

지질조건에 따른 자연사면 산사태의 기하학적 특성

김경수* · 송영석 · 채병곤 · 조용찬 · 이춘호

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Geometric Characteristics of Landslides on Natural Terrain according to the Geological Condition

Kyeong-Su Kim*, Young-Suk Song, Byung-Gon Chae,
Yong-Chan Cho, and Choon-Oh Lee

Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

자연사면에서의 산사태를 평가함에 있어 발생양상과 기하특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 이 연구는 지질을 달리하는 3개지역(장흥, 편마암류; 상주, 화강암류; 포항, 제3기퇴적암류)에서 발생한 산사태를 대상으로 지질조건에 따른 산사태의 기하양상을 분석하였다. 3개지역에서는 1998년 여름에 150~588 mm의 집중호우로 인해 총 1,582개의 산사태가 발생하였다. 이들 산사태를 조사하여 지질조건별 기하특성을 분석하였다. 산사태는 90% 이상의 사면고도에서 발생빈도가 가장 높고 70% 미만의 고도에서는 매우 낮다. 사면경사는 26~30° 범위에서 가장 많이 발생하였고 20° 미만에서는 발생빈도가 매우 낮으며 이러한 양상은 지질별로 거의 유사한 경향성을 보였다. 규모는 부피로 보아 수십부터 수백을 넘는 경우도 있으며, 그 길이는 5~300 m, 폭은 3~50 m로서 좁고 긴 형태이고 깊이는 대부분 1 m 이내로서 매우 얇은 특징을 보였다. 그리고 유형은 기반암의 표면을 파괴면으로 하여 그 상부에 위치한 토층이 미끄러지는 전이형슬라이드가 주를 이루며, 토석류로 이뤄진 사태물질이 하부사면과 계곡부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다.

주요어 : 산사태, 자연사면, 기하특성, 지질조건, 집중강우

The recognitions of geometrical characteristics and occurrence conditions are very important to evaluate the landslides in natural terrains. In this paper, the geometrical characteristics of landslides are analyzed according to a geological condition in three landslides areas. The three landslides areas are classified to the geological condition. The three landslides areas are Jangheung, Sangju and Pohang. The geology of Jangheung area, Sangju area and Pohang area is gneiss, granite, and the tertiary sedimentary rock, respectively. During a heavy rainfall of 150~588 mm in these areas, 1,582 landslides have occurred in 1998. The geometrical characteristics according to the geological condition analyzed from the investigation of these landslides. The frequency of landslide is high exceedingly above 90% of a slope attitude, while the frequency is very low below 70%. The frequency of landslide is high exceedingly between 26° and 30° of slope angle, while the frequency is very low below 20°. The size of the landslides is ranged from several tens to several hundreds. The length is ranged from 5 m to 300 m, and the width is ranged from 3 m to 50 m. Also, the depth is less than 1m. Therefore, the landslides in these areas have small width, long length and shallow depth. The type of the landslides is changed from transitional slide at the scarp to debris flow at the low part of slope.

Key words : landslides, natural terrain, geometric characteristics, geological condition, heavy rainfall

서론

산사태 발생에 있어서 지형조건은 중요한 요소의 하

나로서 지형공학(engineering geomorphology)이라는 독립적 학문으로까지 발전하였다. 왜냐하면, 자연사면의 형태는 지형변화에 의해서 결정되고 산사태는 지형변화의

*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

한 과정이기 때문이다. 그러므로 지형조건은 산사태발생 및 취약성과도 밀접하게 연관되며, 사면의 파괴요소 중 가장 중요한 사면의 기하형태(slope geometry)를 결정해 준다. 지형조건은 산사태 발생과정을 크게 지배하므로 산사태의 기하학적 특성을 조사하기 위해서는 산사태 발생지역의 지형조건을 분석하는 것이 우선되어야 한다. 이는 지형의 발달과정이 암석의 종류나 지질구조의 발달상태에 따라 형태를 달리하기 때문으로 지형특성은 산사태의 발생메커니즘을 분석하기 위한 중요한 요소이다. 산사태는 지반공학적 측면 뿐 아니라 지형학, 수문학, 지질공학 및 지질학적 측면에서도 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 이들 연구결과에 의하면 토층의 전단 및 인장강도, 지하수의 영향, 오목한 지형(hollow)을 포함한 사면형상 등이 산사태 발생에 중요한 요소들로 간주되고 있음을 알 수 있다(Dietrich and Dunne, 1978; Selby, 1993; Montgomery *et al.*, 2000; Chigira, 2002). 현재까지 활동면 상 혹은 활동면 하부에 존재하는 기반암층은 산사태 발생과 관련하여 다소 부차적으로 간주되는 경향이 있었다. 그러나 지질공학 혹은 지질학적 측면에서 기반암층은 상부토층의 특성에 가장 큰 영향을 미치므로, 기반암층의 지질특성은 산사태 발생메커니즘을 규명하는데 중요한 요소 중의 하나가 된다. 특히, 김원영 외(2000)는 산사태가 지질조건과 관계가 있을 것으로 예상하고 같은 시기에 한 지역에서 발생한 산사태를 조사한 바 있는데, 지질별 단위면적당 산사태 발생빈도를 조사한 결과, 편마암지역이 45%로서 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 다음으로 편암과 화강암지역이 각각 32% 및 23%인 것으로 나타났다. 따라서 편마암이나 편암지역이 화강암류지역에 비해 산사태에 더 취약할 수 있음을 지적하였다.

본 연구에서는 지질 및 지형조건이 서로 다른 산사태 발생지역을 대상으로 현장조사를 실시하였으며, 현장조사 결과를 이용하여 산사태의 발생위치, 경사, 규모 및 산사태유형 등의 기하특성을 파악하였다. 그리고 산사태 발생지역의 지질 및 지형조건에 따른 산사태 기하특성을 파악하였으며, 이들 결과를 토대로 우리나라 자연사면의 산사태에 대한 기하학적 특성을 분석하였다.

산사태의 기하학적 연구

고도 및 경사

지형고도와 사면경사는 산사태를 유발하는 결정인자들 중의 하나로서 특히, 토석류산사태인 경우에 매우 중

요한 의미를 갖는다. 강우에 의해 발생된 자연지형에서의 산사태취약성을 평가한 Dai *et al.*(2001)에 의하면, 홍콩의 경우 지형고도와 사면경사가 산사태빈도와 관련성이 매우 깊으며 이들은 산사태분석의 필수적인 요소를 밝혔다. 그리고 100~500 m의 구릉사면(hill slopes)은 100 m 미만과 500 m 이상의 사면에 비해서 산사태빈도가 2.7~6.4배나 더 높은 것으로 보고하였다. Ikeya(1978, 1989)에 의하면, 일본 전역에서 일어난 대규모 토석류산사태를 분석한 결과 10~20° 사이의 사면경사에서 70% 이상이, 5~10°에서 20%가 발생되었으며 40° 이상의 경사에서는 극히 미미한 것으로 보고되었다.

연천·철원지역을 대상으로 한 김원영 외(1998)의 연구에 의하면, 지형고도는 최저 20 m부터 1,200 m까지 다양하며 대체로 험준한 산세를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 산사태에 취약한 곳은 대체로 400 m 이하의 고도이고, 전체 산사태의 50% 이상이 200~300 m 고도에서 발생함으로써 평균치에 비해 2배 이상의 산사태빈도를 갖는 것으로 나타났다. 사면의 경사각 10~30°에서 높은 발생빈도를 보인 반면, 40° 이상에서는 극히 미미한 발생빈도를 보였다. 한편, 경기도지역을 대상으로 한 김원영 외(2000)의 연구결과에 의하면, 해발고도를 기준으로 하였을 경우 90% 이상의 사면고도에서 산사태 발생빈도가 가장 높고, 80~90%, 70~80% 순으로 고도가 낮아질수록 발생빈도가 감소하며, 70% 이하에서는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다. 그리고 사면경사는 26~30°에서 가장 많은 산사태가 발생하며 30° 이상의 경사에서는 발생빈도가 점점 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 보은지역을 대상으로 한 김경수 외(2000)의 연구결과에 의하면, 사면경사가 20° 미만이거나 40° 이상인 경우는 낮은 발생빈도를 보인 반면, 사면경사가 20~30°와 30~40°인 경우 매우 높은 산사태 발생빈도를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 강릉지역을 대상으로 한 조용찬 외(2003)의 연구결과에 의하면, 산사태가 발생한 지점의 사면고도는 50% 이상이 해발 40~100 m이고, 능선정상의 70~90%의 위치에서 주로 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 산사태 발생지역의 사면경사는 10~50°의 범위에 있으며, 그 중 16~30° 범위가 전체의 78%로서 가장 높은 발생빈도를 보이는 것으로 나타났다.

규모

산사태의 규모는 길이(length), 폭(width) 및 깊이(depth) 등으로 나누어 생각할 수 있다. 최 경(1986)은

전국 10개 지역 317개 산사태를 대상으로 길이, 폭, 깊이 및 면적 등 산사태의 규모별 발생빈도를 분석한 바 있다. 분석결과 산사태 길이는 20 m 이내가 50% 정도로 가장 많았으며 전체의 86%가 길이 100 m 미만이었다. 그리고 폭은 전체의 90%가 20 m 이하였으며, 깊이는 전체의 91%가 2 m 이하인 것으로 나타났다. 따라서 대부분의 산사태가 깊이는 얇고, 폭이 좁으며, 길이는 긴 토석류산사태의 전형적인 양상을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 산사태의 규모는 대체로 소규모인 것으로 나타났다.

용인·안성지역을 대상으로 한 김원영 외(2000)의 연구결과에 의하면, 산사태 길이의 경우 21~30 m에서 가장 높은 발생빈도를 보이는 것으로 나타났으며, 31~40 m, 11~20 m 및 41~50 m 순으로 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 그리고 폭은 전체 산사태의 80% 이상이 10 m 미만으로 매우 좁다고 하였다. 또한, 깊이는 대부분이 1 m 내외로서 매우 얇은 것으로 나타났다. 이처럼 대부분의 산사태는 길이가 길지 않고, 폭은 좁으며, 깊이가 얇은 것으로 조사되어 그 규모가 비교적 소규모인 것으로 나타났다. 한편, 강릉지역을 대상으로 한 김원영 외(2004)의 연구결과에 의하면, 산사태는 주로 21~40 m의 길이와 10 m 내외의 폭을 가지며, 비교적 소규모의 산사태인 것으로 나타났다.

유형

산사태의 유형(type)은 낙반(fall), 전도(topple), 슬라이드(slide), 측면퍼짐(lateral spread), 유동(flow) 및 크리프(creep) 등으로 분류되는데(UNESCO Working Party on Landslide Inventory, 1990), 이 중에서 낙반과 전도는 주로 암반사면에서 발생하게 된다.

파괴형태별로는 평면(planar), 쐐기(wedge), 단계(steped), 원호(circular) 및 준원호(semi-circular) 등으로 분류되며, 붕괴된 물질을 기준으로 구분하면 암석(rock), 토석(debris) 및 점토(mud) 등으로 분류할 수 있다. 특히, 활동(slide)은 2개 이상의 지층면을 따라서 전단파괴가 일어나는 현상으로서 회전형(rotational)과 전이형(translational)으로 구분된다(Varnes, 1978). 호우로 인해 발생된 대규모의 산사태는 일시적으로 급류의 흐름을 방해하고 사태물질이 물과 함께 이동하여 자연적인 둑(natural dam)을 이루게 된다. 이때 물과 섞인 많은 양의 사태물질들이 갑자기 아래로 흘러내리는 현상을 토석류(debris flow)라고 한다(Ikeya, 1989).

유동성산사태는 우리나라에서 가장 많이 발생하는 산

사태의 유형으로서 집중호우시 혹은 강우직후에 일어나며 토층은 간극수압(pore water pressure)과 포화도의 증가로 점착력이 약화되어 전단강도가 급격히 저하됨으로써 급경사지는 물론 완만한 경사에서도 쉽게 흘러내리는 특성을 보인다(한대석 외, 1997). 김원영 외(2000)에 의하면, 용인·안성지역에서의 산사태를 대상으로 한 유형분석 결과, 산사태의 89%가 전이형태의 토석류산사태이며 대부분의 산사태는 많은 물을 포함한 토석류들이 가파른 사면을 따라 흘러내리는 것으로 나타났다. 한편, 보은지역에서의 산사태를 대상으로 한 김경수 외(2000)의 연구결과에 의하면, 산사태의 97%가 토석류산사태에 속하는 것으로 나타났다. 이와 같이 우리나라에서 발생한 자연사면의 산사태는 대부분이 토석류산사태로서 유동형태이거나 전이형태를 보이는 것이 특징적이다.

연구지역

장흥지역

장흥지역의 지질 및 지형조건은 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 지질은 광역적으로 볼 때 크게 흑운모편마암과 일부 석영편암 및 화강암 등 3종의 지질로 구분되며(이병주 외, 1999), 이 중 흑운모편마암과 석영편암 등 변성암지역만을 연구대상으로 국한하여 정밀조사를 실시하였다. 이들 편마암과 편암은 여타 지역에서와 마찬가지로 광물학적으로 구성성분이 다르게 존재되어 있어 지역에 따라 다소 다른 암상을 보이고 있으나, 이 연구에서는 대표적인 암석명인 '편마암류'로 표현하였다. 한편, 지형은 연구지역의 동쪽은 비교적 고지대로서 다소 급한 사면경사를 이루고 있으며, 능선방향이 주로 남북방향을 향하고 있기 때문에 사면방향은 서측이거나 동측으로 향하는 경우로 크게 양분된다. 반면, 연구지역의 서쪽은 동쪽지역에 비해 비교적 낮은 사면지역으로서 다소 완만한 사면경사를 이루고 있음을 알 수 있다.

상주지역

상주지역의 지질 및 지형조건은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 지질은 광역적으로 볼 때, 화강암이 넓게 분포하고 있으며 일부 변성암류와 퇴적암류가 분포하고 있으나(김동학과 이병주, 1986; 원종관과 김기태, 1969), 이 중 연구대상을 화강암지역으로만 국한하여 정밀조사를 실시하였다. 화강암은 주라기의 보은화강암과 흑운모각섬석화강암 등이며 이들은 광물학적인 구성성분과 입도조성이 다소 다른 암상을 보이고 있으나, 이 연구에서

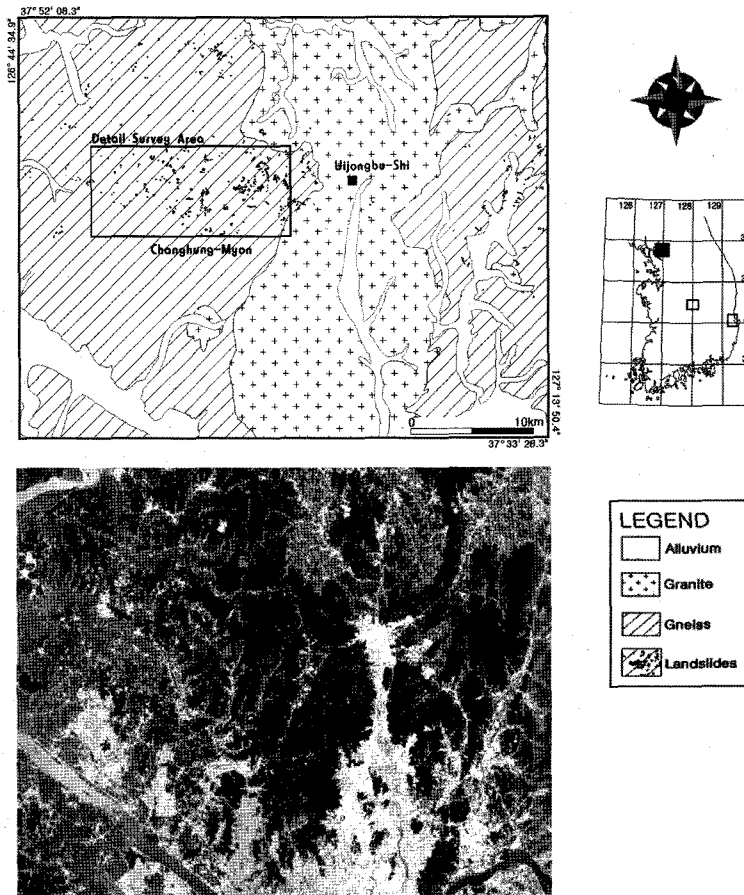


Fig. 1. Location of survey area, landslides on the geological map and satellite image at Jangheung area.

는 대표적인 암석명인 '화강암류'로 표현하였다. 한편, 지형은 전반적으로 산악지역으로서 비교적 고지대를 이루고 있다. 그리고 사면고도를 기준하여 70~80% 사면부터 능선까지의 높은 지역에서는 부분적으로 큰 규모의 암반노두들이 잘 발달되어 있음이 특징적이다.

포항지역

포항지역의 지질 및 지형조건은 Fig. 3에서 보는 바와 같다. 지질은 이암이나 세일 등 주로 제3기층의 퇴적암류로 이루어져 있다(암상호 외, 1964). 이들의 암상은 광물학적인 구성성분과 입도조성이 다르나 이 연구에서는 대표적인 암석명인 '제3기퇴적암류'로 표현하였다. 한편, 지형은 중앙부의 형산강을 중심으로 남측과 북측으로 구분되는데, 포항시가지를 중심으로 그 주변의 평지와 완만한 사면지역, 그리고 북측 대상구역의 북서쪽과 남측 대상구역의 남서쪽 사면지역으로 크게 구분

된다. 이들 사면지역은 전반적으로 낮은 고도를 이루고 있으나 사면경사는 대체로 급한 지형적 특성을 이루고 있다.

산사태의 기하특성

사면고도

산사태가 시작된 지점의 위치와 고도를 논함에 있어 각 지역들마다 절대고도가 다르기 때문에 단순히 평균 해수면을 기준으로 한 고도는 크게 의미가 없으며, 각 지역마다의 상대적 고도를 고려한 지방고도가 더 중요하다. 그러나 각 지역의 지방고도를 기준으로 하여 산사태를 표시할 경우 고도의 표현에 혼돈의 우려가 있다. 따라서 이 연구에서는 산사태의 고도는 평균해수면을 기준으로 한 지형고도를 사용하였다. 다만, 산사태 발생빈도를 분석함에 있어 산사태위치는 각 산사태마다 직하

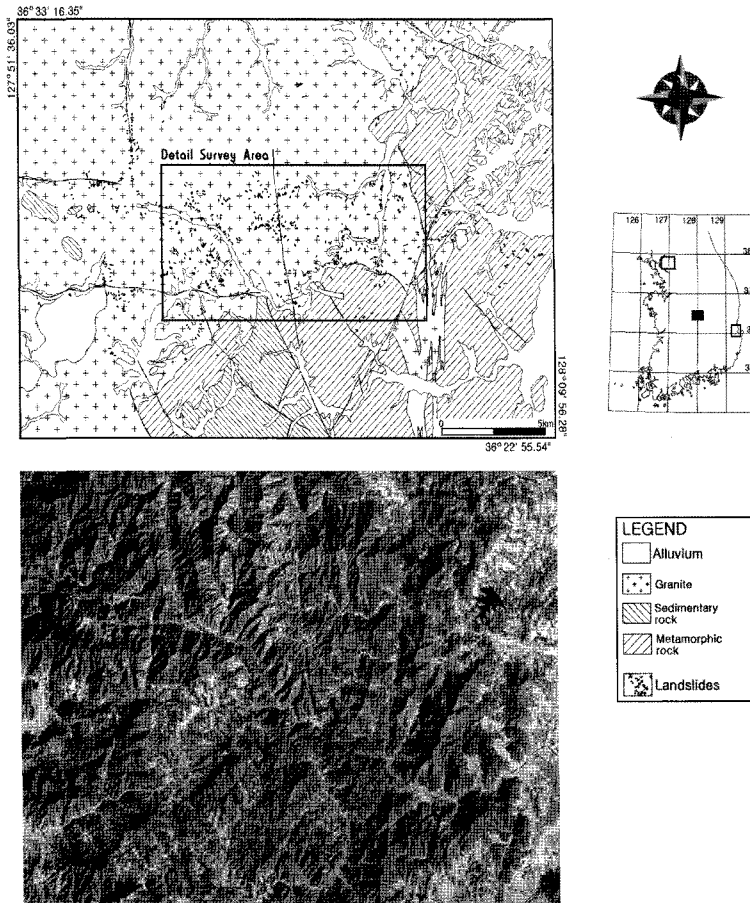


Fig. 2. Location of survey area, landslides on the geological map and satellite image at Sangju area.

부의 계곡이나 평지를 기준으로 하여 상부능선까지를 10 등분하고 이를 백분율로 나타낸 '사면고도'를 사용하였다.

사면고도로 기준하여 산사태빈도를 살펴보면, 3개 지역 모두 90% 이상의 값을 보이는 고도에서 발생빈도가 가장 높고 그 다음이 80~90%, 70~80%의 순으로 사면 고도가 낮을 수록 발생빈도가 감소하고 있으며, 고도가 더욱 낮아져 70% 이하로 내려가면 발생빈도가 급격히 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 산사태 발생빈도는 사면고도와 관계가 있으며, 능선부의 바로 아래부터 발생조건이 충족된 일정한 높이까지는 대체로 고도가 높을수록 발생빈도도 높고 고도가 낮아지면 발생빈도 또한 낮아지는 비례적 경향성을 보였다. 즉, 어떤 산사태가 시작된 지점으로부터 직상부의 능선이 지형고도로 500 m일 경우 450 m 이상(사면고도 90% 이상)에서 발생빈도가 가장 높고, 350 m 이하(사면고도 70% 이하)에

서는 발생빈도가 급격히 저하되는 것으로 볼 수 있다. 그 이유는 고도가 높은 곳에서는 기반암의 노출이 많아 산사태의 대상이 되는 토층이 얇게 분포되어 주로 풍화암에 영향을 받기 때문에 전단강도가 크며, 낮은 고도에서는 지형이 완만하여 붕적층이나 잔류토층이 두껍게 분포함으로써 지하수위의 영향을 적게 받기 때문일 것으로 생각된다. 하지만, 중간 고도에서는 산사태발생이 쉽도록 얇은 붕적층으로 분포되어 있기 때문에 산사태에 더 취약할 수 있다.

Fig. 4는 산사태가 발생한 위치를 표현한 것이다. 3개 지역에서 발생한 산사태의 78%가 사면부에서 발생하였고, 계곡부와 능선부는 각각 21% 및 1%로서 사면부에서 주로 발생된 반면, 능선부에서는 거의 발생되지 않은 것으로 확인되었다. 한편, 사면부의 단면형태는 크게 보아 평탄(planar)하고 우묵하거나 등성이(ridge)의 모양으

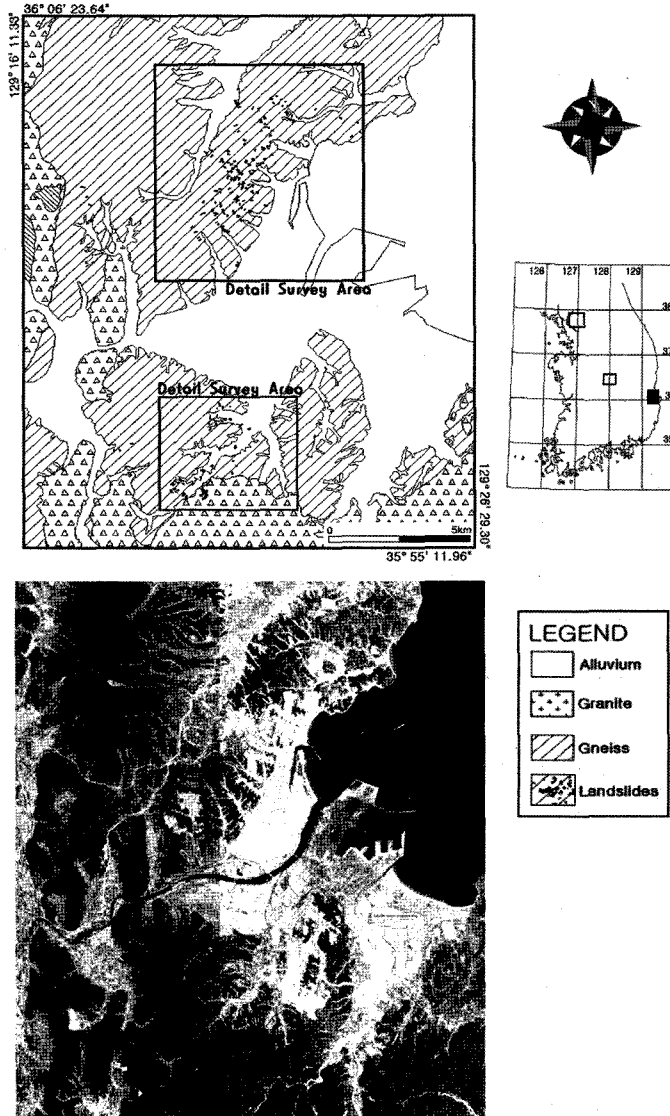


Fig. 3. Location of survey area, landslides on the geological map and satellite image at Pohang area.

로 구분될 수 있는데(Avanzi *et al.*, 2004), 사면부에서 발생한 산사태만을 대상으로 발생지점별 단면형태를 분석한 결과, 53% 정도가 평탄사면에서 발생함으로써 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 다음으로 40%는 약간 오목한 사면이고 나머지 7% 정도가 등성이의 순으로 나타났다. 이러한 현상들을 정리해 보면, 산사태는 사면고도가 70% 이상으로 비교적 높은 사면의 평탄하거나 약간 오목한 위치에서 주로 발생하여 직하부의 계곡까지 연장되는 양상을 보였다.

산사태 발생위치를 사면, 계곡 및 능선부로 구분하여 도시하고 이를 지질별로 살펴보면, 편마암류지역은 대체로 평탄하거나 약간 오목한 사면에서 발생하였는데, 총 77개의 산사태 중에서 약 68%인 52개가 사면부에서 발생하였으며 계곡부에서 발생한 산사태는 25개로서 32%를 차지함으로써 계곡에서보다는 사면부에서의 발생비율이 훨씬 높은 것으로 나타났다(Fig. 4(a)).

화강암류지역은 대체로 평탄한 사면에서 발생하였는데, 총 99개의 산사태 중에서 약 84%인 83개소가 평탄

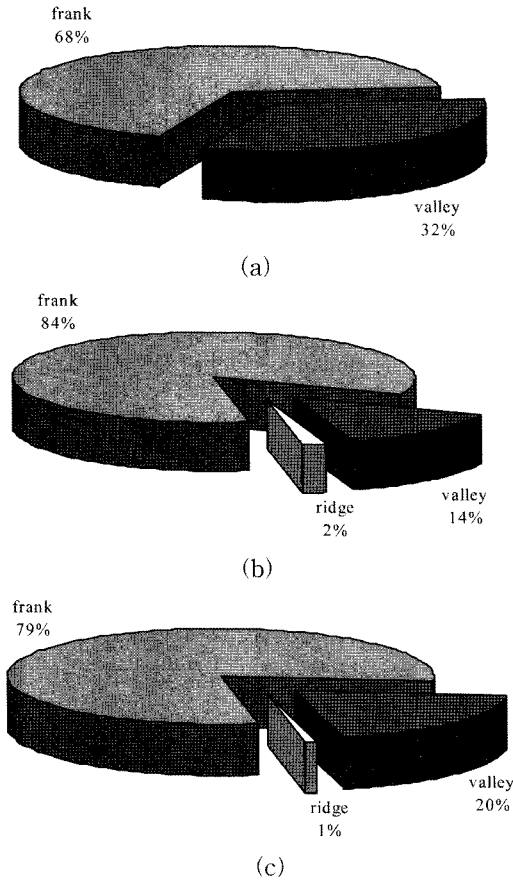


Fig. 4. Distributions of landslides occurrence position in the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

하거나 약간 오목한 사면에서 발생함으로써 가장 높은 비율을 차지하였다. 그 외 계곡부에서 발생한 산사태가 14개로서 14%를 차지하였고 능선부에서는 단 2개소에 서만 발생되었다. 이와 같이 산사태는 계곡이나 능선부에 비해 평탄한 사면에서의 발생비율이 훨씬 높음을 알 수 있다(Fig. 4(b)).

한편, 제3기퇴적암류지역은 총 283개의 산사태 중에서 평탄하거나 약간 오목한 사면에서의 발생빈도가 223 개로서 79%를 차지함으로써 압도적으로 높은 발생비율을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 다음으로는 계곡에서 발생한 산사태가 58개로서 20% 정도의 점유비율을 보였으며, 능선부에서 발생한 산사태는 단 2개로서 1% 정도에 불과하다(Fig. 4(c)).

사면경사

일반적으로 사면경사가 증가함에 따라 붕괴토와 잔류 토층에서 증력으로 유발된 전단강도도 더불어 증가하며, 완만한 구릉사면은 낮은 경사와 전단강도 때문에 산사태 발생빈도가 높아진다. 그리고 산사태 발생빈도는 평균적으로 완만한 경사보다는 가파른 사면에서 더 높은 경향인데, 3개지역 모두 경사각 20°까지는 발생빈도가 아주 낮고 20° 이상부터 증가하여 26~35°의 범위에서 가장 높았으며, 40° 이상에서는 급격히 감소하였다. 그 이유로 경사가 급한 사면은 대체로 노두가 발달된 기반 암들이 분포하여 훨씬 더 높은 전단강도를 가질 뿐만 아니라, 붕괴토나 잔류토로 분포된 토층이 아주 얇아서 산사태가 발생될 조건이 충족되지 못하기 때문일 것으로 생각된다. 반면, 경사가 중간정도인 사면은 붕괴토와 잔류토가 적당한 두께로 덮여 있기 때문에 강우에 의한 파괴가 쉬운 토층조건을 유지하고 있기 때문이다.

사면경사를 기준으로 지질별로 산사태빈도를 살펴보면, 편마암류지역은 산사태가 가장 많이 발생한 지점의 사면경사가 26~30°로서 전체 산사태의 32%가 이 범위에서 일어났다. Fig. 5(a)는 편마암류지역에서의 산사태를 시작된 지점에서의 사면경사에 따른 발생빈도와 산사태의 평균 사면경사로 구분하여 도시한 것으로서, 그림에서 보는 바와 같이 산사태 시작지점의 경우 20° 미만의 경사에서는 산사태가 거의 발생하지 않았으나 20° 보다 경사가 급해지면서 발생빈도는 급격히 증가함을 알 수 있다. 그러나 경사각이 30°가 될 때까지 발생빈도가 급격히 상승하다가 30°보다 급해지면서는 서서히 감소하는 경향성을 보인다. 한편, 산사태의 평균 사면경사와 산사태 발생빈도를 비교하였을 경우 역시 시작점에서의 경우와 유사한 경향성을 보임으로써 전반적으로 30° 전후의 사면경사에서 산사태가 가장 높은 빈도로 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 산사태가 시작된 지점에서의 사면경사가 산사태의 평균경사에 비해 30° 미만으로 다소 낮은 경사에서는 시작지점의 사면경사가 더 낮은 경향성을 보이는 반면, 30° 이상에서는 비슷한 분포를 보이는 것으로 나타났으나 뚜렷한 경향성이 관찰되지는 않는다. 다만, 발생빈도가 가장 높은 26~30°의 사면경사에서는 평균경사가 약 46%로서 매우 높은 비율을 차지하였다.

회강암류지역에서의 산사태는 시작지점에서의 사면경사를 기준으로 볼 때, 산사태가 가장 많이 발생한 사면 경사는 26~30°로서 전체 산사태의 34% 정도가 이 범위

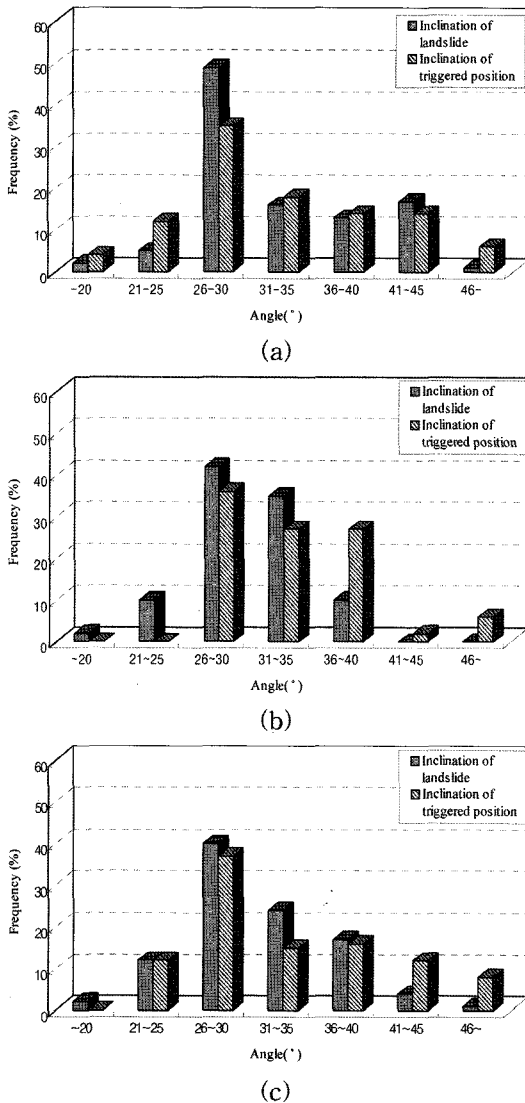


Fig. 5. Distributions of slope angle at landslide occurrence position in the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

에 속하는 것으로 나타났다. 그리고 산사태가 시작된 지점의 사면경사와 산사태의 평균 사면경사는 모두 26~30°에서 가장 높은 집중치를 보임으로써 이러한 경사조건에 있는 사면이 산사태에 가장 취약한 것으로 분석되었다. 그러나 산사태가 시작된 지점으로부터 바로 위에 위치한 사면의 경사 또한 31~35°와 36~40° 구간이 56% 정도로서 상당히 높은 비율을 차지하고 있음을 주목해야 하는데, 이는 산사태가 시작되는 지점의 형상이 약간 오목한 지형조건을 갖는다는 Avanzi et

al.(2004)의 연구결과와 대체로 일치하였다(Fig. 5(b)).

한편, 제3기퇴적암류지역의 산사태는 시작지점에서의 사면경사를 기준으로 볼 때, 산사태의 평균 사면경사와 시작지점의 사면경사가 모두 26~30°의 구간이 35% 내외로서 가장 높은 분포비율을 차지하여 이 범위의 사면이 산사태에 가장 취약한 것으로 분석되었다. 그리고 그 다음으로는 31~35°와 36~40°의 사면경사가 각각 13% 및 14%를 차지함으로써 전체산사태의 62%가 26~40° 경사도를 갖는 사면에서 발생한 것으로 나타났으며, 사면경사가 41° 이상으로 비교적 가파른 사면에서의 발생 비율이 17% 정도로서 다른 두 지역에 비해 높은 것으로 나타났다(Fig. 5(c)). 산사태의 평균 사면경사와 산사태 발생빈도를 비교하였을 경우 역시 시작점에서의 경우와 유사한 경향성을 보임으로써 전반적으로 26~30°의 사면경사에서 가장 높은 빈도로 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 26~40°의 범위에서는 산사태가 시작된 지점에서의 사면경사가 산사태의 평균 사면경사에 비해 다소 낮은 분포를 보이는 반면, 40° 이상에서는 더 높은 경향성을 보였는데, 산사태가 주로 발생한 26~40°의 사면경사에서 평균 사면경사에 비해 시작점의 사면경사가 낮게 나타남은 산사태가 시작된 지점이 대체로 오목한 지형조건을 갖추고 있음을 나타내는 결과라고 할 수 있다.

산사태규모

Fig. 6은 3개지역의 산사태규모를 길이, 폭 및 깊이로 구분하여 표현한 그림으로, 여기에서 산사태길이란 사면 붕괴가 시작된 지점부터 쓸려 내린 사태물질이 퇴적되기 시작한 지점까지의 거리를, 폭 및 깊이는 전체길이를 대상으로 평균하여 나타낸 것이다. 편마암류지역에서 발생한 산사태의 규모는 길이를 기준으로 하였을 때 작게는 20 m부터 길게는 290 m의 범위를 보였는데, 이들을 20 m 길이등급으로 구분하였을 경우 총 77개 산사태 중에서 41~60 m가 18개소 24%로서 가장 높은 점유비율을 차지하였으며, 다음으로는 61~80 m와 21~40 m가 각각 10개소로 13%씩을 차지하였다. 반면, 길이 100 m 이상의 산사태도 31개소로 42%를 차지함으로써 비교적 길이가 긴 산사태가 많이 발생되었다(Fig. 6(a)). 산사태의 폭은 8~22 m의 범위를 보였는데, 이 중 16~20 m와 11~15 m가 각각 42% 및 40%로서 대부분을 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 또한, 산사태의 깊이는 0.5~1 m의 범위가 71% 정도이었으며 1 m 이상은 12%를 점하는 것으로 나타나 매우 얇은 것으로 분석되었다(Fig. 6(c)).

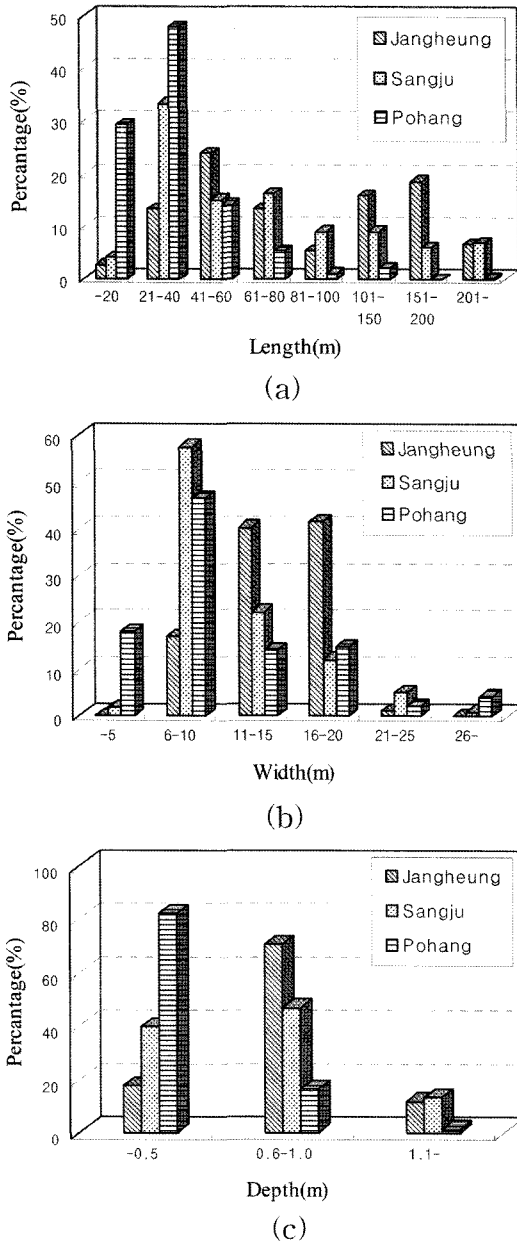


Fig. 6. Distributions of landslide dimension in the study areas: (a), Length; (b), Width; (c), Depth.

화강암류지역에서 발생한 산사태의 규모는 길이를 기준으로 하였을 때 작게는 15m부터 300m까지 다양한 크기로 분포하였고 평균길이는 82m 정도인 것으로 나타났다. 전체산사태의 78% 정도가 100m 미만의 길이를 보였으며, 길이 21~40m, 61~80m 및 41~60m가 각각 33%와 16% 및 13%인 것으로 나타나 비교적 짧

은 길이의 산사태가 주를 이루고 있음을 알 수 있다. 그러나 전체산사태의 22% 정도가 길이 100m 이상으로서 비교적 큰 규모의 산사태가 발생한 비율 또한 높은 것으로 나타났다(Fig. 6(a)). 이는 화강암이 분포하고 있어 대체로 낮은 사면지형을 이루고 있는 지역에서 산사태가 주로 발생하였으며, 비교적 고지대의 사면에는 노두가 잘 발달되어 있기 때문에 상대적으로 산사태의 발생비율이 낮기 때문이다. 그러나 산사태가 노두발달이 미약하고 토층이 얇게 분포되어 있는 고지대의 사면에서 시작되어 하부의 계곡까지 계속됨으로써 비교적 길이가 긴 산사태가 발생되기도 하였다. Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 산사태의 폭은 3~35m의 범위이나 6~10m가 전체의 58%로서 가장 높은 비율을 보였으며, 다음으로는 11~15m 및 16~20m로서 각각 22% 및 12%인 것으로 분석되었다. 또한, Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 깊이는 평균 1m 이내로서 매우 얇은 양상을 보였는데, 이는 잔류토나 봉적토와 같은 토층이 기반암의 상부에 얇은 심도로 분포하고 있으며 이들과 기반암의 경계부에서 파괴가 일어났기 때문에 산사태의 깊이가 얇은 것으로 분석되었다.

제3기퇴적암류지역에서 발생한 산사태의 규모를 살펴 보면, 길이는 5~230m의 범위를 보였다. 이 중 21~40m가 48% 정도로서 가장 높은 점유비율을 차지하였으며 다음으로는 20m 이하와 41~60m로서 각각 29% 및 14% 정도로서 길이를 기준으로 하여 60m 이하가 91%인 것으로 나타나 소규모적인 산사태가 주를 이루는 것으로 나타났다. 이는 편마암류지역과 화강암류지역에 비해서도 산사태길이가 훨씬 짧다(Fig. 6(a)). 산사태의 폭은 3~50m의 범위를 보였는데, 이 중 6~10m가 47% 정도로서 가장 높은 점유비율을 보였으며 전체산사태의 94%가 폭 20m 이하의 규모인 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 산사태의 깊이는 매우 얇아서 대부분 0.5m 미만이 전체산사태의 85%를 차지하는 것으로 나타났는데, 이는 앞의 두 경우 즉 편마암류나 화강암류지역 산사태에 비해서 아주 얇은 특징을 보였다(Fig. 6(c)). 이와 같이 제3기퇴적암류지역이 산사태의 규모 즉, 산사태길이, 폭 및 깊이가 모두 편마암류지역과 화강암류지역에 비해 소규모의 형태를 보이는 것은 이 지역의 지질 및 지형조건에 기인되는 것으로 볼 수 있다. 이러한 현상은 편마암이나 화강암지역과는 다르게 이암이 주를 이루는 퇴적암지역이 강우나 온도변화와 같은 기후조건과 지하수상태 등에 의해 풍화에 더 약한 특성을 가지고 있으며, 여기에서 사면경사가 가파른 지형특성으로 인하여 지표면

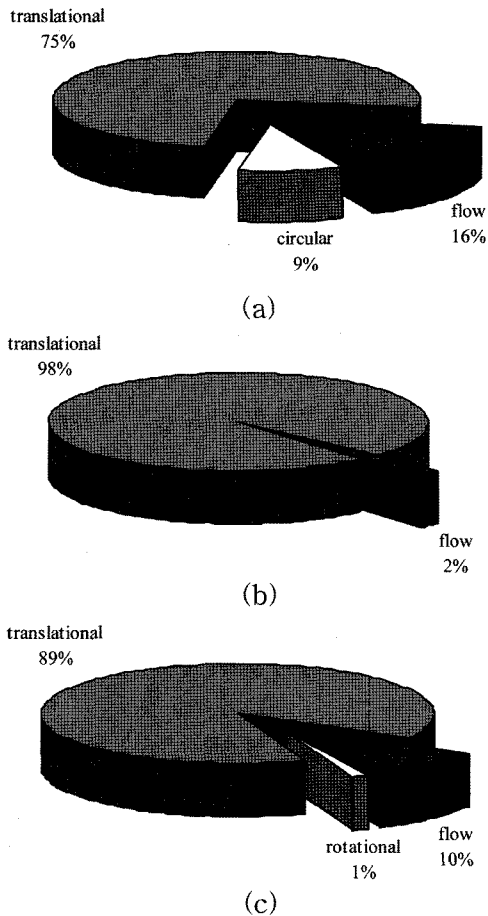


Fig. 7. Distributions of landslide type from occurrence position in the study areas: (a), Gneiss area; (b), Granite area; (c), Tertiary sediments area.

의 침식이 더 빠르게 진행됨으로써 잔류토나 붕적토 등의 토층이 지속적으로 유지되기 어렵기 때문이다.

산사태유형

Fig. 7은 3개지역에서 나타난 산사태의 유형을 지질별로 구분하여 표현한 그림이다. 편마암류지역에서 발생한 산사태들 중 산사태가 밀집하여 발생한 지역을 중심으로 한 77개 산사태를 분석한 결과, 산사태가 시작된 지점의 파괴형태는 전이형슬라이드가 75%로서 가장 높은 점유비율을 보였으며, 다음으로는 유동형과 원호형이 각각 16% 및 9%인 것으로 나타났다(Fig. 7(a)). 그리고 대부분 잔류토나 붕적토인 토층이 기반암과의 경계면을 따라서 붕괴되어 그 깊이는 매우 얇은 것으로 조사되었으며, 사태물질이 사면의 하부로 이동되면

서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 산사태로 인해 발생한 사태물질은 대부분 기반암의 상부에 위치한 표토물질이 하부로 미끄러져 내려간 것으로서 토석류로 구분된다.

화강암류지역에서 발생한 산사태들 중 산사태가 밀집하여 발생한 지역을 중심으로 한 99개 산사태를 분석한 결과, 산사태가 시작된 지점의 파괴형태는 거의 대부분 전이형슬라이드로 분류되었으며(Fig. 7(b)), 잔류토나 붕적토인 토층이 기반암과의 경계면을 따라서 붕괴되어 그 깊이는 매우 얇다. 화강암류지역도 편마암류지역과 거의 유사한 양상을 보여 대부분의 산사태가 사면의 하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다.

제3기퇴적암류지역에서 발생한 283개 산사태의 유형을 분석한 결과, 전이형의 산사태는 251개소로서 전체 산사태의 89%를 차지하였고, 그 외 처음부터 유동형인 산사태는 28개소로서 10% 정도이었으며 약 1% 정도는 회전형 등으로 분류되어 제3기퇴적암류지역 역시 산사태 발생초기의 유형은 전이형슬라이드가 주를 이룸으로써 다른 두 지역들과 유사한 경향성을 보였다(Fig. 7(c)). 또한, 사면하부로의 진행형태 또한 거의 유사한 양상을 보였다.

지질조건별 산사태의 기하특성

지질조건이 각각 다른 3개지역에서는 1998년 7월부터 8월 사이에 150~588 mm에 달하는 집중호우가 있었으며, 이로 인해 한 지역에서 작게는 283개부터 많게는 788개의 산사태가 발생하는 등 총 1,582개의 산사태가 발생되었다. 이들 3개지역에서의 지질조건에 따른 산사태 발생빈도는 대상면적과 강우조건 등이 서로 다르기 때문에 상대적인 비교는 그 의미가 없는 것으로 판단하여 시도하지 않았으나, 편마암류, 화강암류 및 제3기퇴적암류로 대표되는 3개지역을 대상으로 서로 다른 지질조건에 따라 지형특성과 산사태의 기하특성들이 어떻게 달리 나타나는지를 관찰하였다. 그 결과 편마암류지역은 대부분 전이형슬라이드로서 비교적 평탄한 사면에서 평면파괴가 일어나고 파괴된 토석류들이 하부로 이동되면서 주위의 물질과 혼재되어 유동성산사태로 변환되어 계곡을 따라 흘러내리는 양상을 보였다. 화강암류지역은 비교적 가파른 지형조건과 암반노두가 잘 발달되어 있어 토층이 거의 분포하지 않은 고지대에서는 산사태가 거의 발생하지 않은 반면, 노두분포가 많고 상대적으

로 토층분포비가 높은 사면에서 산사태가 주로 발생하였다. 한편, 제3기퇴적암류지역은 대부분이 이암이나 셰일로 구성되어 있어 풍화에 취약할 뿐만 아니라 층리가 잘 발달되어 있어 특히 강우나 지하수이동에 의한 표토층의 차별풍화와 지지력의 감소 등으로 인해 산사태에 취약한 지반조건을 갖는다.

고도 및 경사

사면고도로 기준하여 산사태빈도를 살펴보면, 편마암류지역에서는 90% 이상의 사면고도에서 발생빈도가 가장 높고 그 다음이 80~90%, 70~80%의 순으로 사면고도가 낮을수록 발생빈도가 감소하였고, 70% 미만의 사면고도에서는 발생빈도가 매우 낮은 것으로 나타났다. 그리고 산사태는 대체로 평탄사면의 약간 오목한 지형에서 전이형슬라이드로 시작되어 토석류인 사태물질들이 주위의 계곡으로 흘러내리면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 화강암류지역은 약 84%의 산사태가 평탄사면에서 발생함으로써 가장 높은 비율을 차지하였고, 약간 오목한 지형조건에서 많이 발생하였다. 그리고 계곡부와 능선부에서는 각각 14% 및 2% 정도가 발생하였다. 또한, 제3기퇴적암류지역의 경우 평탄한 사면에서의 발생빈도가 79%로서 발생빈도가 가장 높고, 계곡부와 능선부가 각각 20% 및 1%에 불과한 것으로 나타났다. 이처럼 모든 지질에서 지형조건 중 사면고도에 따른 산사태 발생빈도는 거의 유사한 경향성을 보이는 것으로 나타나 특징적으로 구별되지는 않는다.

한편, 사면경사를 기준으로 볼 때, 편마암류지역에서는 26~30°의 사면경사에서 32%가 발생하여 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 20° 미만에서는 거의 발생하지 않은 것으로 나타났다. 그리고 발생빈도는 경사가 20°보다 급해지면서 증가하다가 30° 이상에서는 급한 경사일수록 감소하는 경향성을 보였다. 그리고 화강암류지역에서도 26~30°의 사면경사에서 42%로 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 산사태의 시작지점의 사면형상은 평탄사면과 함께 약간 오목한 지형조건을 이루는 곳에서 가장 많이 발생하였다. 한편, 제3기퇴적암류지역에서는 26~30°의 사면경사에서 전체산사태의 40%가 발생하여 가장 높은 발생비율을 차지하였으며, 31~35°와 36~40°의 사면경사가 각각 24% 및 17%를 차지하였다. 이처럼 모든 지질에서 26~30°의 사면경사에서 가장 높은 발생빈도를 보이는 것으로 나타났으며, 사면경사에 따른 산사태 발생빈도 또한 서로 유사한 경향성을 보임으로써 특징적으로 구별되지는 않는다.

규모 및 유형

산사태의 규모는 부피로 보아 수십 m^3 부터 수백 m^3 를 넘는 경우도 있으며, 그 길이는 수 m 에서 수백 m 이고 폭은 수 m 에서 수십 m 로서 좁고 긴 형태를 보이고, 그 길이는 대부분 1 m 이내로서 매우 얇은 특징을 보였다. 편마암류지역의 산사태길이는 20~290 m 의 범위로서 평균은 106 m 정도로 비교적 긴 형태를 보였다. 그리고 폭과 길이는 평균적으로 15 m 및 0.8 m 정도인 것으로 나타나 다른 두 지질에 비해서 산사태의 규모가 대체로 큰 것으로 분석되었다. 특히, 편마암류지역은 타 지질에 비해서 산사태의 길이와 심도가 더 길고 깊은 특징을 갖는데, 이는 사면고도가 높고 토층심도가 깊게 형성된 지형지질의 조건에 기인되는 결과로 해석된다.

화강암류지역은 산사태의 길이가 15~300 m 의 범위를 보였는데, 전체산사태의 78%가 100 m 미만이었으며, 21~30 m 및 31~40 m 가 각각 20% 및 13%로 분류되었으며, 평균은 82 m 정도로서 그 길이는 편마암류지역에 비해서는 짧고 제3기퇴적암류지역에 비해서는 긴 형태를 보였다. 산사태의 폭은 3~35 m 의 범위이나 평균 10 m 정도로서 좁게 나타났다. 그리고 길이는 평균 0.9 m 정도로서 편마암류지역과 유사한 경향성을 보였다.

한편, 제3기퇴적암류지역은 산사태의 길이가 5~230 m 의 범위를 보였는데, 이 중 21~40 m 가 48% 정도이고 60 m 이하의 산사태가 91%인 것으로 나타나 소규모적인 산사태가 주를 이루었으며, 평균길이 또한 36 m 로서 편마암류 및 화강암류지역에 비해 훨씬 짧은 특징을 보였다. 폭은 3~50 m 의 범위를 보였으며 평균적으로는 12 m 정도로 다른 두 지질과 유사한 경향성을 보였다. 특히, 산사태의 평균길이는 0.4 m 정도로서 편마암류나 화강암류지역에 비해 훨씬 얇은 것으로 나타났는데, 이는 제3기퇴적암류지역의 표토층은 편마암류나 화강암류지역에 비해 기후나 강우 및 지하수 등으로 인한 풍화에 취약할 뿐만 아니라 지형이 급하여 지표면의 침식이 더 빠르게 진행됨으로써 기반암 상부 얇은 토층의 풍화양상 및 지형특성에 기인되는 것으로 해석된다.

집중호우에 의해 발생하는 자연사면 산사태는 주로 토층과 기반암과의 접촉부를 따라 발생하였다. 시작지점에서의 우세한 파괴형태는 기반암의 표면을 파괴면으로 하여 그 상부에 위치한 토층이 미끄러지는 전형적인 전이형슬라이드가 주를 이루며, 토석류로 이뤄진 사태물질이 사면의 하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 이러한 산사태의 유형은 3개 지역 모두에서 거의 유사한 형태를 보였는데, 시작지

점에서 전이형슬라이드가 차지하는 비율은 편마암류가 75%로서 화강암류 및 제3기퇴적암류지역의 98% 및 89%에 비해 다소 낮은 것으로 나타났으나, 이들은 모두 하부로 진행되면서 사태물질에 함유된 다량의 물과 가파른 지형조건의 영향으로 빠르게 유동성산사태로 변환되었다.

결 론

우리나라에서 발생된 대부분의 산사태는 여름철의 집중호우에 기인되는 것으로 기반암 상부의 토층에서 발생되며, 강우조건, 지형조건과 지질 및 토질특성 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 그러나 지질조건을 달리 하는 지역들에서 집중호우로 기인된 많은 산사태에 대해 체계적 조사를 통한 지질조건별 기하학적 특성들을 구체적으로 규명한 경우는 거의 없다. 따라서 본 연구는 지질조건이 각각 다른 지역을 대상으로 동일한 시기의 집중호우에 의해 발생한 산사태 자료들을 조사하여 산사태의 기하학적 특성을 총괄적으로 분석하였으며, 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 연구지역은 지질조건이 서로 다른 3개지역으로서 편마암류가 분포된 장흥, 화강암류인 상주, 그리고 제3기퇴적암류로 이뤄진 포항지역이다. 이들 지역에서는 1998년 여름에 짧게는 2일에서 길게는 4일간에 걸쳐 150~588 mm의 집중호우가 있었으며, 이로 인해 총 1,582개의 산사태가 발생된 것으로 조사되었다. 그리고 연구지역에서의 산사태들은 집중호우가 직접적이고도 가장 큰 외적 요인으로 작용되었다.

2) 산사태는 주로 토층과 기반암과의 접촉부를 따라 발생되었다. 시작부에서는 전이형슬라이드가 주를 이루고 하부로 이동하면서 유동성 산사태로 변환되었다. 그리고 시작부에서 전이형슬라이드의 발생비율은 편마암류가 가장 낮고 화강암류는 가장 높은 것으로 나타났다.

3) 산사태 발생빈도는 90% 이상의 사면고도에서 가장 높고 그 다음이 80~90%, 70~80%의 순으로 사면고도가 낮을수록 감소하였으며, 70% 미만에서는 발생빈도가 매우 낮다. 26~30°의 사면경사에서 산사태 발생빈도가 가장 높다. 그리고 규모는 부피로 보아 수십m³부터 수백m³를 넘는 경우도 있으며, 그 길이는 수m에서 수백m, 폭은 수m에서 수십m로서 좁고 긴 형태이고 깊이는 대부분 1m 이내로서 매우 얇게 나타남이 특징적이다.

4) 제3기퇴적암류지역은 편마암류나 화강암류지역

에 비해 더 소규모적이고 깊이는 훨씬 더 얇게 발생된다. 이는 제3기퇴적암류지역이 풍화에 더 취약할 뿐만 아니라 잘 발달된 층리들이 강우나 지하수이동을 쉽게 함으로써 표토층의 차별풍화와 지지력이 저하되고, 가파른 지형조건으로 인해 지표면의 침식이 더 빠르게 진행됨으로써 토층분포가 얇은 특징을 보이기 때문이다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태재해 예측 및 저감기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 대한지질공학회지, 10, 2, 163-174.
- 김동학, 이병주, 1986, 1:50,000 한국지질도 청산도폭, 한국동력자원연구소.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천-철원지역을 대상으로-, 대한지질공학회지, 8, 2, 115-130.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09, 642p.
- 김원영, 채병곤, 조용찬, 김경수, 이춘오, 최영섭, 김복철, 차두송, 박동선, 2004, 산사태위험도 산정시스템 구축 및 피해저감 기술 개발, 과학기술부, M1-0324-00-0003-03-B31-00-001-00, 288p.
- 엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 1:50,000 한국지질도 포항도폭, 국립지질조사소.
- 원종관, 김기태, 1969, 1:50,000 한국지질도 상주도폭, 국립지질조사소.
- 이병주, 김유봉, 이승렬, 김정찬, 강필중, 최현일, 민명식, 1999, 1:250,000 서울-남천집 지질도폭, 과학기술부.
- 조용찬, 김경수, 이춘오, 채병곤, 김원영, 2003, 태풍 '루사'에 의해 발생한 강릉지역 산사태의 특징, 대한지질공학회 학술발표회, 21-26.
- 최 경, 1986, 한국의 산사태 발생 요인과 예지에 관한 연구, 강원대학교 박사학위 논문, 45p.
- 한대석, 김원영, 유일현, 김경수, 이사로, 최영섭, 1997, 지질재해조사연구, 한국자원연구소, KR-98(C)-03, 1-44.
- Avanzi, G. D., Ginnechini, R., and Puccinelli, A., 2004, The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy), Engineering Geology, 73, 215-228.
- Chigira, M., 2002, Geologic factors contributing to landslide generation in a pyroclastic area: August 1998 Nishigo Village, Japan, Geomorphology, 46, 117-128.

- Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J., and Xu, Z. W., 2001, Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, *Environmental Geology*, 40, 2, 381-391.
- Dietrich, W. E. and Dunne, T., 1978, Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain, *Geomorphology Suppl.*, 29, 191-206.
- Ikeya, Hiroshi, 1978, Classification of debris flows, *Civil Engineering Journal*, 20, 3, 44-79.
- Ikeya, Hiroshi, 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, *Bull. of the IAEG*, 40, 15-33.
- Montgomery, D. R., Schmidt, K. M., Greenberg, H. M. and Dietrich, W. E., 2000, Forest clearing and regional landsliding, *Geology*, 28, 311-314.
- Selby, M. J., 1993, *Hillslope Materials and Processes* Oxford Univ. Press, Oxford, 451p.
- UNESCO Working Party on Landslide Inventory, 1990, A suggested method for reporting a landslide, *Bull. of IAEG*, 41, 5-12.
- Varnes, D J., 1978, Slope movement types and process, *National Academy of Science, Washington, D C.*, special report, 2, 11-33.

2007년 2월 3일 원고접수, 2007년 3월 12일 게재승인

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3054
Fax: 042-861-9723
E-mail: kks@kigam.re.kr

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3035
Fax: 042-861-9723
E-mail: yssong@kigam.re.kr

채병곤

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3052
Fax: 042-861-9723
E-mail: bgchae@kigam.re.kr

조용찬

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3059
Fax: 042-861-9723
E-mail: choych@kigam.re.kr

이춘오

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
Tel: 042-868-3131
Fax: 042-861-9723
E-mail: lco@kigam.re.kr