

지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성
- 연천-철원지역을 대상으로 -
Landslide Types and Susceptibilities Related to
Geomorphic Characteristics
- Yeonchon-Chulwon Area -

김 원 영 (Won Young Kim)	한국자원연구소
이 사 로 (Sa Ro Lee)	한국자원연구소
김 경 수 (Kyeong Su Kim)	한국자원연구소
채 병 곤 (Byung Gon Chae)	한국자원연구소

요약 / ABSTRACT

1996년 7월 2일간의 집중강우로 연천-철원 지역에서 발생한 916개 산사태를 대상으로 산사태 유형과 지형적 취약성을 분석하였다. Olivier의 산사태 반응 등식을 적용할 경우 2일간 강우량은 대형 산사태가 발생할 수 있는 집중강우지수(event coefficient) 0.2를 훨씬 초과하는 0.372로서 집중강우가 이 지역의 산사태를 주도하였다. 붕괴물질은 붕괴층과 풍화 잔류토가 복합적으로 파괴되어 생성된 암설이 우세하다. 붕괴물질의 구성비로 분류하면 산사태의 66%는 암설 유동(debris flow)이고, 23%는 토양 유동(sediments flow)에 해당된다. 규모에 의하여 분류하면 90%이상이 연장 100m 이하, 심도 1m 내외인 변이형(transitional) 산사태에 속한다. 암석 분포별로는 화강암 지역의 산사태 빈도가 변성암 지역보다 4.7배, 화산암 지역보다는 2.7배 높다. 이는 화강암의 풍화정도가 높아 투수성이 높고 결과적으로 전단응력이 저하된 결과로 해석된다. 산사태에 가장 취약한 지형은 고도 200-300m, 경사면 10-20°이고, 50% 이상이 이와 같은 지형조건 하에서 발생하였다. 단위 면적당 산사태 빈도도 상기 지형조건에서 각각 평균치의 2배 및 1.43배 높다. 결과적으로 집중강우시 저 고도, 저 경사면에 분포하는 붕괴층이 풍화 잔류토와 함께 산사태를 발생시켰다.

An analysis on landslide types and susceptibilities associated with geomorphic characteristics has been conducted with 916 landslide inventories in Yeonchon-Chulwon District, where two day's heavy

rainfall was concentrated on July, 1996. The precipitation during the 2 days, which is equivalent to 0.372 of event coefficient, can cause large landslides based on Olivier's equation. Sliding materials are dominantly composed of debris mixed with rock fragments and soil derived from colluvium and residual soils. 66% of the landslides are belong to debris flow and 23% are due to sediments flow, in accordance with the classification of sliding materials. Most of landslides(> 90%) are small and shallow, less than 100m in length and about 1m in depth, and classified as transitional type. Granite is more susceptible as much as 4.7 times than metamorphic rocks and 2.7 times than volcanic rocks, probably due to higher weathering grade of granite. The highest landslide frequency is concentrated on the areas between 200 and 300m in height and on the slopes between 10-20° in degree. More than 50% of landslides occurred under these geomorphic conditions. Consequently, colluviums and residual soils distributed on the gentle slopes are most susceptible to the landslides of the area.

서 언

1996년 7월 26-27일 양일간 내린 집중 호우로 경기도 연천군 및 강원도 철원군의 휴전선 부근에 심각한 산사태가 발생하였고 이로 인하여 22명의 인명이 목숨을 잃었다. 집중 호우 시 산사태는 비단 이 지역 뿐 아니라 남한 전역에 많이 발생하여 온 것으로 알려졌다.

본 연구는 96년 7월의 호우로 발생한 연천-철원 일대 산사태 발생 지역의 지형적 특성을 분석하고 이들을 통계적으로 처리하여 이 지역에서 일어난 산사태의 지형적 취약성을 해석하고 산사태의 유형별 특성을 규명하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 연구지역인 철원군 및 연천군 일대의 약 1,400km²의 면적 내에서 916개의 산사태에 대한 지형 취약성을 분석하였으며, 916개중 66개를 선정하여 산사태의 유형 특성을 살펴보았다.

강우는 산사태의 가장 직접적 원인이며, 이론적으로는 강우량이 연평균 강우량보다 많을 때 산사태가 발생할 수 있는 조건이 충족된다. 즉, 어떤 시기까지의 누적강우량이 그 시기까지의 연평균 강우량을 초과할 때, 초과하는 정도에 의하여 사태의 규모도 결정된다는 보고가 있다(Olivier et al., 1994). 그러나, 대부분의 산사태는 단위 시간당 또는 일 강우량의 절대치에 기인되는 경우가 많다(Ikeya, 1989; Spence, 1997). 연구지역의 경우도 2일간 420mm 이상의 집중호우가 있었으며, 그 영향으로 철원군 내에서만 단기간 내에 1,000여 개 이상(철원

군청 미발간 조사자료)의 산사태가 발생되었다.

과거에 발생되었던 산사태의 역사는 지형 분석을 통하여 어느 정도 유추할 수 있기 때문에, 지형 분석은 산사태 평가를 위한 가장 기초적이면서 효율적 분야인 것으로 보고되고 있다(Dearman and Fooks, 1974). 그러므로, 산사태가 발생한 지역의 지형 분석은 앞으로 일어날 수 있는 산사태의 지형적 취약성을 해석하는데 기초자료로 이용될 수 있을 뿐 아니라 나아가서는 산사태를 예측하는 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

연구 방법

연구지역 선정

최근 산사태가 집중된 지역을 택하여 산사태 발생 원인을 용이하게 파악하고자 하였다. 이를 위하여 경기도 철원군 및 연천군 일대의 약 1,400km² 지역을 연구지역으로 선정하였다(Fig. 1). 이 지역은 1996년 7월의 집중호우로 많은 인명과 재산상의 피해가 있었던 곳으로 많은 산사태들이 비교적 원래의 상태가 잘 보존된 상태로 분포하고 있어 연구지역으로 선정하기에 적절하다고 판단하였다.

기존자료 수집

'97년 발생한 연구지역의 산사태에 관한 일차적 정보는 철원군청 및 연천군청의 산사태 복구현황 자료를 이용하였다(미 발간 보고서). 이들 자료를 기초로 연구지역 범위를 정하였고 선정된 지역내의

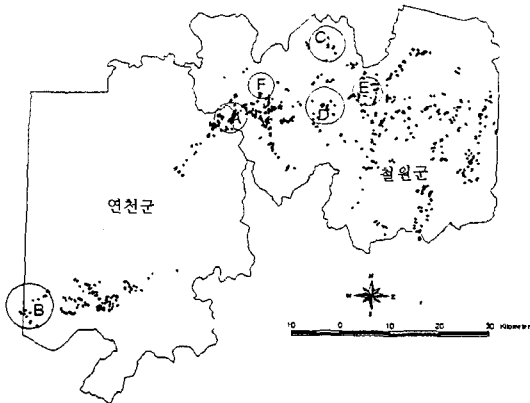


Fig. 1. Map showing the study area ; the black dots represent locations of landslide.
 A:Galmal-myeon, Chulwon-gun,
 B:Misan-myeon, Yeonchon-gun,
 C:Kimhwa-eub, Chulwon-gun,
 D:Seo-myeon, Chulwon-gun,
 E:Keunnam-myeon, Chulwon-gun,
 F:Chulwon-eub, Chulwon-gun.

자료를 수집하였다.

지형분석을 위해서는 1 : 50,000 축척의 지형도를 기본 입력자료로 이용하였으며, 이를 수치 지형고도 자료(DEM : Digital Elevation Model)로 구축한 후 지형 자료를 추출하였다. 이와 같은 방법으로 처리하여 얻은 자료는 사면경사(inclination), 경사 방위(direction), 고도(height) 등이다.

강우는 산사태를 일으키는 직접 원인이므로 산사태 지역을 중심으로 가능한 한 많은 지역별 강우 자료가 필요하다. 그러나, 연구지역은 민간인 출입이 통제되고 있는 군사분계선 부근을 포함하고 있어 필요한 자료를 충분히 수집할 수는 없었다. 단지 기상청 연보(1996)를 인용하여 철원을 비롯한 서울, 강화, 춘천지방의 강우량을 분석자료로 이용하였을 뿐이다.

야외조사

우선 군청 측에서 1 : 50,000 지형도에 표시한 산사태 지점을 현장에서 위치를 확인, 수정하는 방법을 통하여 동일 축척의 지형도에 표시하였다. 현장에서 확인하여 도면에 표시한 산사태는 916개이다. 그러나, 이 자료만 가지고는 산사태의 물리적 성질

이나 기하학적 형태(geometry) 등을 규명할 수 없기 때문에 연구지역 내에서 6개 지역을 선정하여 조사를 실시하였다. 이들 지역에서 조사한 산사태는 66개였고 조사 내용은 산사태의 위치, 지질, 사태물질의 종류, 형태, 길이, 폭, 심도, 산림의 종류 등이다(Table 1).

취약성 분석

산사태 취약성을 분석하는 방법에는 결정론적(deterministic)방법과 확률론적(statistical) 방법이 있다(Gokceoglu et al., 1996). 결정론적 방법은 조사지역을 일정 면적의 망사(grid) 형태로 구분한 후, 개개의 망사 내에서 산사태와 연관된 토양의 물리적 특성과 전단특성을 구하여 이를 등고선도(contour map)로 작성, 산사태 취약성에 대한 정량적 평가를 하는 방법이다. 이와 같은 방법은 많은 시간과 경비가 수반되므로 넓은 지역을 대상으로 하기는 매우 어렵다. 확률론적 방법은 산사태 취약성을 상대적으로 평가하는 수단으로써, 산사태 취약성을 정량화하지 못하는 반면, 넓은 지역을 상대적으로 평가할 수 있는 장점이 있어 본 연구에서는 이 방법을 택하였다.

우선 916개 산사태를 표시한 1 : 50,000 축척의 지형도를 DEM으로 구축하여 산사태의 위치, 경사, 경사방향, 고도 등의 자료를 획득하고, 이를 통계 처리하여 산사태의 지형적 취약성 분석을 위한 기본자료로 이용하였으며, 기타 사태물질의 특성, 사태의 규모 등은 야외조사를 통하여 획득한 66개의 산사태 자료를 이용하였다. 또한, 취약성 분석의 전제조건으로 산사태가 발생한 시점에서 연구지역 내의 강우량은 일정 값이라 가정하였다.

산사태 유형분석

66개 지점에서 조사한 자료를 이용해 연구지역에서 일어난 산사태의 산출상태를 분석하였다(Table 1). 이들 자료는 연구지역에서 발생한 산사태의 일부에 지나지 않지만 지역 내의 6개 지점(Fig. 1)을 대표하는 자료이므로 연구지역의 산사태 특징을 이해하는데 도움이 될 것이다. 6개 지점은 산사태 밀집 지역을 기준으로 연천군에서 1개소,

Table 1. Landslides characteristics investigated in detail at 66 locations.

Location	Position	Geology	Sliding material	Type	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Vegetation
A-1	Ridge	Granite	C&R	TDF	70	5	1m	Needle-leaf
2	Valley	"	"	"	40	7	2m	"
3	"	"	"	"	30	4	1m	Broad-leaf
4	"	"	"	Gully	110	3-5	1m	"
5	"	"	"	"	90	6-8	1m	"
6	Flat Slope	"	C	TDF	260	10-35	2m	"
7	Valley	"	C&R	"	80	30	<1m	"
8	"	"	"	"	70	8	<1m	"
9	"	"	"	"	70	12	<1m	"
10	"	"	"	"	60	13	<1m	"
11	Flat Slope	"	"	TSF	50	17	<1m	Broad-leaf
12	"	"	"	semi-C SF	13	8	1.5m	"
13	"	"	C&R	TSF	40	15	1.3m	"
14	Valley	"	"	TDF	40	20	1m	"
15	"	"	"	"	30	13	1m	"
16	Flat Slope	"	"	semi-C SF	25	25	2m	Grass
B-1	"	Gneiss	R	TSF	25	4	1m	Broad-leaf
2	Ridge	"	C	semi-C DF	80	30	2m	"
3	"	"	"	TDF	34	7	1m	"
4	Flat Slope	"	"	semi-C DF	70	20	1.2m	"
C-1	Valley	Granite	C	TDF	50	16	2m	"
2	Ridge	"	C&R	"	50	22	1m	"
3	"	"	"	"	25	13	1m	"
4	"	"	"	"	38	12	1m	"
5	Flat Slope	"	"	"	55	32	<1m	"
6	"	"	"	"	18	12	<1m	"
7	"	"	R	TSF	25	7	1m	"
8	"	"	R	"	33	10	1m	"
9	Ridge	"	R	"	45	16	1m	"
10	"	"	R	"	80	18	1.5m	"
11	"	"	R	"	30	8	1m	"

지형특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 - 연천-철원지역을 대상으로 -

Table 1. Continued

Location	Position	Geology	Sliding material	Type	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Vegetation
D-1	Valley	Granite	C&R	TDF	35	14	1m	Broad-leaf
2	"	"	"	"	27	7	1m	"
3	"	"	C	Gully	130	8	1.2m	"
4	Flat Slope	"	C&R	TDF	40	10	1m	"
5	"	"	"	"	45	8	1m	"
6	Valley	"	R	TSF	40	8	1.2m	"
7	"	"	"	"	80	8	1m	"
8	"	"	"	Gully	120	6	<1m	"
9	Flat Slope	"	"	TSF	50	20	1m	"
10	"	"	"	"	40	7	1m	"
11	Valley	"	"	Gully	35	4	<1m	"
12	"	"	"	"	15	3	"	"
13	"	"	"	"	10	3	"	"
14	"	"	"	TDF	25	5	1m	"
15	"	"	"	"	30	20	2m	"
E-1	Ridge	"	C	TDF	30	10	1.5m	Needle-leaf
2	"	"	"	"	60	7	"	"
3	Valley	"	R	TSF	25	5	1m	"
4	"	"	"	"	20	5	1m	"
5	Ridge	"	C&R	TDF	100	18	1m	"
6	"	"	"	"	80	8	"	"
7	"	"	"	"	45	5	"	"
8	"	"	"	"	150	17	"	"
F-1	Ridge	"	C&R	TDF	60	13	2.5m	Broad-leaf
2	"	"	"	"	50	8	2.3m	"
3	Valley	"	"	"	20	6	1m	"
4	"	"	"	"	35	6	1m	"
5	"	"	"	"	30	5	1.5m	"
6	"	"	"	"	28	5	1m	"
7	"	"	"	"	32	4	1m	"
8	"	"	"	"	50	6	"	"
9	"	"	"	"	40	5	"	"
10	"	"	"	"	25	3	"	"
11	Flat Slope	"	C&R	TDF	40	18	1.5m	"
12	Valley	"	R	Gully	15	4	<1m	"

- Location-A : Galmal-myeon, Chulwon-gun, B : Misan-myeon, Yeonchon-gun,
C : Kimhwa-eub, Chulwon-gun, D : Seo-myeon, Chulwon-gun,
E : Keunnam-myeon, Chulwon-gun, F : Chulwon-eub, Chulwon-gun
- Sliding material-C : colluvium, R : residual soil
- Type-T : transitional, F : flow, C : circular, D : debris, S : sediments

철원군에서 5개소를 선정하였다.

산사태(landslide)는 붕괴된 물질을 기준으로 구분할 경우 암석, 암설(debris), 토양 등으로, 형태(type)상으로는 낙반(fall), 토펙(topple), 슬라이드(slide), 측면퍼짐(lateral spread), 유동(flow) 등으로 분류할 수 있는데(UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1990), 이중 낙반과 토펙은 암반사면에서만 사용하는 용어이다. 토질역학에서는 형태를 호상(circular), 준호상(semi-circular), 변이(transitional) 및 복합(compound) 등으로 구분하는데(Craig R.F., 1983), 상기 2가지 기준을 적용할 경우 연구지역의 산사태는 붕괴물질이 암설이 우세한 전이유동(transitional debris flow)과 붕괴물질이 주로 잔류토양이고 약간의 암설이 포함되는 전이유동(transitional sediments flow)으로 구분된다.

산사태 발생위치는 능선부에서 16개소, 계곡에서 33개소, 그리고 평탄한 산사면에서 17개소로서 계곡에서의 산사태 발생율이 능선이나 평탄 사면보다 2배 높다.

지질별 산사태 발생율은 66개 자료만을 대상으로 하면 연천군 미산면 일대에 4개의 산사태만이 변성암 분포지에서 일어났고, 나머지 62개는 철원군 일대의 화강암지역에서 발생되었다. 연구지역에서 화강암의 분포가 변성암의 9%(Table 3)인 점을 감안하면 화강암에서의 산사태 취약성이 변성암에서 보다 매우 높은 것으로 평가된다. 그 이유는 아마도 화강암의 풍화 정도가 상대적으로 높아 침식이 활발히 진행되었고, 산록에 침식 토양과 암설이 붕적층을 형성하게 되었으며, 이들은 강우시 물의 투수성은 높아지고 전단응력은 낮아져서 쉽게 붕괴되었기 때문인 것으로 해석된다.

붕괴물질은 출처에 따라 붕적물질(colluvium), 풍화 잔류토(residual soil) 등으로 구분된다. 이들 2종의 물질은 서로 섞여 있어 구분하기가 매우 어렵다. 대체로 산사태 발생 기점이 잔류토양 분포지일 경우 사태 초기에는 붕괴물질이 토양이지만 사태가 진행되면서 붕적물질과 섞이게 되며, 발생 기점이 붕적층일 경우 붕괴물질은 대부분 붕적층으로 구성된다. Table 1에서 C&R이라고 표시된 산사태는 대부분 잔류토양이 분포하는 위치에서 사태가 발생되

었고, 사태가 진행되면서 붕적층과 함께 흘러내린 경우이다. 66개의 산사태 중 붕적층과 잔류토양이 섞여서 복합적으로 진행된 경우가 42개로 가장 우세하며, 잔류토양이 주 구성물질인 산사태가 17개소, 그리고 붕적층에서 사태가 일어난 지점은 7개소이다. 이를 종합하면 66개의 산사태 중 3/4에 해당하는 49개소에서 붕적층이 활동하였고, 결국 붕적층이 산사태의 주요 원인으로 해석된다.

연구지역의 산사태는 형태상 6개소가 도랑(gully)형 사태이고 준호상(semi-circular)형 사태는 4개소, 그리고 나머지 58개는 모두 변이(transitional)형 사태의 범주에 포함된다. 변이형 사태는 토양의 심도가 비교적 얇아 토양층이 얇게 직선상으로 붕괴되는 형태이고, 준호상 사태는 깊은 토양층에서 나타나는 호상형의 원형 파괴보다는 사태의 심도가 얇으나 변이형보다는 심도가 깊고 파괴모양은 타원상으로 나타난다(Fig. 2). 변이형이 우세한 이유는 연구지역의 산사태가 기반암 상부에 얇게 피복되어 있는 토양과 붕적 퇴적물에 의하여 지배되고 있음을 알 수 있다.

산사태 규모는 거의 길이 100m 이하의 소규모이며 4개의 산사태만 길이 100m를 초과하고 있는데(Table 2), 대체로 계곡을 따라 발달하는 도랑(gully)형의 사태가 연장성이 길게 발달하는 경향이 있다. 또한 연장(length)에 따라 폭(width)도 비례하여 발달하는 것으로 보인다. 그들의 상관관계는 산사태 위치에 따라 약간의 차이를 보이는데, 능선이나 평탄사면에서 발생한 사태에 비하여 계곡에서 발생한 사태는 매우 명확한 상관성을 보이고 있는 것이 특징이다(Fig. 3).

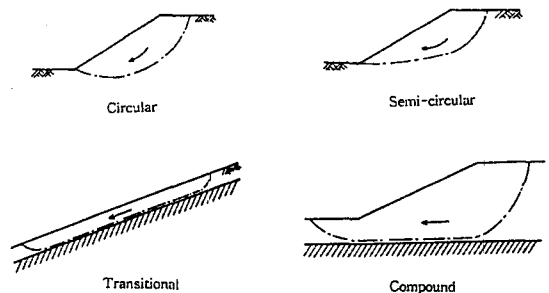


Fig. 2. Schematic figures illustrating types of slope failure in natural slopes(after Graig, 1983).

Table 2. Landslides frequency according to their length.

Length(m)	<20	20-39	40-59	60-79	80-99	100-149	150-199	≥200
Frequency(number)	5	23	19	7	6	4	1	1

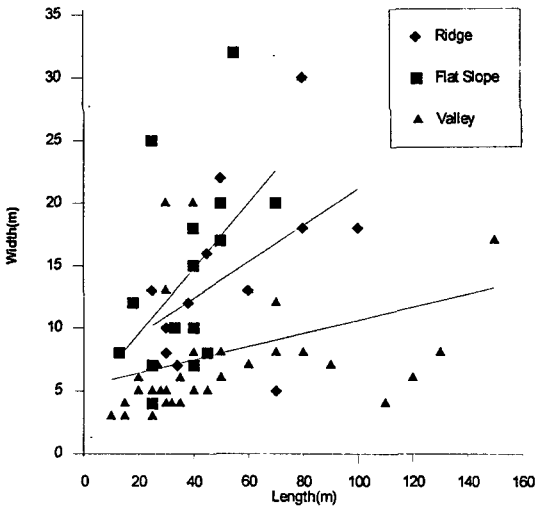


Fig. 3. Diagram showing relationship between landslides length and width. Solid line is fitting trend of ridge data. Dashed line is flat slope and dotted line is valley.

암, 응회암 및 유문암 등을 포함하는 화산암이다. 그림 4에서 암종별 분포비 중 화강암이 차지하는 비는 약 9%에 지나지 않으나, 단위 면적당 산사태 빈도는 화산암류에 비하여 2.7배, 변성암류에 비하여는 4.7배 정도 높은 것으로 나타난다.

66개 산사태 조사자료에서도 4곳을 제외한 62개 지역이 화강암 분포지역으로 나타나 화강암 지역이 타 암종에 비하여 높은 산사태 취약성을 보이고 있다.

Table 3. Landslide frequency related with lithologies.

Lithology	Area (km ²)	Frequency	Freq. /Area
1. Volcanic rocks	51	77	1.51
2. Metamorphic rocks	207	178	0.86
3. Granite	18	73	4.06

지 질 분 포

연구지역의 지질은 1 : 50,000 철원-마전리도폭을 참고하였으며, 이에 의하여 지질분포별 면적비와 산사태 빈도를 산출하였다(Table 3). 그러나, 상기 지질도를 인용할 수 있는 면적은 전체 연구지역의 1/4인 360km²에 불과하며, 나머지 일부 지역이 1:250,000 지질도로 발간되어 있으나 자료로 이용하는데 무리가 있었다.

1 : 50,000 철원-마전리 도폭에서 산출되는 암종은 15종으로 다양하나 본 연구에서는 이를 보다 단순화시켜 크게 변성암, 화산암 및 화강암 등 3종의 암상으로 구분하였다(Fig. 4). 그 중 가장 우세한 암종은 운모 내지 석영 운모 편암, 천매암질암, 변성 니질암을 포함하는 변성암이고, 그 다음은 현무

강 우 량

산사태의 가장 중요한 발생 인자는 강우량이기 때문에 무엇보다 산사태가 발생하기 전의 강우 분포에 관한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 산사태가 집중적으로 발생한 지역의 강우량 분포를 파악하기 위하여 서울, 춘천, 철원, 강화 등 연구지역 내 또는 인접한 측후소에서 기록된 96년 1월 1일부터 12월 31일까지 년 강우량 자료와 같은 기간의 연평균 강우자료(Table 4) 및 집중강우가 있었던 96년 7월 26일부터 27일까지의 강우 자료를 수집하였다. 그림 5의 강우량 분포 곡선이 보여 주듯이 2일간의 강우량이 420mm인 등강우량선을 경계로 이북 지역에 산사태가 집중 발생하고 있음을 알 수 있다. 산사태가 집중하고 있는 철원 이북지역은 강우량 측정자료가 없기 때문에 강우량 곡선이 표시

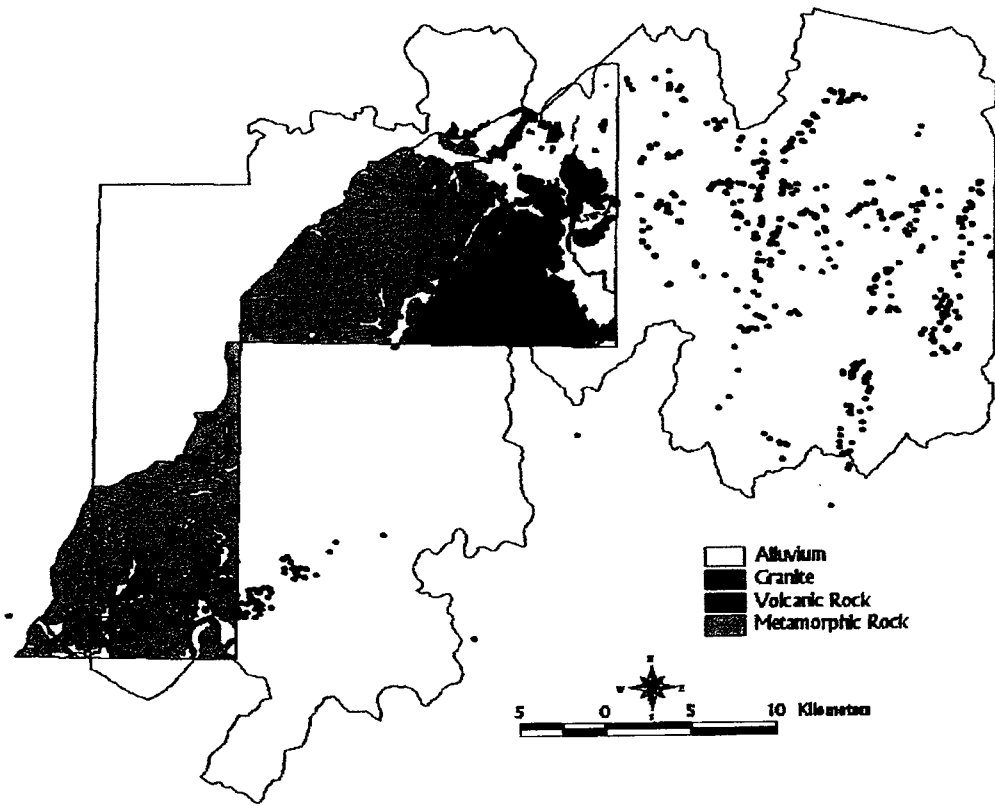


Fig. 4. Geological map of the study area ; black dots indicate locations of landslide.

Table 4. Precipitation of 1996 and mean monthly precipitation(MMP) at the same station.

(unit : mm)

Station	Month Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Tot.
		Chul-won	1996	21	2	59	49	62	227	745	78	8	57	59
	MMP	17	24	43	85	91	137	344	303	165	46	49	20	1324
Kang-wha	1996	15	1	66	57	27	274	650	58	8	67	54	2	1279
	MMP	18	20	37	86	90	142	314	330	162	43	50	20	1312
Chun-chon	1996	18	5	70	54	23	236	546	74	36	65	45	13	1185
	MMP	23	26	44	74	90	134	348	286	163	46	43	19	1296
Seoul	1996	16	1	78	62	29	250	513	132	11	90	63	11	1256
	MMP	23	25	47	94	92	134	369	294	169	49	53	22	1371

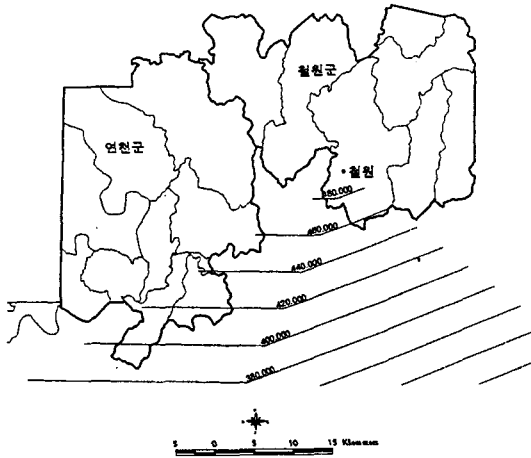


Fig. 5. Precipitation contour map of rainfall from July 26 to July 28, 1996.

되지 않았으나, 강수량 곡선의 경향으로 볼 때, 철원 북부의 강우가 남부에 비하여 많았을 것이라 예측할 수 있다.

산사태에 대한 강우량의 영향은 1년간의 강우 누적량이 연평균치를 상회할 경우, 비록 집중 호우가 없더라도 산사태를 일으킬 수 있으며, 이때 두 값을 이용해 산사태 반응 지수를 구하여, 산사태 취약성을 정량적으로 계산하는 방법이 고안되었다 (Olivier et al., 1994). 그러나, 연구지역에서는 산사태가 발생한 해인 1996년의 12개월 동안 강우 누적량과 30년간의 연평균 강우 누적량에서 차이점을 거의 발견할 수 없었다. 또한 1996년 1월 1일부터 6월 30일까지의 강우 누적량도 1월부터 6월까지의 연평균 누적량과 차이점을 보이지 않는다(Table 4, Fig. 6).

그림 6은 철원지방의 1996년의 강우 누적량과 연평균 강우 누적량을 표시한 그림으로, 이 지역의 1996년도 누적 강우량은 연평균 누적량과 거의 같

게 나타나고 있다. 그러나, 7월부터 누적곡선은 급격한 상승을 보인다. 1996년 7월의 강우량에서 7월 26-27 양일간의 강우량(Table 5)을 제할 경우 산사태가 일어난 1996년 7월의 강우량은 오히려 연평균 7월의 강우량보다도 적은 수치여서, 1996년 7월의 누적곡선 상승은 2일간의 집중 강우가 주도한 것으로 볼 수 있다. 따라서 이 지역의 산사태는 누적강우에 의한 결과가 아니고, 집중 강우에 의한 결과로 해석하였다.

연구지역의 1996년도의 산사태를 Olivier의 반응지수(Cf)에 의하여 해석하면 다음과 같다.

$$Cf = Cc + Ce = 1.41$$

여기서 Cf : coefficient of final landslide response

$$Cc(\text{cyclic coefficient}) = \text{CPR} / \text{MAP} = 1.038$$

$$Ce(\text{event coefficient}) = \text{PRE} / \text{MAP} = 0.372$$

$$\text{CPR} : \text{cumulative precipitation record} \\ 1,375$$

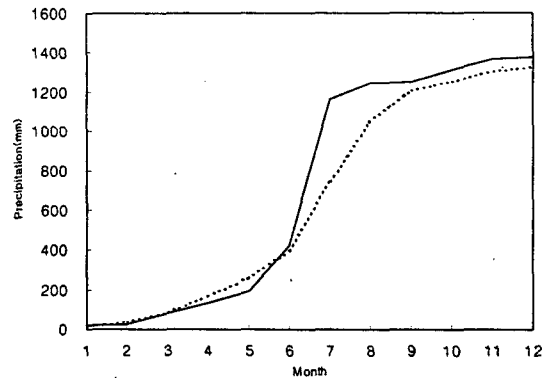


Fig. 6. Cumulative precipitation curves of rainfall data in Chulwon, 1996; the solid line indicates precipitation of 1996 while the dotted means that of mean monthly precipitation.

Table 5. Daily and hourly maximum precipitation records of rainfall in the study area.

Station	Daily records(mm)		6 hour records(mm)		1 hour records(mm)	
	July 26	July 27	July 26	July 27	July 26	July 27
Chulwon	225	268		142		45

MAP : mean annual precipitation=1,324
 PRE : precipitation record of event=493

Olivier에 의하면 산사태는 산사태 반응지수(Cf)가 1 이상 일 때부터 발생할 수 있고 값이 커질수록 발생확률은 높아진다고 하였다. 또한 평균 강우량보다 20% 이상의 집중 강우량이 발생할 경우 대규모(major) 사태발생 가능성이 있을 수 있음을 보고하였는데, 1996년 칠원지역에서의 누적강우는 연평균 누적강우 보다 불과 4% 높고, 1월부터 6월까지의 누적강우는 연평균치와 거의 같은데 반하여, 집중강우 지수(Ce)는 37%로 나타나고 있다. 따라서, 연구지역의 산사태 발생은 Olivier의 방법을 적용하였을 경우 누적 강우에 의한 원인보다 집중 강우에 의한 원인으로 발생된 것이라 해석된다.

연구지역에서 산사태가 발생한 7월 26-27일 양 일간의 강우량은 7월 한달 간 평균강우량인 456mm의 1.1배에 달하고, 특히 27일에는 6시간 동안 142mm의 강우량을 보여 1일 강우량의 53%를 차지하고 있다. 또한 6시간 동안의 최대 시간당 강우량은 45mm로서 이는 6시간 동안 총 강우량의 1/3에 해당된다(Table 5). 그러므로, 연구지역의 산사태가 27일 대부분 발생한 것은 단시간 동안의 집중된 강우에 기인되었을 것으로 보인다.

지 형 분 석

산사태 연구에서 지형분석은 가장 중요한 부분을 점하고 있으며, 최근에는 지형공학(Engineering Geomorphology)이라는 독립적 학문으로까지 발전하였다. 산사태는 지형 발달의 한 과정이므로 지형의 형태는 산사태 취약성과 밀접하게 연관된다(Johnes, 1983, Griffiths et al., 1990).

본 연구에서는 DEM(Digital Elevation Model)을 이용하여 지형을 분석하였다. DEM은 수치고도자료로서 지형자료를 수치로 저장한 자료로서 컴퓨터를 이용하여 지형분석을 하는데 사용된다. 본 연구에서 사용된 DEM 자료는 1:50,000 축척 지형도상의 20m 간격의 등고선 및 고도값을 입력하고, 이를 30m×30m 간격의 격자로 재구성하여 각 격자당 하나의 고도값을 갖는 DEM 자료로 변환된 것이다. 등고선 입력방법은 스캐닝(scanning) 및 디지털이정

(digitizing) 방법이 있는데, 여기서는 스캐닝 방법을 사용하였다. 즉 도면을 스캐너를 통해 스캐닝한 후, 그 자료를 벡터자료로 바꾸어 주는 벡터라이징을 실시한 후 편집을 하였다. 그리고 나서 각각의 등고선에 고도값을 키보드를 통해 입력하였다.

DEM 자료를 이용하여 경사도, 경사방향, 곡률, 음영기복, 수문분석 등 각종 지형분석을 할 수 있다. 경사분석은 각 격자가 이웃한 격자와의 변화율을 계산한 것이고, 경사방향분석은 각 격자가 이웃한 격자와의 경사가 향하는 방향을 분석한 것이다. 이와 같은 과정을 거쳐 본 연구에서 분석된 지형자료는 고도, 경사 및 경사방위 등으로 각각의 빈도수와 산사태 취약성과의 상관성을 살펴 보았다.

산사태와 지형고도

연구지역의 지형고도는 최저 20m부터 1,200여m까지 다양하여 대체로 험준한 산세를 나타내고 있다. 지형고도에 따른 면적비와 산사태 빈도수의 분석결과(Table 6)에 의하면, 취약한 곳은 대체로 고도 400m 이하이다. 특히 200-300m 고도에서 전체 산사태의 50% 이상이 발생하였다(Fig. 7). 단위 면적당 빈도(Table 6)도 고도 200-300m에서 1.27개로 가장 높아, 평균 빈도 0.65개의 2배를 상회하고 있다. 400m 이상 고도에서도 81개의 산사태가 발생되었으나 이는 계곡을 따라 일어난 도랑형 사태가 대부분인 것으로 확인되었다.

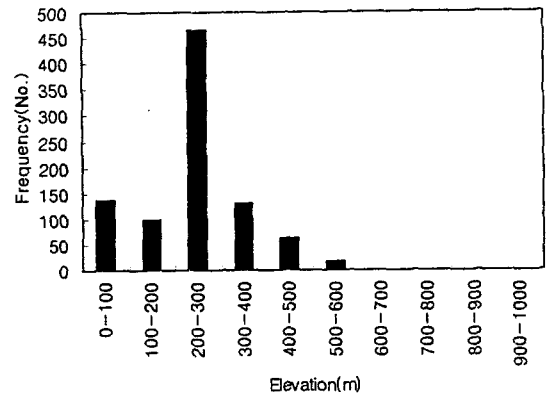


Fig. 7. Histogram shows relations between landslide frequency and topographic height; elevation of 200-300m show the highest frequency of landslide.

Table 6. Relations between topographic height and landslide frequency.

Height(m)	Area(km ²)	Area(%)	Frequency(No.)	Freq./km ²
0 - 100	290	20.7	139	0.38
100 - 200	409	29.18	99	0.24
200 - 300	367	26.21	465	1.27
300 - 400	151	10.78	132	0.87
400 - 500	91	6.5	63	0.69
500 - 600	48	3.39	18	0.28
600 - 700	24	1.72	0	0
700 - 800	13	0.92	0	0
800 - 900	6	0.43	0	0
900 -1000	2	0.15	0	0
Total	1,402	100	916	avr. =0.62

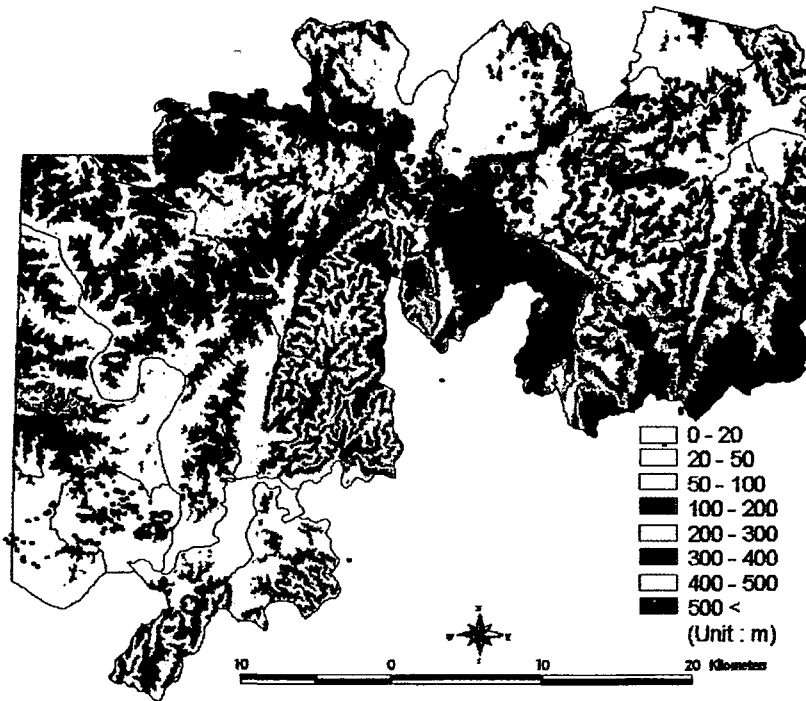


Fig. 8. Map showing landslide locations associated with topographic height.

연구지역 서남부인 연천군 미산면일대는 사람이 생활하는 지형고도가 50m 이하이고, 철원읍을 중심으로 한 중앙부는 100-200m, 그리고 연구지역 동부는 200-300m로 높아지고 있다(Fig. 8). 산사태 발생지점의 고도를 보면 100m 이하에서 일어난 139개는 모두 연구지역 서남부에 위치한다. 반면 중앙부에서는 200-300m에서 가장 높은 빈도수를 보이며, 그 다음으로 100-200m와 300-400m 고도에서 비슷한 빈도를 보이면서 분포한다. 동부에서는 300-400m 고도에서의 빈도가 가장 높고 그 다음이 200-300m 고도에서 나타나고 있다. 결국 대부분의 산사태는 사람들이 생활하는 표고로부터 100m 보다 높지 않은 위치에서 발생되고 있어, 대규모 산사태가 일어날 경우 직접적으로 인간에게 많은 피해를 야기 할 수 있음을 뜻한다.

산사태와 사면경사

산 사면의 경사는 산사태, 특히 암설유동(debris flow)인 경우 매우 중요한 의미를 갖는다. 일본 전

역에서 일어난 대규모 암설유동을 분석한 결과 10-20° 사이의 산 사면에서 70% 이상이, 5-10° 산 사면에서 20%가 발생하였고, 40° 이상 경사면에서는 극히 미미한 것으로 보고되었다(Ikeya, 1989). 연구지역에서 확인된 산사태들도 대부분 5-25° 사이에 집중되는 현상을 보여 일본의 경우와 유사한 양상을 나타내고 있다(Table 7). 연구지역에서는 사면경사 10-20° 사이의 저 경사면에서 약 50%의 산사태가 집중되고 있으며, 40° 이상의 고 경사면에서는 19개만이 발견되었을 뿐이다(Fig. 9).

그러나, 단위 면적당 산사태 빈도는 경사의 완급에 크게 지배되지 않는 것으로 보인다(Table 7, Fig. 10). 그림 10에서 경사가 급하여 질수록 산사태 빈도가 높아지는 듯 하지만 경사 50° 이상의 경사면에서 일어난 소규모 지역(전체지역의 0.37%)을 제외할 경우, 10-20°에서의 산사태 빈도는 평균빈도보다 1.43배 높다.

Table 7. Landslide frequency associated with slope inclination.

Slope (degree)	Area(%)	Frequency(number)	Frequency(%)	Freq./km ²
0-5	30.55	74	8.08	0.17
5-10	17.09	159	17.36	0.67
10-15	17.15	254	27.73	1.06
15-20	14.28	190	20.74	0.95
20-25	9.78	105	11.46	0.77
25-30	5.97	65	7.10	0.77
30-35	2.94	39	4.26	0.95
35-40	1.10	11	1.20	0.73
40-45	0.51	6	0.66	0.86
45-50	0.29	2	0.22	0.50
50-55	0.20	4	0.44	1.43
55-60	0.12	5	0.55	2.50
60-65	0.04	2	0.22	5.71
65-70	0.01	0	0	-
Total	100	916	100	

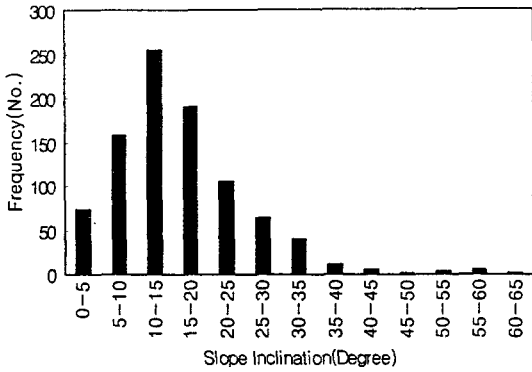


Fig. 9. Histogram showing relationship between slope inclinations and landslide frequency.

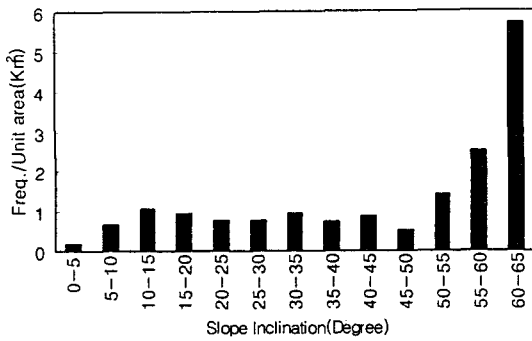


Fig. 10. Histogram showing landslide frequency per unit area within the given slope inclinations.

산사태의 방향성 빈도

지형의 발달은 지질구조와 밀접히 연관되어 있어(Brunsdan et al., 1975), 산사태의 방향성은 산사태의 지질구조 연관성을 판단하는 중요 척도가 될 수 있다. 본 연구에서도 산사태와 방향성의 상관성을 검토한 바(Table 8), 지질구조와의 특징적 상관성은 발견하지 못하였다. 다만, 우리나라에서 전반적으로 우세하게 발달되는 지질구조인 NE방향과 일치되는 산사태가 약간 높은 빈도를 갖는 것으로 확인되었으나, 그 연장인 SW 방향으로는 미약한 분포를 보인다.

산사태 빈도수는 동서방향을 경계로 북측방향이 우세하게 나타난다(Fig. 11). 단위 면적당(1 km²) 빈도는 북쪽 사면에 해당되는 북서방향에서 동쪽 방향까지(방위각: 315°-090°) 평균 1.47개인 반면, 남쪽 사면인 남동방향에서 서쪽 방향(방위각: 135°-270°)까지의 평균 빈도는 0.75개에 불과하여, 북쪽 사면이 남쪽에 비하여 2배의 빈도를 보이고 있다. 그러나, 이러한 현상이 어떠한 요인에 의한 현상인지는 밝혀지지 못하였다. 다만, 위에서도 언급되었듯이 지질구조의 영향은 아닌 것으로 해석된다. 아마도 기타 요인, 예를 들면 암석의 풍화정도, 토양 심도, 동결지수 또는 식생 등의 차이가 서로 다른 산사태의 취약성을 나타내는 요인이 될 수 있을 것이다.

Table 8. Relation of topographic aspect to landslide frequency.

Aspect	Area(km ²)	Area(%)	Frequency	Freq./Area
1. Flat area	124	8.86	0	0
2. N	145	10.35	135	1.43
3. NE	142	10.16	151	1.62
4. E	155	11.05	149	1.47
5. SE	151	10.79	90	0.91
6. S	150	10.73	64	0.65
7. SW	166	11.83	65	0.60
8. W	194	13.82	109	0.86
9. NW	174	12.42	153	1.34

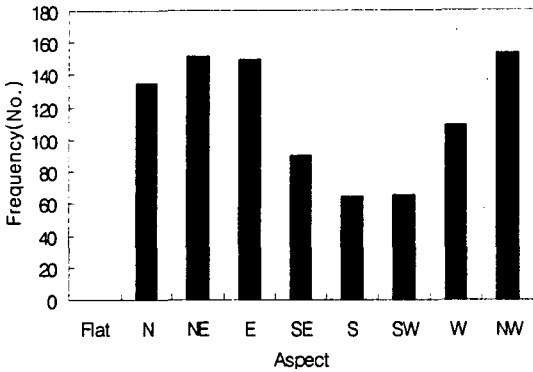


Fig. 11. Histogram shows relations between topographic aspect and landslide frequency.

토 의

Varnes(1978)는 세립물질이 50%를 초과하지 않는 범위 내에서 암편과 세립질 모래, 실트, 점토들이 서로 혼재된 상태의 물질을 암설(debris)이라 정의하였다. 암설유동(debris flow)은 산사태 발생지점에 가하여지는 수압과 암편들의 중력이 복합적으로 작용한 결과에 의하여 발생되지만 토양이 50% 이상으로 구성된 토양유동(sediments flow)은 단지 수압에 의하여 발생된다(Ikeya, 1978). 따라서, 암편의 함량이 많으면 많을수록, 암편의 크기가 크면 클수록 그 규모와 속도가 커지게 된다.

연구지역에서의 붕괴물질은 대부분 암편, 붕적토양 및 잔류토양의 혼재양상으로 과거의 붕적층이 재 활동한 흔적을 보이며, 이들 중 대부분은 저각도 산록에 형성되어 있다. 이들은 크고 작은 암편을 다량 함유하고 있어 투수성이 양호하므로 상대적으로 높은 산사태 위험성을 내포하고 있었던 것으로 판단된다. 히말라야 고산지대에서의 붕적물질에 의한 대규모 산사태나, 석탄광 지역의 폐석붕괴 등이 이와 유사한 현상으로 볼 수 있다(Albalagan et al., 1996 ; Almasmoum et al., 1996).

지형의 형태는 침식과 사면붕괴 과정을 통하여 크게 지배되므로 산사태 취약성 평가를 위해서는 지형 분석이 매우 중요한 요소이다. 또한 침식과 사면붕괴는 암석의 종류, 지질구조의 발달상태 또는 경작, 산림 등 여러 요인에 따라 형태를 달리하

기 때문에 지형분석은 산사태의 메카니즘을 여러 각도에서 평가할 수 있는 도구로 활용된다.

연구지역에서 사태의 빈도가 높은 지형고도는 사람이 생활하고 있는 고도(ground level)로부터 불과 100 여m 상부이다. 특히 지형경사 25° 미만의 경사면에서 대부분의 사태가 발생되었고, 그 중에서도 10-20°의 저각도 산록부에서 가장 높은 빈도를 보인다. 이러한 현상은 오랜 시간을 경과하면서 상부로부터 흘러내린 암편, 토양 등의 붕적물질이 산록에 퇴적된 후 재 활동한 증거로 볼 수 있다. 그러므로, 연구지역의 붕적층 사태는 활동상태(state of activity)로 분류할 경우 재활동(reactivated)에, 형태상으로는 붕적층이 주도한 암설유동(debris flow)으로 분류된다(UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1993).

산사태 규모는 대부분 연장 100m 미만이고 깊이도 1m 내외이다. 만일 붕적물질이나 세립 토양이 기반암 상부에 깊게 쌓였거나 풍화잔류토양이 깊을 경우에는 호상 또는 준호상형의 사태가 발생되었겠지만, 연구지역에서는 붕적물질이나 잔류토양이 얇게 발달되어, 기반암을 경계로 한 얇은 변이형(transitional) 사태가 주로 발생된 것으로 판단된다. 이는 사태가 계속 재 반복되므로 토양이나 붕적물질이 대량으로 쌓이지 못한데 기인되었을 것이다.

암석의 종류에 따른 단위면적당 산사태 빈도 비율이 화강암 분포지에서 크게 우세하고 분출화산암과 변성암에서 상대적으로 낮은 이유는, 화강암의 풍화정도가 타 암종에 비하여 우세하기 때문인 것으로 보인다. 이는 결과적으로 화강암지역의 풍화잔류토와 붕적물질이 타 암종보다 투수성이 높고 전단응력에 취약한 세립물질을 상대적으로 다량 함유하고 있을 것이기 때문에 붕괴와 침식에 취약하였던 것으로 판단하였다.

강우는 산사태를 일으키는 직접원인이다. 그러나 같은 강우량에 의하여 사태가 발생하는 지역이 있고 그렇지 않은 지역이 있다. 지형분석이 산사태 평가에 중요 의미를 갖는 이유는 같은 강우량에 의해서 취약한 지형과 그렇지 않은 지형을 판별하는데 있다(Coate D., 1976). 지형에 따른 산사태 취약성 분석은 연구지역의 산사태들이 동일한 강우조건 하에서 발생되었기 때문이다. 강우에 의한 산사태 발생은 누적 강우에 의하는 경우와 집중강우에 의

하는 경우 등으로 구분할 수 있다. 전자는 지표로부터 물이 서서히 스며들어 간극수압(pore water pressure)이 상승하고 붕괴사면의 전단응력이 저하되어 파괴가 일어나며, 이때는 호상붕괴(circular failure)나 암반 슬라이드가 우세하다. 후자의 경우 단시간내에 발생하는 과수압(excess pore water pressure)과 지표수의 부유력(floating force)에 기인되며, 이때는 큰 암편을 많이 함유하는 암설유동의 형태가 주로 발생하게 된다(Vanes, 1978). 연구지역의 산사태는 26-27일 양일간의 집중강우, 특히 27일 5-10 여시간 동안의 집중강우가 큰 역할을 하였으리라 생각된다. 연구지역의 대부분 산사태가 집중 강우에 취약한 쇄설유동 형태를 띠고 있다는 사실이 그 증거이다.

결 론

1996년 7월의 집중 호우로 산사태 피해가 심하였던 경기도 연천군 및 강원도 철원군일대의 1,400km² 범위를 연구지역으로 선정, 산사태의 지형적 취약성과 유형을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 지형적 취약성 분석을 위하여 916개를, 유형분석을 위해서 66개의 산사태 자료를 이용하였다.

1. 2일간의 강우량이 420mm이상인 지역에서 집중되었다.

2. 대부분의 산사태는 집중 강우시 전형적으로 유발되는 암설유동(debris flow)과 토양 유동(sediments flow)으로 구분할 수 있고, 이중 전자가 66%, 후자가 23%를 점한다.

3. 붕괴 물질(sliding material)은 붕적물(colluvium)과 풍화잔류토(residual soil)가 주종이며, 63%의 산사태는 붕적층과 풍화 잔류토양이 복합적으로 파괴된 형태를 띤다.

4. 파괴 형태로 분류하면 대부분의 산사태는 파괴 심도가 얇고 파괴면이 거의 직선인 변이형(transitional)에 속한다. 이와 같은 현상은 산사면을 따라 사태와 침식이 지속적으로 진행되는 재 활동(reactivation)의 결과에 의하여 기반암 상부 층의 심도가 얕아진 결과 이다.

5. 연장 20-29m 범위의 산사태가 전체의 35%로

가장 우세하고, 40-59m(29%), 60-79m(11%), 80-99m(9%) 순이며 100m를 초과하는 산사태는 전체의 10% 미만이다.

6. 산사태의 연장이 길어질수록 폭도 비례하여 넓어진다. 산사태 발생 위치에 따라 연장과 폭의 상관관계가 차이를 보이는데, 위치가 계곡, 평탄사면, 능선의 순서로 연장에 대한 폭이 상대적으로 넓어지는 경향을 보인다.

7. 화강암이 변성암보다 4.7배, 화산암보다 2.7배 산사태 취약성이 높은 것으로 분석하였다. 이는 화강암의 풍화 정도가 상대적으로 높아 투수성이 높아졌고 결과적으로 전단응력이 저하된 결과로 해석하였다.

8. 산사태 발생은 96년 7월 26-27일의 집중강우가 직접원인이다. Olivier의 산사태 반응 지수에서 집중강우지수(0.372)가 누적강우지수(1.038)의 10배에 해당되어 산사태는 집중 강우지수에 의하여 주도되었음을 알 수 있다.

9. 대부분의 산사태는 지형고도 400m 이하에서 발생되었고, 전체 산사태의 50% 이상이 고도 200-300m 범위에서 발생하였다. 대부분의 산사태는 사람들이 생활하고 있는 표고에서 100m 보다 높지 않은 위치에서 발생하고 있다. 이는 인간이 산사태에 의하여 직접 피해를 당할 수 있는 위치에서 발생되고 있음을 뜻한다. 단위 면적당 산사태 빈도도 400m 이하에서 높은 편이다. 200-300m 고도에서의 단위 면적당 빈도는 고도에 따라 산출된 평균 빈도의 2배를 상회한다.

10. 50% 이상의 산사태는 10-20° 범위의 저 경사면에서 발생하였다. 경사 50° 이상의 소규모 지역(전체 지역의 0.37%)에서 일어난 도랑형(gully) 사태를 제외하면 단위 면적당 산사태 빈도는 km² 당 평균 0.74개이고 10-20°경사면에서는 1.06개로 평균치 보다 약간 높다(1.43배).

11. 북측 사면이 남측 사면에 비하여 2배 높은 산사태 빈도를 보인다. 이 원인이 지질구조의 영향은 아닌 것으로 해석되나 명확한 원인은 밝히지 못하였다. 그러나 암석의 풍화 정도, 토양 심도, 동결 지수, 식생 등의 차이가 원인이 될 수 있을 것으로 보이며, 이는 앞으로 해결되어야 할 문제이다.

참 고 문 헌

- 기상청, 1996, 기상청연보, 09200-73320-26-7, 241p.
- 최위찬, 최성자, 박기화, 김규봉, 1996, 철원-마전리 지질조사 보고서, 한국자원연구소, 38p.
- Almasmoum, A., Bentley, S. P. and Siddle, H. J., 1996, An historical review of landslide research in the South Wales coalfield, *Geotechnical and Geological Engineering*, 14, 21-40.
- Anbalagan, R. and Singh, B., 1996, Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrain-a case study from Kurmaun Himalaya, India, *Engineering Geology* 43, 237-246.
- Brunsdon, D., Doornkamp, J. C., Fookes, P. G., Johns, DKC, and Kelly, JM, 1975, Large scale geomorphological mapping and highway engineering design, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 8, 227-253.
- Coates, D.R., 1976, *Geomorphology and engineering*, Dowden, Hutchinson & Ross Inc., 360.
- Craig, R. F., 1983, *Soil Mechanics*, 3rd edition, Van Nostrand Reinold Co., 419p.
- Dearman, W. R. and Fookes, P. G., 1974, Engineering geological mapping for civil engineering practice in the UK, *Quarterly Engineering Geology*, 7, 223-256.
- Gokceoglu, C. and Aksoy, H., 1996, Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region by deterministic stability analyses and image processing techniques, *Engineering Geology* 44, 147-161.
- Griffiths, J. S. and Hearn, G. J., 1990, *Engineering Geomorphology*, Bull. of engineering Geology, No. 42, 39-44.
- Ikeya, Hiroshi, 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, Bull. of the IAEG, No. 40, 15-33.
- Johnes, D. K., Brunsdon, D. and Goudie, A. S., 1983, A preliminary geomorphological assessment of part of the Karakoram highway, *The Q. J. of Engineering Geology*, Vol. 16, No. 4, 331-355.
- Olivier, M. Bell, F. G. and Jemy, C. A., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, *Proceedings 7th intern. Cong. IAEG Vol. 3*, 1629-1636.
- Spence, K. J. and Guymer, I., Small scale laboratory flowslides, 1997, *Geotechnique* 47, No. 5, 915-932.
- UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1990, A suggested method for reporting a landslide, *Bull. of IAEG*, No. 41, 5-12.
- UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1993, A suggested method for describing the activity of a landslide, *Bull. of the IAEG*, No. 47, 53-57.
- Vanes, D J., 1978, *Slope movement types and process*, National Academy of Science, Washington, D C., special report, 2, 11-33.

김원영, 김경수, 채병곤

한국자원연구소 지구환경연구부

305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

TEL : (042)868-3345

FAX : (042)861-9719

이사로

한국자원연구소 지질연구부

305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

TEL : (042)868-3057

FAX : (042)861-9714