3.1 산사태 발생유형 및 유형별 산사태 발생빈도

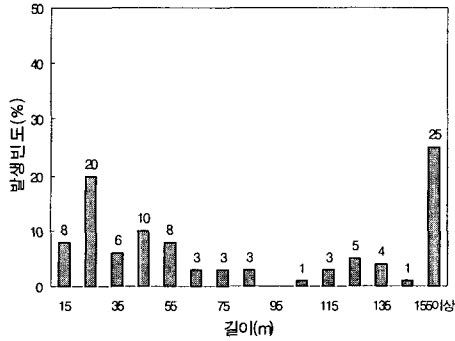
산사태 발생지에 대한 현장조사 시에는 거의 산사태 발생지역이 대부분 복구완료 상태이거나 복구작업 중이었으므로 산사태 발생 당시의 규모를 정확히 측정하기는 매우 어려운 실정이었으므로 산사태 흔적과 기존의 지형도 및 현장 측량에 의하여 산사태 규모(길이, 면적, 깊이 등)를 파악하였다. 현장조사 지역의 산사태 규모는 [그림 6]과 같다. 사태규모는 작거나 또는 큰 것이 특징으로 길이는 55m이하가 52%, 155m이상인 25%로 전체 조사개소 중 77%를 차지하며, 발생면적으로는 1,000 m²이하가 51%, 4,000 m²이상인 15%, 사태깊이는 1m 이하가 82%로 나타났다.

유 남 재, 박 병 수

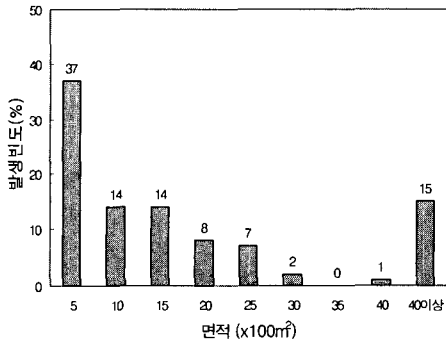
표 5 의정부 산사태 현지조사 결과요약

조사위치		유형			사태규모			강우			지질			지형		임상	사면 변형 유무	사태 발생 요인	
지 역	세 부 지 역	발 생 위 치	외 형	붕 괴 형	길 이 (m)	방 향	면 적	깊 이 (m)	최 대 시우량 (mm)	선 행 강우량 (mm)	관 측 소	풍 일 분류	기 반 암	풍 화 상 태	사 면 경사도 (deg)	사 면 경사형			수 종
가능	안골	산정	패각	Flow	60	N65E	1500	0.4	113	132	시청	SC	Gr.	H.W.	40	planar	아카시아	자연적	
가능	안골	산정	패각	Flow	70	N40E	1500	0.8	113	132	시청	SC	Gr.	C.W.	34	convex	밤나무	자연적	
가능	안골	산북	패각	Flow	120	S80E	2250	0.7	113	132	시청	GM	Gr.	C.W.	18	concave	밤나무	자연적	
가능	안골	산북	패각	Flow	30	N60W	500	0.6	113	132	시청	SM	Gr.	C.W.	27	concave	밤나무	자연적	
가능	안골	산북	패각	Flow	37	NS	600	0.5	113	132	시청	SC	Gr.	C.W.	28	concave			
가능	안골	산북	패각	Flow	38	NS	500	0.8	113	132	시청	SC	Gr.	C.W.	27	concave	신갈나무		
가능	안골	산북	패각	평행활동	18	NS	250	0.6	113	132	시청	SC	Gr.	MW	16	concave			
가능	안골	산북	패각	Flow	56	NS	750	0.5	113	132	시청	SP	Gr.	C.W.	33	concave	신갈나무		
가능	안골	산북	선형	Flow	410	N70E	12500	1	113	132	시청	SW	Gr.	C.W.	22	concave	아카시아		
가능	입석마을	산정	수지	Flow	140	S60E	600	0.3	109	134	녹양	SN	Gr.	CW	35	concave	리기다	자연적	
가능	입석마을	산정	선형	Flow	130	S80E	3000	0.5	109	134	녹양	SC	Gr.	CW	30	concave	갯나무	자연적	
가능	입석마을	산북	패각	평행활동	30	N10W	500	1.2	109	134	녹양	SC	Gr.	SW	50	convex	갯나무	인위적	하부 경작
가능	입석마을	산북	패각	Flow	40	N30E	500	0.6	109	134	녹양	SC	Gr.	SW	23	convex	갯나무	인위적	
가능	입석마을	산북	패각	Flow	30	N80E	450	0.3	109	134	녹양	SC	Gr.	SW	27	convex	갯나무	인위적	
가능	입석마을	산북	수지	Flow	180	N60E	2100	0.8	109	134	녹양	SP	Gr.	CW	14	concave	밤나무	자연적 인위적	계곡부
가능	입석마을	산북	수지	Flow	372	N40E	1500	1	109	134	녹양	GW	Gn	MW	32	concave	갯나무	자연적 인위적	계곡부
가능	입석마을	산북	선형	Flow	225	N32E	8750	1.3	109	134	녹양	GC	Gr.	CW	14	concave	신갈나무	자연적	
가능	입석마을	산북	선형	Flow	290	N15E	5750	0.3	109	134	녹양	SM	Gr.	CW	13	concave	신갈나무	자연적	
가능	입석마을	산북	선형	Flow	380	N20E	9500	0.9	109	134	녹양	SW	Gr.	CW	13	concave	신갈나무	자연적	
가능	입석마을	산북	패각	평행활동	12	N35E	50	0.4	109	134	녹양	SC	Gr.	CW	37	planar	소나무	인위적	하부 경작
가능	입석마을	산북	패각	Flow	22	N35E	80	0.4	109	134	녹양	SC	Gr.	CW	34	planar	소나무	인위적	하부 경작
가능	입석마을	산북	패각	Flow	25	N35E	90	0.5	109	134	녹양	SC	Gr.	CW	35	planar	소나무	인위적	하부 경작
가능	입석마을	산북	수지	Flow	620	EW	13500	0.9	109	134	녹양	SM	Gr.	CW	15	concave	신갈나무	자연적	
가능	입석마을	산북	수지	Flow	80	NS	1250	1.2	109	134	녹양	SC	Gr.	CW	42	concave		인위적	하부 절개

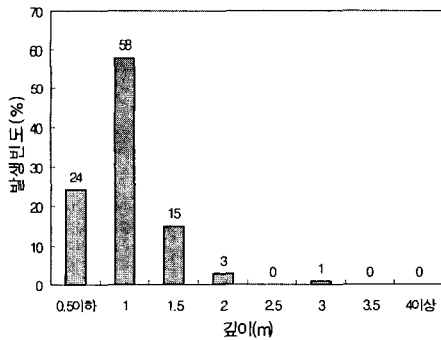
[그림 7a]은 조사지역 산사태의 발생위치별 발생 빈도로 주로 산복부에서 많이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 지형적 조건상 사면형상 및 경사도가 대부분 산복에서 바깥에 따라, 산정으로부터 강우가 산복부로 집중되기 때문에 산사태가 산복부에서 많이 발생한 것으로 판단된다.



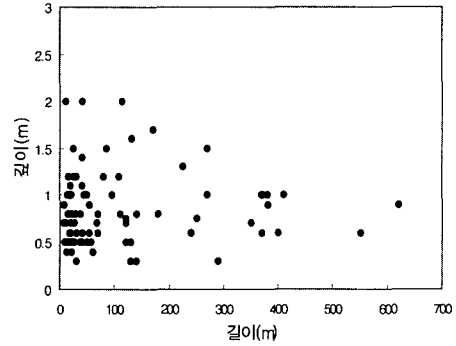
(a) 길이에 따른 산사태 발생빈도



(b) 면적에 따른 산사태 발생빈도



(c) 깊이에 따른 산사태 발생빈도

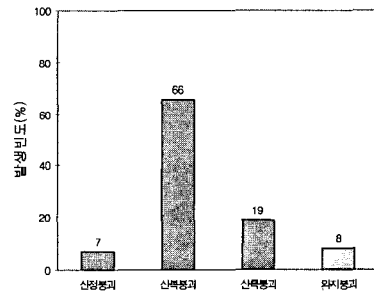


(d) 깊이와 길이의 관계

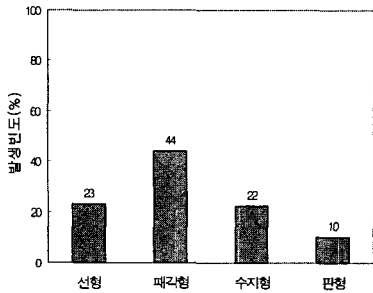
그림 6 규모별 산사태 발생빈도

외형별 분류에서는 [그림 7b]에서 보는 바와 같이 패각형이 45%로서 가장 발생빈도가 높고, 선형 및 수지형이 각각 23%, 22%, 관형이 11%로 분류되었다. 한편, 발생면적 및 길이에 있어서는 선형과 수지형이 대규모인 반면에 패각형은 소규모로 나타났다.

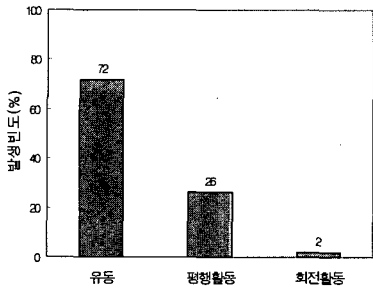
산사태의 붕괴유형은 [그림 7c]에서 보는 것처럼 대부분 유동형(72%)으로, 이는 집중호우시 상부의 풍화잔적토 및 붕적토가 강우에 의하여 침식하면서 하부로 급격히 이동한 것으로 판단된다. Walk의 분류법에 의해 분석한 결과, 26%의 평행활동은 현장 확인 결과 평행활동이 지배적인 것은 아니었다. 따라서 26%의 평행활동은 슬립프와 유동의 접이적인 현상으로서 슬립프와 유동의 복합형으로 판단된다.



(a) 발생위치별



(b) 외형별



(c) 붕괴유형별

그림 7 유형별 산사태 발생빈도

3.2 산사태와 발생요인과의 관계

3.2.1 강우와 산사태

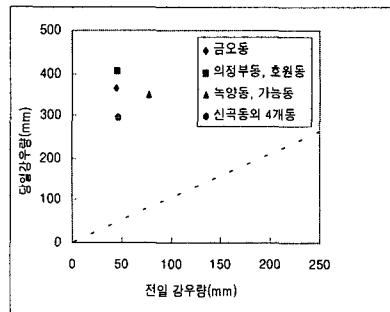
산사태를 일으키는 영향 인자로서 강우를 고려할 때 강우지표로서는 연속강우량, 일강우량 및 시강우량이 사용된다. 이 지표 중에 '어느 것이 산사태 발생에 직접적인 원인이 되는지?'를 규명하기 위한 연구가 여러 학자들에 의해 수행된 바 있는데, 우리나라의 산림청도 과거의 산사태와 당시의 강우조건을 토대로 <표 5>와 같은 산사태 예보 기준을 제시하였다.

표 5 기관별 산사태 예보 기준치 (단위:mm)

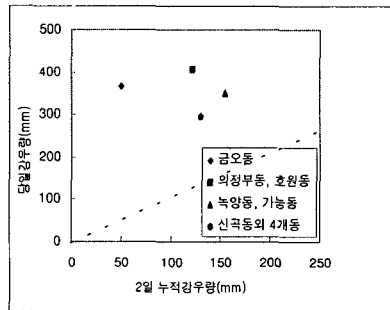
기관	구분	산사태 주의보	산사태 경보
산림청(1993)	연속 강우량	100~200	200이상
	일 강우량	80~150	150이상
	시우량	20~30	30이상
건설부 (일강우량 기준)	I 지역	90	105
	II 지역	75	90
	III 지역	55	75

의정부시 전역에 걸쳐 발생된 산사태 자료를 이용하여 산사태 발생일 이전의 누적강우량과 산사태 발생당일의 강우량과의 관계를 비교하여 보면 [그림 8]과 같다. 이들 그림에서 종축을 산사태 발생당일의 강우량으로 놓고 횡축에는 누적강우량으로 도시하였다. 누적강우량은 산사태 발생당일 강우량을 포함하지 않은 산사태 발생일 이전의 강우량으로 전일강우량(그림 8a), 2일간 누적강우량(그림 8b), 3일간 누적강우량(그림 8c) 등 3종류의 강우량을 취급하였다. 산사태가 발생한 지역은 [그림 8]의 (a), (b), (c)에 보는 바와 같이 모두 중앙경사선 상부에 도시되므로 당일강우량의 영향이 누적강우량의 영향보다 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서 이 지역에서 발생된 산사태는 누적강우량보다는 산사태 발생당일의 강우량의 영향에 의하여 발생된 것으로 판단된다.

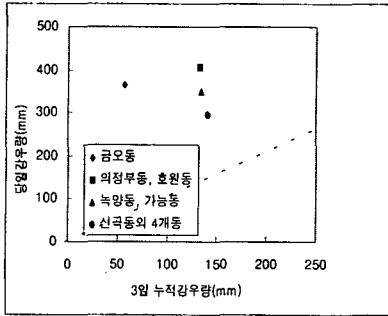
한편, 시우량은 산사태 발생에 있어서 사태 발생 전 선행누적강우량의 개념 못지않게 중요한 것으로 산사태가 발생한 지역과 가장 인접한 강우관측소별로 시우량과 누적강우량 개념(8월 5일 17:00 기준)을 동시에 도입하여 각 지역별로 그 특성을 판단해 보면 [그림 9]와 같다.



(a) 전일강우량과 당일강우량



(b) 2일 누적강우량과 당일강우량

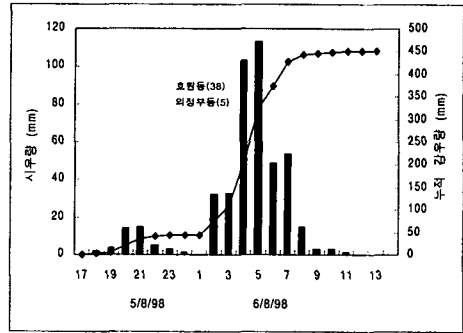


(c) 3일 누적강우량과 당일강우량

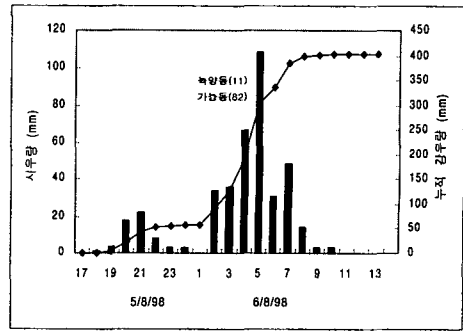
그림 8 누적강우량과 당일강우량의 관계

그림 중 중축의 좌측은 시우량으로서 막대그래프로 표시하였고 중축의 우측은 누적강우량으로 실선으로 표시하였다. 8월 5일 17:00부터 8월 6일 17:00까지의 누적강우량은 4개소 모두 300mm 이상을 보이고 있으며 4개소에서 측정된 강우량을 평균한 시우량을 살펴보면 100mm, 60mm, 50mm의 시우량이 각각 1회, 20mm의 시우량이 2회를 기록하고 있다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 사태 발생시 당일강우량이 지역에 관계없이 300mm이상이고 특히, 기록적 수준인 최대 시간강우강도가 산사태 발생에 중요한 요인으로 작용하였다고 판단된다.

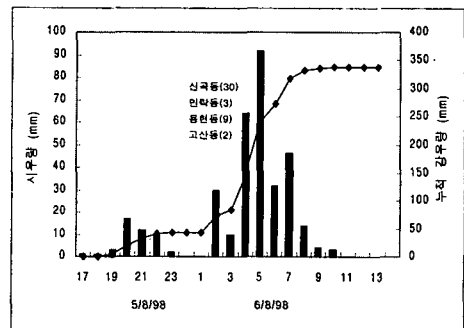
<표 6>은 다수의 산사태가 발생하였던 8월 6일 전후의 의정부 지역에 대한 연속강우량, 일강우량 및 시우량을 나타내고 있다. 이를 보면 일강우량이나 시우량이 <표 5>의 기준치를 훨씬 초과하는 수준으로서 짧은 시간에 걸쳐 상당한 양의 집중호우가 내렸음을 알 수 있다.



(b) 시청 관측소의 주변의 산사태



(c) 녹양동 관측소 주변의 산사태

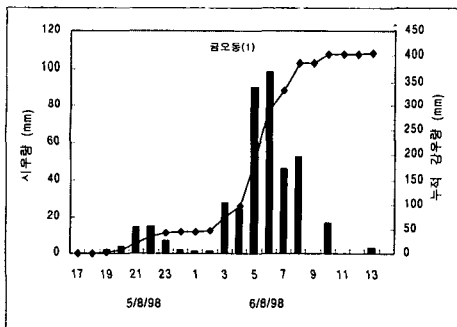


(d) 송산동 관측소 주변의 산사태

그림 9 각 관측소 주변의 산사태

표 6 각 강우관측소별 강우특성(8월 6일 기준)

구분	의정부 T/M	시청	녹양동	송산동	평균	산림청 경보 발령치
	2일 50	122	155	130	114	
	1일 44	45	77	46	53	200
일 강우량	366	406	351	296	355	150
최대 시우량	99	113	109	92	103	30
2시간 연속 최대강우량	190	216	176	156	184.5	



(a) T/M관측소의 주변의 산사태

한편, <표 7>은 의정부 T/M 관측소에서 측정된 강우 자료 중 산림청이 제시한 '산사태 경보 발령치' 이상의 일 강우량 및 시우량 중 최대치를 정리한 것이다. 그러나 <표 7>에서 나타내었듯이 1998년을 제외하고는 산사태가 발생하지 않았던 사실을 볼 때 산림청의 '산사태 경보 발령 기준'은 재난의 사전 대비를 위한 경보 목적으로 설정된 보수적인 기준임을 알 수 있다.

그러나 1998년의 경우 일강우량 및 시우량이 과거에 비해 월등하게 높을 뿐만 아니라 호우가 2시간여에 걸쳐 집중되었기 때문에 산사태가 발생할 수 있는 가능성이 매우 높았다고 말할 수 있다. 2시간여에 걸친 이러한 집중호우는 1,000년 확률 강우량을 넘는 것이다.

표 7 과거의 강우기록(1975-1998)과 산사태 발생과의 관계

년	일강우량(mm)	최대시우량(mm)	산사태발생여부	년	일강우량(mm)	최대시우량(mm)	산사태발생여부
75	203	46	×	90	257	38	×
78	130	43	×	91	183	36	×
79	111	60	×	92	157	55	×
82	201	29	×	93	96	36	×
83	99	46	×	95	190	41	×
84	284	59	×	96	153	55	×
86	106	51	×	98	366	99	○
87	209	63	×				

의정부 지역의 경우 최대 강우강도 발생 시간과 산사태 발생 시점이 일치하는 것을 볼 때 의정부 지역의 산사태는 강우 시작으로부터 사태 발생까지 시간이 걸리는 '침투수형 산사태'라기 보다는 '표면침식형 산사태'임을 알 수 있다.

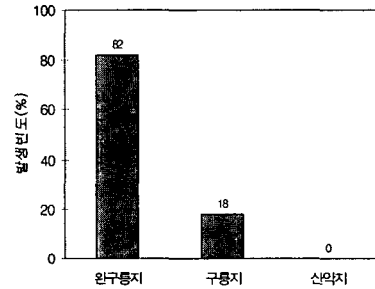
3.2.2 지형과 산사태

'98년 의정부시에서 발생한 산사태는 [그림 10a]에서 보는 바와 같이 완구릉지 사면에서 82%, 구릉지 사면에서 18%로 나타났다. 이는 의정부시 지형의 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다.

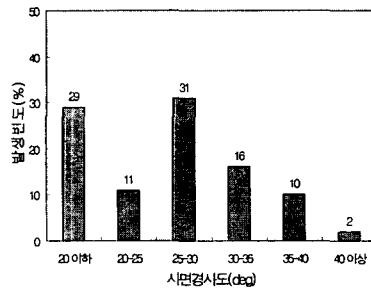
한편, 산사태 발생에 미치는 지형요인중 가장 중요한 인자인 사면경사와의 관계는 [그림 10b]에서와 같이 사면경사도 30° 이하에서 71%이상 발생하였다.

산사태가 발생한 사면을 사면경사형에 의해 분류하면 [그림 10c]에서 보는 바와 같이 하강사면에서 가장 많은 산사태가 발생하였다. 또한, 사태면의

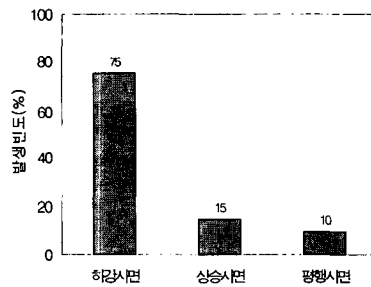
두부인 계곡의 양측 사면은 급경사 (30° 이상)를 나타내며 하부사면과 경사변환점을 이루고 있음이 관찰되었다.



(a) 표고별



(b) 사면경사별



(c) 사면경사형

그림 10 지형에 따른 산사태 발생빈도

3.2.3 지질과 산사태

산사태 발생지의 지질분포는 지질 관련문헌을 참조하여 개략적으로 파악한 후 현장에서 직접 암상

을 관찰하였으며, 노두가 노출되지 않은 사태지에 대해서는 그 주변에 노출된 노두를 통해 간접적으로 조사하였다. 조사 결과, 조사지역의 지질은 일부지역을 제외하고는 거의 대부분 지역이 화강암으로 분포되어 있음을 알 수 있었다.

화강암의 주구성광물은 석영, 장석 및 운모 등으로 오랜 기간동안 물리적, 화학적 풍화작용을 받으면 석영은 풍화하여 세립화되어도 비교적 안정한 반면에 장석과 운모는 물리적, 화학적으로 불안정하여 세립화됨과 동시에 화학적으로 변질되어 2차 광물인 점토로 변화되는 성질을 지니고 있다. 이렇게 풍화된 화강암이 원위치에서 그대로 쌓여 형성된 흙을 화강 풍화잔적토, 사면하부로 이동되어 퇴적된 흙을 봉적토라고 하며, 이러한 풍화 잔적토 및 봉적토는 [그림 11]에서 보는 것처럼 의정부시 산사면에 걸쳐 0.5~1m 깊이로 널리 분포하고 있다.

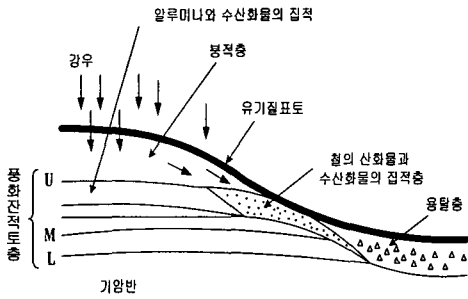


그림 11 풍화잔적토의 토층구조

이러한 내용을 종합적으로 고찰해 보면 상부 표토층을 얇게 덮고 있는 적갈색의 유기질 점토가 강우와 함께 지중수에 침투하여 상대적으로 투수성이 큰 봉적토층 및 화강풍화토층의 간극을 막히게 함으로써 토층의 무게 및 간극수압이 현저히 증가하는 반면에 전단강도가 급격히 감소함에 따라 산사태가 유발된 것으로 판단된다.

3.2.4 토질과 산사태

조사지역은 대부분 화강암 지대로 모암인 화강암이 풍화작용을 받아 풍화 잔류토 상태로 잔존하며 상부 표토층은 유기질토로 두께는 10cm이내, 그 아래 풍화 잔적토의 두께는 1m 내외로 암갈색 내지 적갈색을 띠고 있었다. 현장 답사시 채취한 대표적 시료에 대한 실내시험(표 4 참조)을 수행하여 통일 분류법에 의거, 분류하고 그 이외의 사태지역은 육안 판독하였다.

산사태 지역의 토질은 [그림 12]에서와 같이 대부분이 모래질로 분류되었으며, 지질분포에 따라 실트질 모래(SM)가 39%, 점토질 모래(SC)가 38%, 입도분포가 양호한 모래질(SW)이 9%, 입도분포가 불량한 모래질(SP)이 7%로 나타났다.

산사태 발생에는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하였겠지만, 주요인의 하나로서 투수성이 큰 조립질 모래의 경우, 집중호우시 빠르게 포화되어 간극수압이 급격히 증가하므로서 유발되는 토층의 전단강도를 꼽을 수 있다.

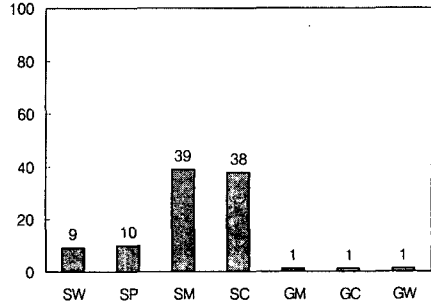


그림 12 토질분류에 따른 산사태 발생빈도

3.2.5 임상과 산사태

산사태 주변의 식생은 임령이 III영급 이하로 소나무류(리기다소나무, 잣나무), 참나무류(신갈나무, 밤나무), 낙엽송과 사방용수인 아카시아와 물오리나무 등으로 구성되어 있고, 생육간격이 조밀하고 그 사이는 초본류가 침입할 수 없을 정도로 낙엽이 덮혀 있으며 하층식생은 소밀도가 밀(密)한 동령림(同齡林)으로 태양광선이 침투할 수 없거나 일조량이 적어 소멸되거나 일부만 남아 있었다. 산사태 주변 임목의 흉고직경은 10~20cm로 나타났다. 북쪽사면에서 산사태가 많이 발생하였다. 동상침식의 원인으로 남쪽사면에서 사태가 발생하기도 하며 북쪽사면에 사태가 많이 발생한 것은 내음성에 약한 수종이 우점하는 식생분포에서 후세대의 발아, 성장이 원만하지 못한 것이 원인이라 보여진다.

일반적으로 산복에 식재된 소나무와 참나무는 심근성으로 산사태 방지에, 아카시아와 물오리나무는 표면침식방지에 도움을 주는 것으로 본다. 사태방지에 도움을 주는 임분에서도 산사태가 발생한 것을 보면 임분구성에 문제가 있으며 폭우를 동반한 강우에서 바람에 흔들린 임목 뿌리 사이로 강우가 유입되는 역할과 상해하중의 증가라는 단점으로 작용한 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 '98년 8월 6일 새벽 3-5시 사이에 산사태가 집중적으로 발생한 의정부 지역을 연구 대상 지역으로 선정하여 산사태지의 지형특성, 지질 및 토질 특성, 임상특성 등을 관련문헌과 현지조사 결과를 바탕으로 조사 분석하고 당시의 기상자료를 토대로 강우특성을 분석하여 산사태 발생 원인을 규명하는 한편, 산사태와 산사태 발생에 영향을 미치는 각종 환경인자와의 관계를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 산사태의 규모는 크고 작은 것이 특징적이며, 길이는 55m이하가 52%, 155m이상이 25%로 전체 조사개소중 77%를 차지하며, 발생면적으로는 1,000 m^2 이하가 51%, 4,000 m^2 이상이 15%였다. 이 지역에서 발생한 산사태는 산복봉괴가 전체의 66%를 차지하며, 발생의형별로는 선형이 23%, 패각형 및 수지형이 66%이고 전체중에 72%가 유동형으로 나타났다.
- 2) 이 지역 산사태의 직접적인 원인은 선행강우에 의해 지반이 거의 포화된 상태에서 1,000년 확률 강우량을 넘는 2시간 동안 내린 기록적인 집중호우에 기인하였다고 판단된다. 조사지역의 산사태가 집중호우 중에 발생하였거나 그 직후에 나타났다.
- 3) 상당수의 산사태가 비교적 집중현상이 잘 나타나는 완구릉지의 하강사면에서 많이 발생하였는데, 이러한 사면에서는 빗물이 침수되기 때문에 물 흐름의 양이 많고 또한 토석류를 동반하는 만큼 표토의 침식정도가 높을 뿐만 아니라 高水位에 따른 간극수압의 증가로 전단저항에 기여하는 유효응력이 감소된 결과에 기인하였다.
- 4) 산사태 발생지역의 토질은 실트질 및 점토질 세립분이 다소 포함된 모래질 흙이 분포된 지역에서 많이 발생하였다. 이러한 흙의 경우 지중으로 침투한 집중호우가 신속히 배제되지 못하므로 간극수압이 크게 유발됨으로서 유효응력의 감소로 인해 사면의 불안정을 촉발시켰음을 알 수 있었다.
- 5) 북쪽사면에 사태가 많이 발생한 것은 내음성에 약한 수종이 우점하는 식생분포에서 후세대의 발아, 성장이 원만하지 못한 것이 원인임을 알 수 있었다.
- 6) 도로 및 철탑 설치를 위한 사면절토와 군사시설(교통호), 경작지 개발과 같은 인위적 변형은 사면 안정에 일반적으로 불리하다. 이 중 자연사면을 절토하여 그 기울기가 본래의 기울기보다 급하게 조성될 경우 사면의 안정성이 저하될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 강병무, "Landslide 조사연구의 접근 방법", *지질광상*, 14권, pp. 79-93, 1971.
- [2] 강위평, 우보명, "85년 7월 부산 문현동 산사태 피해에 관한 연구", *한국임학회지*, 70호, pp. 77-83, 1985.
- [3] 김마리아, "강우로 기인되는 산사태에 관한 연구", 공학석사 학위논문, 중앙대학교 건설대학원, 1988.
- [4] 김상규, "한국에서 발생하는 지반활동", *Proceedings of the North-East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows*, The Korean Geotechnical Society, 1994.
- [5] 김운영, 김영길, "'98 대홍수의 진단과 재해극복 대책수립", *대한토목학회, 한국수자원학회*, 1999.
- [6] 마상규, "산사태발생지와 피해위험지의 환경학적 해석과 방지대책 - 평창지구를 중심으로 -", *한국임학회지*, 45호, pp. 11-25, 1979.
- [7] 박용원, 김감래, 여운광, "1991년 용인-안성 지역 산사태 연구", *한국지반공학회, 제 9권, 제 4호*, pp. 103-116, 1993.
- [8] 산림청, 산사태 위험지 조사 판정 요령, 1993.
- [9] 우보명, 임경빈, 이수숙, "안양지역에 있어서 폭우에 의한 산사태발생에 관한 실태조사와 예방 대책에 관한 연구", *한국임학회지*, 39호, pp. 1-34, 1978.
- [10] 유지협, "강우로 인한 불균질 사면의 산사태 발생 메커니즘", 공학석사 학위논문, 동국대학교 대학원, 1993.
- [11] 이인모, "뿌리의 강도가 자연사면 안정에 미치는 영향에 관한 실험연구", *한국토질공학회지, 제 7권, 제 2호*, pp. 51-66, 1991.
- [12] 전상현, "무한사면 안정해석법을 이용한 산사태의 확률론적 모델개발", 공학석사학위논문, 강원대학교 대학원, 1998.
- [13] 전성기, 실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람, *과학기술*, 1998.
- [14] 최경, "한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구", 농학박사 학위논문, 강원대학교 대학원, 1986.

- [15] 최경, “산사태 예지방법과 예방대책”, 임업연구원 연구정보, No.27, pp. 1-3, 1989.
- [16] 한국지반공학회, 지반공학 시리즈 5 - 사면안정, 사단법인 한국지반공학회, 1994.
- [17] Bishop, A. W., “The Use of Pore Pressure Coefficient in Practice”, *Geotechnique*, Vol. 5, pp. 7-17, 1955.
- [18] Brown, C. B., and Sheu, M. S., “Effects of Deforestation on Slopes”, *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 101, No. 1, pp. 147-165, 1975.
- [19] Chandler, D. S., “An Area Approach to Forest Slope Stability”, Doctor of Philosophy, University of Washington, 1992.
- [20] Duncan, J. M., and Wright, S. G., “The Accuracy of Equilibrium Methods of Slope Stability Analysis”, *Proc. Int. Symp. Landslides*, New Delhi, 1980.
- [21] Fellenius, W., “Calculation of the Stability of Earth Dams”, *Trans. 2nd Congress on Large Dams (Washington)*, Vol. 4, pp. 445, 1936.
- [22] Greco, V. R., “Efficient Monte Carlo Technique for Location Critical Slip Surface”, *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, Vol. 122, No. 7, pp. 517-525, 1996.
- [23] Harr, M. E., *Mechanics of Particulate Media*, McGraw-Hill, 1977.
- [24] Reddi, L.N, Wu. T.H., “Probability Analysis of Ground-Water Levels in Hillside Slopes”, *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 117, No. 6, pp. 872-890, 1991.