

강우에 의해 발생한 자연사면 산사태의 지질공학적 분석 - 용인 · 안성지역을 대상으로 -

김경수* · 김원영 · 채병곤 · 송영석 · 조용찬
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Engineering Geological Analysis of Landslides on Natural Slopes Induced by Rainfall - Yongin · Ansong Area -

Kyeong-Su Kim* · Won-Young Kim · Byung-Gon Chae · Young-Suk Song · Yong-Chan Cho
Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute
of Geoscience & Mineral Resources

우리나라의 경우 자연사면에서 발생하는 산사태는 그 원인이 대부분 집중강우에 의한 것이고, 산사태로 인한 인명 및 재산피해도 날로 심각해지고 있는 실정이다. 경기도지역에서는 1991년부터 최근까지 산사태가 지역적으로 많이 발생된 바 있는데, 이러한 산사태에 영향을 미치는 요인들로는 강우, 지형조건, 지질 및 토질특성 등을 들 수 있다. 1991년 7월 19일부터 21일까지 3일간에 걸친 약 250mm의 집중강우로 인해 용인·안성지역에서 약 660여개의 산사태가 발생되었다. 이 연구에서는 이들 지역에서 발생한 산사태에 대하여 위치, 지형, 지질, 기하형태 및 강우 등을 조사하여 산사태 발생특성을 분석하였다.

그 결과 대부분의 산사태는 기반암 상부의 토층사면에서 발생되었으며 전이형슬라이드로 시작되어 유동성산사태로 변환되는 양상을 보였다. 그리고 길이는 대부분 50m 이하로서 대체로 소규모적이다. 또한, 토질조건에 따른 산사태의 특징을 규명하기 위해 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역에서 각각의 토층시료를 채취하여 실내시험을 통한 토질공학적 특성을 평가하였다. 산사태발생지역의 토질은 대체로 자갈 및 모래의 함유비가 높은 조립질인데 반하여 미발생지역은 실트나 점토입자의 구성비가 높은 세립질이 우세하였다. 그리고 투수계수는 산사태발생지역이 미발생지역의 경우보다 더 큰 것으로 나타났다.

주요어: 자연사면, 산사태, 집중강우, 지형조건, 토질특성

Most of the landslides triggered by intensive rainfall on natural slope occur serious damages of human beings and properties. There have been many landslides since 1991 in Gyeonggi province. The influential factors are rainfall, topography, geology and soil properties.

There were 660 landslides occurred by intensive rainfall as much as 250mm at Yongin and Anseong area from July 19th to July 21st, 1991. This study surveyed location, topography, geology, geometry of the landslide and rainfall at the area and analyzed occurrence characteristics of the landslides. Most of the landslides occurred on

* Corresponding author : kks@kigam.re.kr

the soil layer above the bed rock. They showed changes of landslide types from translational slides at the head part to flow at the central part. The landslides have relatively small magnitude of which length is shorter than 50m.

In order to identify characteristics of landslides dependent on soil conditions, geotechnical properties of soil were evaluated by laboratory tests using soil samples which were collected on slided area and not-slided area. Soil properties of the slided area show high percentage of coarse material such as gravel and sand. However, soil of the not-slided area is mainly composed of fine material such as silt and clay. Permeability coefficients of the slided area are higher than those of the not-slided area.

Key words: natural slope, landslide, intensive rainfall, topography, soil properties

서 론

우리나라의 연평균 강우량은 1,100~1,400mm로서 이 중 대부분이 6월과 9월사이의 우기에 집중되고 있으며, 최근에는 기상이변에 따른 수백 mm의 국지성 폭우가 내리는 현상이 잦아지고 있다. 따라서 주로 집중강우에 의해 산사태가 발생되고 있는 우리나라는 매년 이 시기에 산사태가 집중적으로 발생되고 있으며, 이로 인한 인명 및 재산피해도 날로 증가하고 있는 실정이다. 그리고 우리나라는 만장년기의 지형에 속하기 때문에 급경사면이 많으며, 토층간의 특성이 서로 다른 곳이 많으므로 산사태가 많이 발생할 내적요인을 구비하고 있다(최경, 1986).

일반적으로 강우에 의해 발생하는 산사태는 집중적으로 비가 내리는 동안 증가된 간극수압(pore water pressure)과 침투력(seepage force)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며(Mathewson et al., 1990; Sitar et al., 1992; Anderson and Sitar, 1995; Montgomery et al., 1997), 자연사면에서 증가된 간극수압은 토층의 유효응력(effective stress)을 줄이고 전단강도를 감소시킴으로써 결국 붕괴를 유발시킨다(Brand, 1981; Brenner et al., 1985). 우리나라의 경우 자연사면에서의 산사태는 대부분 토층에서 발생되는데, 토층을 구성하고 있는 사면매질 즉, 토석류(debris)가 집중강우로 인해 지지력이 약해짐으로써 순간적으로 흘러내리는 유동성산사태(flow type landslide)의 형태를 보인다(김경수 외, 2000). 산사태는 내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있으며 이들 두 요인이 함께 작용되었을 때 비로소 산사태가 발생하게 된다. 즉, 집중강우는 산사태 발생의 외적요인에 해당하며, 지형 및 토질특성

은 산사태 발생의 내적요인에 해당하는 것이다(홍원표와 송영석, 2002).

산사태연구는 기 발생된 산사태를 조사·분석하여 산사태를 초래하는 여러가지 지질공학적 인자들의 특성분석에 의해 발생원인을 규명하는 방법, 인자들의 상호관계를 통계적으로 분석하여 각 인자별 가중치를 산정하고 이를 조사되지 않은 타 지역에 적용하여 발생가능성을 확률론적으로 해석하는 방법, 그리고 GIS 기법이나 인공신경망이론을 이용하여 사태물질의 이동경로와 확산범위를 예측하는 방법 등이 있다. 우리나라의 경우 자연사면에서 발생하는 산사태는 대부분 토층에서 발생되며, 사면파괴는 주로 토석류인 유동성산사태이다. 토석류산사태에 대한 기존의 연구는 김원영 외(1998, 2003)에 의하여 주로 수행되어져 왔는데, 기 발생된 산사태를 조사하여 산사태에 영향을 미치는 지질공학적 인자들을 추출하고, 인자들의 상호관계를 통계적으로 분석하여 산사태의 발생을 확률론적으로 예측하였다. 또한, 홍원표 외(2004)는 산사태자료를 토대로 인공신경망을 이용하여 산사태를 예측한 바 있다.

자연사면에서 토층이라 함은 풍화암과 암편 등을 포함하는 미고결물질을 통칭한다(Varnes, 1978). 연구지역에서의 산사태들은 이러한 기반암(bedrock)의 상부에 위치한 토층이 붕괴된 유동성산사태이다. 이러한 유동성산사태를 평가하기 위해서는 토층을 구성하고 있는 사태물질의 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이 연구는 연구지역에서 발생한 산사태의 특징들을 조사 분석하였다. 그리고 토질특성에 따른 산사태의 특징을 규명하기 위하여 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역에서 각각의 토층시료

를 채취하여 토질공학적 특성을 평가하였다. 이를 위하여 160개 산사태를 조사하였으며 그 중의 40개소에서 시료를 채취하였다. 그리고 산사태발생지역과의 비교를 위해 미발생지역의 37개소에서 시료를 채취하였다. 시료는 산사태 시작점의 위치, 지형 및 지질분포비 등이 고려되도록 하였으며 각 위치마다 교란 및 불교란시료를 채취하였다. 이렇게 채취된 모든 토층 시료에 대해 시험실에서 10여개 항목의 토질시험을 실시하여 각 물성간의 상관성 및 산사태와의 관련성을 분석하였다.

산사태의 개요

유발요소

산사태의 여러 원인들 중에서 가장 중요한 요소로는 강우조건, 지형지질 및 토질특성 등을 들 수 있다. 산사태는 내적 취약성을 갖고 있는 지반에 강우나 지반진동 등의 외적요인이 부가될 때 발생하기 쉽고, 이들 두 요인이 함께 작용하였을 때 산사태가 발생하게 된다(김경수 외, 2000; 홍원표와 송영석, 2002).

Olivier(1994)에 의하면, 사면활동은 반응지수가 1 이상일 때부터 발생할 수 있고 값이 커질수록 발생확률은 높아지며, 평균강우량보다 20% 이상의 집중강우가 발생할 경우 대규모의 산사태가 발생할 가능성이 있는 것으로 보고되었다. Ikeya(1989)는 대부분의 암설유동(debris flow)은 강수에 의해 발생하며, 누적강우량이 150mm 이상이고 시간당강우량이 35mm인 경우에 발생한다고 보고하였다. 우리나라의 경우 경기도 지역에서 발생한 산사태를 대상으로 연구한 김원영 외(1998, 2000)에 의하면, 1996년 경기도지역에서의 누적강우는 년평균 누적강우보다 불과 4% 높고 1~6월까지의 누적강우는 년평균치와 거의 같은데 반하여 집중강우지수(Ce)는 36%로 나타났으며, 산사태들은 Oliver(1994)의 방법을 적용하였을 경우 누적강우에 의한 원인보다는 집중강우에 의해 발생된 것으로 평가하였다.

홍풍의 경우 사면고도 100~500m인 구릉사면(hill slopes)에서의 산사태 발생빈도가 사면고도 100m 이하이거나 500m 이상의 구릉사면에 비해 2.7~6.4배 더 높았다. 그리고 그 이유는 높은 사면고도에서는 보통 풍화암의 특성 때문에 전단강도가 크고, 아주 낮은 고도에서는 지형이 완만하여 붕적층이나 잔류토가 두껍게 덮여 있는데 반하여 중간의 고도에서는 산사태가

발생되기 쉽도록 얇은 붕적층이 덮여 있기 때문인 것으로 해석하였다(Dai et al., 2001). 김원영 외(1998)의 연구결과에 의하면, 경기도지역의 지형고도는 최저 20m부터 1,200m정도까지 다양하여 대체로 험준한 산세를 나타내고 있는데, 지형고도에 따른 면적비와 산사태빈도를 분석한 결과 취약지역은 대체로 400m 이하였다. 그리고 전체 산사태의 50% 이상이 200~300m 고도에서 발생하였으며 단위면적당 발생빈도 또한 200~300m에서 1.27개로 가장 높아 평균빈도인 0.65개의 2배를 상회하였다.

유형

산사태의 유형(type)은 낙반(fall), 전도(topple), 활동(slide), 측면퍼짐(lateral spread) 및 유동(flow) 등으로 분류되는데(UNESCO Working Party on Landslide Inventory, 1990), 이 중에서 낙반과 전도는 주로 암반사면에서 사용되는 용어이다. 파괴형태별로는 평면(planar), 췌기(wedge), 단계(stepped), 원호(circular) 및 준원호(semi-circular) 등으로 분류되며, 붕괴된 물질을 기준으로 구분한 경우는 암석(rock), 암설(debris) 및 흙(mud) 등으로 분류할 수 있다(Varnes, 1978). 또한, 이들의 생성이 복합적인 작용에 의한 것인가의 여부에 따라 단일(single)이나 복합(multiple)이라는 용어를 사용하기도 한다(Brunsdn, 1985; Hutchinson, 1988). 특히, 암설유동은 호우로 인해 발생된 대규모의 산사태가 일시적으로 급류(torrent)의 흐름을 방해하고 사태물질이 많은 양의 물과 함께 이동하여 자연적인 둑(natural dam)을 이루는데, 물과 섞인 많은 양의 사태물질들이 갑자기 아래로 흘러내리는 현상이라고 하였다(Ikeya, 1989).

지형조건

지형은 사면붕괴 분석요인 중 가장 중요한 사면의 기하학적 형태(slope geometry)를 결정해 줄 뿐만 아니라 산사태자체가 지형발달의 한 과정이므로 지형은 산사태발생과 밀접하게 연관되어 있다(Johnes, 1983; Griffiths et al., 1990). 사면의 경사는 산사태 특히, 암설유동인 경우에 매우 중요한 의미를 갖는다. Ikeya(1978, 1989)에 의하면, 일본 전역에서 일어난 대규모 암설유동을 분석한 결과 10~20° 사이의 사면경사에서 70% 이상이, 5~10°에서 20%가 발생되었으며 40°

이상의 경사에서는 극히 미미한 것으로 보고되었다. 김원영 외(2000)에 의하면, 경기도지역의 경우 해발고도를 기준으로 하여 90%이상의 사면고도에서 산사태 발생빈도가 가장 높고, 그 다음이 80~90%, 70~80% 순으로 고도가 낮아질수록 감소하여 70% 이하에서는 급격히 낮아진다. 그리고 사면경사는 26~30°에서 가장 많은 산사태가 발생하여 전체 산사태의 32%를 차지하였으며 20° 미만일 때는 거의 발생하지 않은 반면, 30°보다 경사가 커지면서 발생빈도는 점점 감소하는 경향을 보이는 것으로 보고하였다.

토질특성

건조밀도, 습윤밀도 및 포화밀도는 상호간 밀접한 관련성이 있는 물성으로 정비례관계에 있다. 그리고 이들 밀도는 간극비와 상호 반비례관계에 있다. 간극비와 밀도는 투수성과 매우 밀접한 상관성을 갖는 물성요인이며, 산사태에서 투수성은 매우 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 유효경과 투수계수는 서로 비례관계에 있으며, 균등계수는 투수계수와 비교적 높은 상관성을 갖는다. 따라서 균등계수 또한 투수성을 판단하는 중요한 토질인자로 고려될 수 있다(김경수 외, 2000, 2001, 2004). 또한, 김원영 외(2003)에 의하면, 등강우량 지역에서 산사태 발생빈도와 투수계수간의 상관성을 확률적으로 분석한 결과 사태물질의 투수계수가 클수록 산사태가 발생할 확률은 현저히 감소하는 것으로 분석되었으며, 따라서 간극비가 크면 투수성이 양호하게 되어 강우로 인한 산사태에 상대적으로 안정한 지반으로 분류할 수 있는 것으로 보고되었다.

자연사면에서 암반층위에 존재하는 상부토층은 대부분 기반암의 풍화현상에 의해 형성된 것으로서 이들은 풍화정도 및 지질조건에 따라 공학적 특성이 달라진다(Hutchinson, 1988). 그리고 상부토층은 기반암 상부의 풍화잔류토와 퇴적물질 및 일부 풍화암편으로 구성되는데, 이들 물질들은 산사태가 일어나는 지역의 지질과 연관성을 갖게 된다. 즉, 풍화잔류토나 퇴적물들은 산사태가 일어난 지역의 암석풍화에 의하여 생성되므로 암석을 구성하고 있는 광물성분에 의하여 토질특성이 다르게 나타난다(김원영 외, 2000). 그리고 변성암지역에서 산사태지역과 아닌 지역간의 입도특성을 비교한 Giannecchini and Pochini(2003)에 의하면, 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 더

세립(finier grain size)이고 낮은 액성한계(liquidity limit)를 가지는 것으로 보고하였다.

조사 및 시험

연구지역

연구대상 지역은 1991년 7월 19일부터 21일까지 3일간 발생된 집중강우로 인하여 많은 산사태가 발생한 경기도 용인·안성지역으로서 지리좌표상으로는 동경 127°01'23"~127°23'38", 북위 37°02'24"~37°11'04"에 해당하며, 면적은 약 544km²에 이른다.

연구지역의 지질분포를 파악하기 위하여 1:50,000 축척의 기 발간된 수원도폭(오인섭과 윤운영, 1972), 이천도폭(여상철과 임주환, 1974), 오산도폭(오인섭과 박석환, 1973) 및 안성도폭(이상만 외, 1989) 지질도를 이용하였다. 연구지역에는 여러 종류의 지질이 분포하고 있지만, 연구 목적에 부합되게 대표적인 3개 지질만으로 단순화하여 편마암, 편암 및 화강암으로 구분하였다(Fig. 1). 연구지역에는 2일간에 걸쳐 250mm 정도의 집중강우가 있었으며, 이로 인해 660여개의 산사태가 발생되었다.

산사태조사

산사태의 현황파악을 위하여 우선 연구지역 전체의 산사태를 대상으로 조사를 실시한 결과 연구지역에서는 모두 660여개의 산사태가 발생한 것으로 확인되었다. 이 때에는 발생위치, 지질 및 식생상태 등을 개략적으로 조사하였는데, 이들 자료만으로는 개개 산사태의 특성을 모두 파악하기가 어려웠다. 산사태의 특성을 파악하기 위해서는 발생위치나 지질조건 외에도 유형, 범위, 기하학적 형태, 토층의 분포상태 및 토질 특성 등을 조사하고 분석할 필요가 있다. 따라서 야외 조사는 일차적으로 광역적 지질조사와 함께 1:50,000 축척의 지형도에 산사태 발생위치를 표시하였다. 그리고 이를 기초로 지형, 지질 및 조사여건 등을 고려하여 상세조사를 위한 160개의 산사태를 선정하였으며, 이들에 대해서는 1:5,000 축척의 지형도를 이용한 정밀 조사를 실시하였다.

조사항목은 산사태의 발생위치, 지형, 지질, 풍화도, 노두상태, 기하학적 형태 및 규모 등을 자세하게 조사하였다. 특히 지형조건은 산사태의 유발요소 중의 하나인 사면기하(geometry)를 결정하는 중요 요소이므

로 산사태의 시작점부터 끝나는 지점까지의 변화양상을 1:5,000 지형도에 정확하게 표시하여 산사태의 고도, 경사, 방향, 굴곡도, 형태 및 규모 등의 자료를 수집하였다(Fig. 2). 그리고 조사용 시트(sheet)를 이용하여 산사태의 특성분석에 필요한 사항들을 종합적으로 기재하고 통계적으로 분석하였다. 또한, 산사태와 토질 특성간의 상관성분석을 위해 토층시료를 채취하였다(Fig. 3).

토질시험

산사태발생과 토질특성간의 상관성에 주안점을 두고 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역의 토질특성을 비교분석하기 위하여 산사태가 발생한 지점과 발생하지 않은 지역에서 각각의 토층시료를 채취

하였다. 그리고 산사태빈도, 지형, 지질조건, 토층분포 및 단위면적당의 밀도비를 고려함으로써 토층의 특성이 균등하게 평가될 수 있도록 하여 산사태발생지역 40개소와 미발생지역 37개소로부터 총 77개 개별 토층시료를 채취하였다. 시료는 표토를 제거한 후 40~60cm 깊이의 토층을 대상으로 교란시료와 불교란시료로 구분하여 채취하였다. 불교란시료는 스텐레스로 제작한 직경 10cm, 높이 6cm 크기의 원통형 몰드(stainless ring sampler)를 이용하였다. 특히 투수시험용 불교란시료는 직경 10cm, 높이 13cm 크기의 원통형 몰드를 사용하였다. 그리고 교란시료는 비닐팩을 이용하여 채취하였으며, 모든 시료는 밀봉한 상태로 현장조건이 최대한 유지되도록 실험실로 운반하였다. 교란시료를 이용하여 비중, 함수비, 입도, 액성한계 및 소성한계 등의 물성시험을 실시하였으며, 불교란시료를

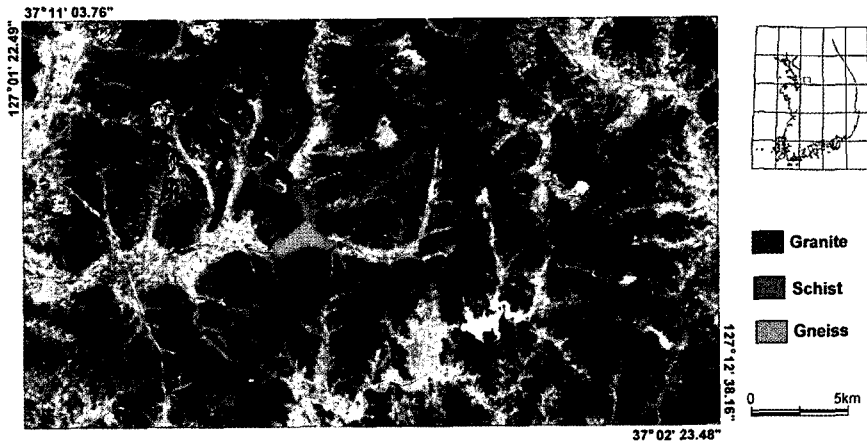


Fig. 1. Geological map of the study area.

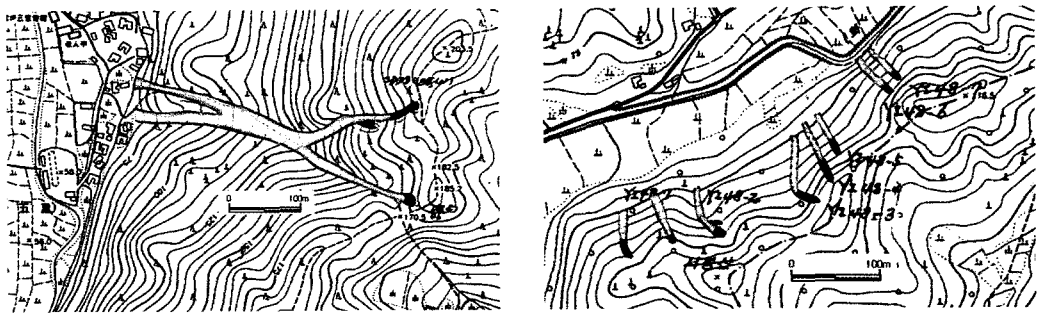


Fig. 2. Maps showing landslides mapped on the 1:5,000 topographic maps. dark part; translational slip, and light grey part; debris flow.

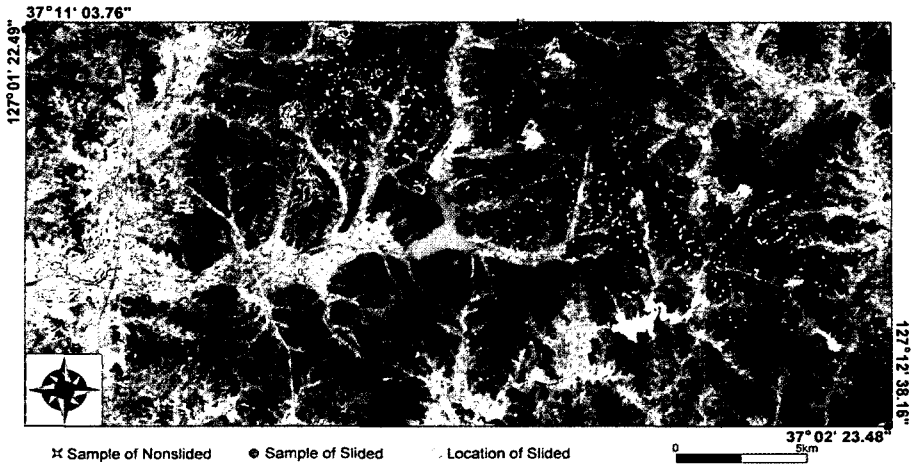


Fig. 3. Location map of collected soil samples with the landslide sites in the study area.

이용하여 간극비, 간극율, 포화도, 밀도, 전단 및 투수 시험을 실시하였다. 시험방법은 KS 및 ASTM의 관련 규정을 적용하였으며 전단시험과 투수시험은 각각 직접전단시험법과 변수위투수시험법에 의해 시험하였다.

지질공학적 특징

강우조건

Fig. 1에서 보는 바와 같이 연구지역에서의 산사태는 거의 동서방향으로 길게 발생하였음을 알 수 있다. 산사태가 발생한 당시에는 강우량 측정이 기상청에 의해서만 수행되었고, 강우관측소가 연구지역으로부터 다소 멀리 떨어진 곳에 위치하였기 때문에 연구지역의 상세한 강우자료를 수집할 수가 없었다. 따라서 일차적으로 연구지역 주변에 위치한 10개 강우관측소에서의 자료를 수집하여 강우분포도(contour map)를 작성하였으며, 산사태발생지역을 중심으로 하여 강우량이 많았던 수원, 이천, 양평, 원주, 천안 및 충주관측소의 강우자료들을 분석하였다. 자료에 의하면 강우는 1991년 7월 19일부터 시작되어 21일에 종료되었으며 산사태는 대부분 20일부터 21일까지 양일간에 발생한 것으로 조사되었다. 이들 강우관측소에 기록된 19일부터 21일까지의 강우자료는 Table 1에서 보는 바와 같다. 표에서 보는 바와 같이 강우량의 누적분포는

산사태의 분포양상과 대체로 유사하여 수원에서 양평 방향에 집중되는 현상을 보였다. 따라서 연구지역에 적합한 강우자료는 여러 관측소의 자료들 중에서 연구지역에 가장 인접한 수원관측소의 자료 및 작성된 강우분포도를 고려하여 추정함이 타당할 것으로 판단하였다. 이렇게 하여 연구지역에서의 누적강우량은 250mm 정도인 것으로 추정하였다.

지형지질

우리나라와 같이 산지가 많은 경우 자연사면에서의 토석류 평가에 있어 노두의 발달정도는 매우 중요하다. 산사태 중 토석류가 주를 이루는 유동성산사태는 기반암 상부에 위치한 토층의 파괴에 의해 발생하므로 노두가 잘 발달된 지역에서는 산사태 발생이 거의 없다. 기반암이 돌출된 지역에서 호우발생시 계곡을 따라 토석류들이 흘러내리는 경우가 있으나, 이 경우는 능선 부근에서 시작되는 전이형슬라이드(translational slide)에 의해 시작된 것이 아니므로 계곡 내에서 발생하는 침식(gully)의 형태를 띠게 된다. 따라서 이러한 토석류의 발생은 산사태라기보다는 계곡을 빠르게 흐르는 와류에 의해 계곡 주변의 흩이나 암편들이 침식되는 현상일 뿐이다.

연구지역의 지질은 크게 흑운모편마암, 석영편암 및 화강암 등 3종의 암석으로 구분된다. 그러나 흑운모편마암과 석영편암은 여타 지역에서의 마찬가지로

Table 1. Rainfall records of 19~21 July, 1991 measured at 6 rain stations adjoins in the study area.

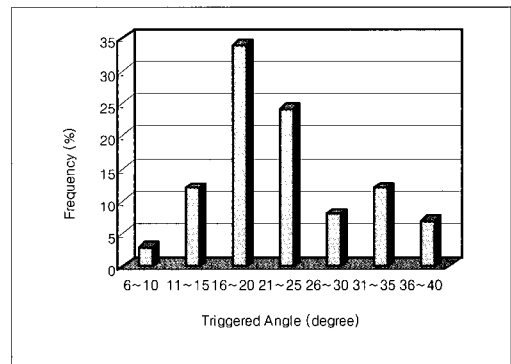
Date \ Rain station	Rainfall (mm)					
	Suwon	Icheon	Yangpyeong	Wonju	Chunan	Choongju
19 July, 1991	4.3	6.6	37.4	1.0	0	0.6
20 July, 1991	58.8	66.8	86.6	138.0	43.5	78.5
21 July, 1991	218	89.9	54.2	37.4	56.5	90.1
Total	281.1	163.3	178.2	176.4	100	169.2

광물학적으로 구성성분이 다르게 혼재되어 있어 지역에 따라 다소 다른 암상을 띠고 있다. 다만, 여기서는 복합적으로 혼재되어 있는 암상들을 대표적인 암석명인 편마암, 편암 및 화강암으로 명명하였다.

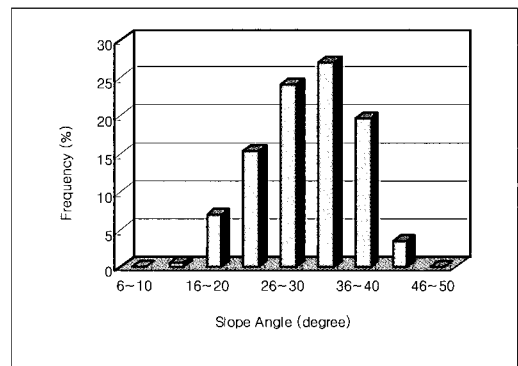
앞에서 언급한 바와 같이 연구지역에서의 160개 산사태에 대한 정밀조사를 실시하였으며, 그 중에서 지질 및 지형분포 등을 고려하여 대표적인 산사태조사 자료들을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 4는 연구지역의 사면 경사도와 산사태 빈도수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 경사도에 따른 산사태의 빈도수를 보면 급사면보다는 완만한 경사에서 산사태가 많이 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 4(a)는 산사태 발생지점의 경사를 가지고 분석한 결과로서 산사태의 50%이상은 경사각이 20도 전후의 완경사면에서 발생하였음을 보여주고 있다. Fig. 4(b)는 산사태 발생지점과 산사태가 끝나는 지점까지의 평균경사각으로 발생지점에 비하여 고각의 경사를 보이는 현상을 보인다. 결국 산사태가 발생하는 지점은 주로 사면 능선부근의 완만한 경사에서 시작되어 급한 사면으로 빠르게 진행되는 양상을 보인다.

산사태 발생위치는 대부분 평탄한 사면에서 비롯되었다. 총 660개 산사태를 대상으로 위치별 빈도수를 분석한 결과 85%가 평탄사면에서 발생하였으며, 그 나머지는 계곡부에서 발생한 것으로 확인되었다. 이처럼 대부분의 산사태는 평탄사면에서 발생하였고 평탄사면에서도 주로 능선 바로아래에 위치해 지형적으로 약간 오목한(concave) 부분에서 시작되었으며, 초기에는 전이형슬라이드로 시작되었다가 물과 혼재된 사태물질들은 중력의 영향과 지형여건에 따라 직하부의 가까운 계곡을 따라 흘러내리면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다.



(a)



(b)

Fig. 4. Relationship between slope angle vs frequency of landslides in the study area. (a) triggered position, and (b) measured from head to toe.

Table 2. Survey data of the soils collected from the landslide sites of study area.

No.	Map ID	W.G.	Elevation			D.S.	Slope angle(°)			Slope length (m)	Slope width(m)			Geology
			T(m)	R(m)	T/R(%)		Top	Mid	Avr.		Head	Center	Toe	
1	AS51-01	HW	143	234	61	30	30	28	28	15	7	10	8	Gn
2	AS51-02	HW	207	240	86	190	28	30	30	40		10		Gn
3	AS51-03	HW	145	204	71	25	28	30	30	40	5	8	10	Gn
4	AS51-04	HW	200	204	98	40	30	32	32	100	8	10	13	Gr
5	AS51-05	HW	176	220	80	110	29	32	30	70	5	5	9	Gr
6	AS51-06	HW	216	234	92	300	30	38	38	15	2.5	5	6	Gn
7	AS51-07	HW	230	245	94	300	38	35	35	100	8	12	14	Gn
8	AS52-01	HW	274	279	98	280	22	26	24	12	12	15	15	Gn
9	AS52-02	HW	130	241	54	100	24	26	26	20	5	7	7	Gn
10	AS52-03	HW	325	400	81	150	27	30	30	80	8	8	10	Gn
11	AS52-04	MW	195	235	83	30	42	45	45	50	3	5	6	Gr
12	AS52-05	MW	210	235	89	30	42	45	45	50	3	5	6	Gr
13	AS52-06	MW	215	235	91	30	42	45	45	50	3	5	6	Gr
14	AS54-01	MW	235	250	94	280	40	40	40	50	8	8	8	Gr
15	AS54-02	MW	295	415	71	40	30	26	26	50	9	8	8	Gr
16	AS54-03	SW	360	405	89	80	45	40	40	100	25	30	30	Gr
17	AS54-04	MW	375	415	90	140	30	30	30	80	7	7	8	Gn
18	AS54-05	MW	370	415	89	140	30	30	30	50	7	7	8	Gn
19	YI37-01	HW	219	220	100	102	35	30	35	50	17	8	10	Sc
20	YI37-02	MW	165	183	90	20	40	31	33	100	10	12	12	Gn
21	YI37-03	HW	165	178	93	170	38	26	30	120	20	15	15	Sc
22	YI37-04	MW	201	211	95	174	40	25	28	140	10	7	12	Gn
23	YI38-01	HW	114	155	74	70	32	32	32	50	5	5	5	Gn
24	YI38-02	HW	114	130	88	290	35	38	38	40	5	5	6	Gn
25	YI38-03	HW	120	155	77	70	32	32	32	50	5	5	5	Gn
26	YI48-01	HW	96	105	91	330	28	30	30	50	8	10	10	Gn
27	YI48-02	HW	95	116	82	1	26	30	26	70	8	8	10	Gn
28	YI48-03	HW	105	110	95	270	20	20	25	60	10	15	20	Gn
29	YI48-04	HW	106	110	96	330	28	30	30	90	10	10	12	Gn
30	YI48-05	HW	95	70	136	330	28	30	30	90	10	10	12	Gn
31	YI48-06	HW	95	116	82	315	30	30	30	70	8	10	10	Gn
32	YI48-07	HW	93	116	80	315	30	30	30	70	8	10	10	Gn
33	YI48-08	HW	100	119	84	290	30	30	30	40	7	8	10	Gn
34	YI48-09	HW	80	132	61	340	30	32	32	40	7	10	12	Gn

W.G., Weathering grade; T, Triggered elevation; R, Elevation of ridge; D.S., Dip direction of slope face; Gn, Gneiss; Gr, Granite; Sc, Schist.

산사태빈도

연구지역은 토석류가 주를 이루는 유동성 산사태가 많이 발생한 지역이다. 산사태 중 대부분은 토석류이지만, 풍화심도가 깊은 일부 사면에서는 토층이 깊게 형성된 사면에서 잘 나타나는 준원호의 형태를 보이기도 한다.

Fig. 5는 연구지역에서 발생한 산사태의 단위면적당 빈도를 지질별로 표현한 것으로 동일 면적에서의 산사태 발생가능성은 편마암지역에서 45%이고, 편암과 화강암지역이 각각 32% 및 23%인 것으로 나타나 편마암지역이 산사태에 가장 취약한 반면, 화강암지역은 취약성이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 이처럼 편마암지역이 가장 높은 발생빈도를 보이고 편암과

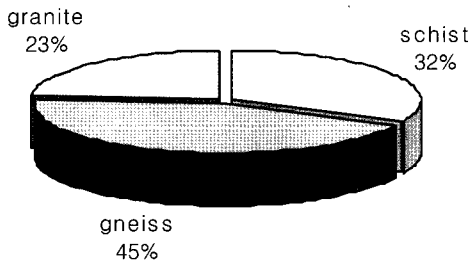


Fig. 5. Relationship between landslide frequency per unit area of different geology in the study area.

화강암의 순으로 낮은 이유는 대체로 운모류가 많이 포함된 편마암지역에 비해 편암은 석영을 많이 함유하고 있어 상대적으로 화강암과 같은 결정질암에 가깝기 때문일 것으로 판단된다. 즉, 편마암은 운모류의 함량이 많아 이 암석의 풍화도층에는 점토질의 함량이 화강암보다 많게 되어 화강암에 비해 상대적으로 전단강도가 작을 수 있다. 그리고 편암의 경우는 석영의 함량이 많은 석영편암 양상을 띠고 있어 풍화에 강할 뿐만 아니라 풍화도층에 점토질이 적게 함유됨으로써 편마암에 비하여 산사태취약성이 더 낮을 것으로 예상된다.

산사태유형

산사태 발생위치는 85%가 평탄한 사면에서 시작되었으며 14%는 계곡에서, 그리고 1%만이 능선부에서 발생한 것으로 나타나 토석류가 발생초기부터 계곡에서 시작되지는 않은 것으로 분석되었다. Fig. 6은 연구지역의 산사태유형을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 전체 산사태의 89%는 전이형태의 산사태로 시작된 토석류이며 나머지 11%는 비교적 두껍게 형성된 풍화토와 붕적층에서 발생한 준원호형태의 산사태인 것으로 확인되었다. 그러나 여기서 언급한 전이형태와 준원호형태는 산사태가 시작되는 지점에서의 형태를 의미하는 것이고 지형조건, 사면매질의 구성, 사태물질의 이동 및 퇴적양상 등을 종합적으로 고려해 볼 때, 거의 대부분의 산사태는 많은 물을 포함한 토석류들이 가파른 사면을 따라 흘러내리는 전형적인 유동성산사태로 변환된다.

산사태규모

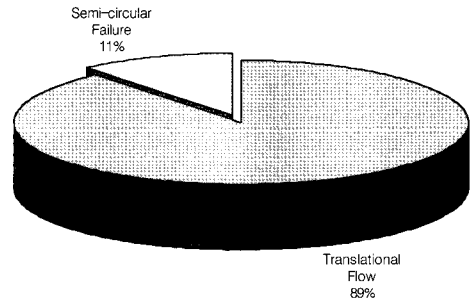


Fig. 6. Distribution of landslide types in the study area.

산사태의 규모는 길이(length), 폭(width) 및 깊이(depth) 등으로 나누어 생각할 수 있다. Fig. 7은 연구지역에서 발생한 산사태의 규모를 나타낸 것으로 산사태는 대체로 소규모적인 양상을 보인다. Fig. 7(a)는 연구지역의 산사태 길이와 발생 빈도수의 관계를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 산사태 길이가 21~30m일 경우 가장 높은 빈도를 보여 점유비율로는 이 범위에 해당되는 산사태가 전체 산사태의 25%를 상회하는 것으로 나타났다. 그 다음으로는 각각 31~40m, 11~20m 및 41~50m 순으로 높은 빈도를 점하는 것으로 나타나 길이 50m 이하인 산사태가 연구지역 전체 산사태의 90% 정도를 차지하는 것으로 분석되었다. 그리고 Fig. 7(b)는 연구지역의 산사태 폭과 발생 빈도수의 관계를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 산사태의 폭도 비교적 소규모적이어서 대부분이 10m 미만으로 전체 산사태의 80% 이상이 이 범위에 해당되는 것으로 나타났다. 그리고 깊이는 거의 대부분 1m 내외로서 매우 얕은(very shallow) 경향성을 보이는데, 시작지점에서의 산사태유형이 원호이거나 준원호형태인 경우는 2m 이상인 곳도 있어 전이형태에 비해서는 더 깊은 것으로 관찰되었다.

토질공학적 특성

산사태의 주요 영향인자인 토층의 전단강도 및 투수계수는 토층을 구성하고 있는 물리적 및 공학적 특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 이 연구에서는 산사태에 유의한 영향인자로 인식되고 있는 여러 물질들의 상관성을 살펴보고 특히, 산사태 발생지점과 발생하지 않은 지점의 토층시료를 구분하여 물성과 전

단강도 및 투수계수를 비교 분석하였다.
연구지역에서 채취된 77개 토층시료에 대한 시험결

과를 정리하면 Table 3과 같이 나타낼 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 연구지역의 토층은 통일분류법(USCS)

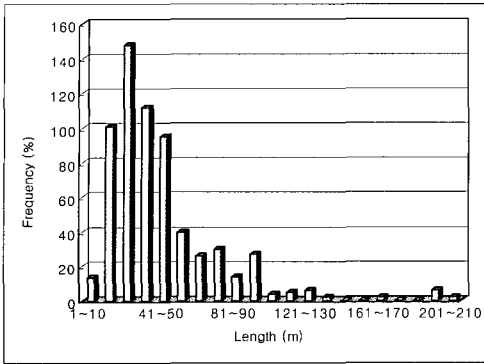
Table 3. Physical and engineering characteristics of the soils collected from the landslide and non slide sites of study area.

Sample No.	Specific gravity	Moisture content (%)	Coefficient		USCS	Void ratio	Sat. degree (%)	Dry density (g/cm ³)	Permeability (cm/sec)	Shear strength		Remarks
			Cu	Cg						Cohesion (kg/cm ²)	Angle of shearing resistance (°)	
AS04	2.66	18.18	33	1.0	SM	1.06	42.72	1.291	8.50E-02			landslide
AS05	2.64	20.88	164	0.8	SC	0.94	56.68	1.363	2.32E-04			"
AS06	2.66	21.36	240	0.3	SC	0.63	27.88	1.634	2.13E-04			"
AS06-11	2.64	9.39	21	3.5	SW-SM	0.98	37.00	1.332	3.41E-03			"
AS07-05	2.67	9.50	21	3.5	SW-SM	0.85	29.34	1.442	4.92E-03	0.247	25	"
AS08-02	2.68	15.76	15	1.1	SM	0.94	46.33	1.379	2.96E-02			"
AS10-18	2.67	11.12	46	1.8	SM	0.81	30.30	1.479	3.64E-03	0.051	39	"
AS11-04	2.68	21.27	42	0.6	SC	0.94	59.42	1.384	2.59E-02			"
AS15-05	2.71	19.93	213	0.7	SC	0.88	64.31	1.445	4.05E-04			"
AS17-09	2.78	18.23	86	0.1	SC	0.74	58.10	1.597	3.77E-04			"
AS18-32	2.64	10.80	907	3.3	SP-SM	0.91	27.04	1.379	2.02E-03			"
AS19-11	2.63	11.26	23	1.3	SM	0.82	41.10	1.449	3.15E-03	0.150	39	"
AS20-11	2.69	26.77	159	0.2	CL	1.12	68.70	1.272	6.62E-04	0.008	36	"
AS23-40	2.62	23.75	79	0.5	SC	0.94	57.74	1.349	1.14E-03			"
AS24	2.64	14.80	250	5.9	SC-SM	0.87	52.60	1.411	4.22E-02			"
YI01	2.63	9.83	76	3.6	SM	0.76	46.49	1.498	1.93E-02			"
YI03	2.69	17.89	90	0.8	SM	0.88	55.08	1.428	4.06E-04			"
YI05	2.66	26.86	153	0.3	CL	0.64	68.80	1.623	1.72E-04	0.045	31	"
YI08	2.71	17.85	90	8.0	SC	0.77	52.30	1.529	3.14E-04			"
YI09	2.65	18.17	10	0.2	SC	0.87	55.64	1.420	1.75E-04			"
YI12	2.66	19.13	936	0.6	SC	0.98	51.51	1.344	8.01E-04	0.047	34	"
YI13	2.68	20.90	164	0.3	SC	1.07	41.73	1.295	4.05E-04			"
YI14	2.62	14.90	922	4.1	SC	1.19	51.48	1.203	1.07E-02	0.011	36	"
YI14-24	2.62	16.96	784	0.5	SC	1.51	47.14	1.044	1.73E-03			"
YI15	2.64	13.05	90	0.9	SC	1.13	48.52	1.237	1.50E-03			"
YI18	2.60	19.54	340	0.8	SC	1.27	60.16	1.148	1.01E-03			"
YI19	2.67	17.86	189	2.4	SM	0.83	57.13	1.457	1.99E-03			"
YI22-03	2.73	16.81	92	0.3	SC	0.92	60.85	1.419	7.60E-04	0.184	33	"
YI23	2.65	8.39	210	0.3	SC	1.09	26.00	1.269	1.35E-03			"
YI24	2.67	21.12	610	0.4	SC	0.77	65.22	1.511	2.74E-04			"
YI25	2.66	11.54	326	0.8	SM	0.99	41.85	1.338	3.62E-03			"
YI26	2.65	15.51	188	0.3	SC	0.93	47.38	1.371	5.87E-04	0.147	30	"
YI29	2.63	17.99	146	0.3	SC	1.21	59.38	1.191	9.66E-04			"
YI30-23	2.71	18.96	137	0.2	CL	1.00	56.02	1.359	3.15E-04			"
YI32-03	2.63	19.95	343	0.4	SC	1.50	47.95	1.053	3.07E-03			"
YI34	2.71	13.92	272	0.8	SC	0.52	79.28	1.785	2.68E-04			"
YI35	2.69	20.39	67	0.4	CL	0.71	72.80	1.576	2.48E-04			"
YI36-01	2.60	16.90	169	1.1	SC	1.18	60.33	1.197	3.10E-03	0.010	38	"
YI39-02	2.66	11.59	535	2.3	SC	0.99	50.48	1.335	2.22E-03	0.008	36	"
YI40-08	2.69	16.94	249	0.4	SC	0.84	54.33	1.466	7.21E-04			"

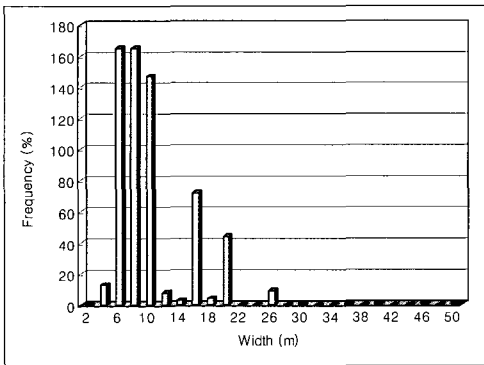
Cu, uniformity coefficient; Cg, coefficient of gradation; USCS, unified soil classification system; SM, silty sands; SC, clayey sands; SW, well graded sands; SP, poorly graded sands; CL, Inorganic clays.

Table 3. Continued.

Sample No.	Specific gravity	Moisture content (%)	Coefficient		USCS	Void ratio	Sat. degree (%)	Dry density (g/cm ³)	Permeability (cm/sec)	Shear strength		Remarks
			Cu	Cg						Cohesion (kg/cm ²)	Angle of shearing resistance (°)	
AS53	2.73	20.10	71	1.5	SW-SM	0.90	61.37	1.440	8.53E-03			non slide
AS57	2.68	20.10	118	1.9	SC	1.12	47.98	1.260	3.22E-03			"
AS58	2.63	17.82	40	1.4	SW-SM	1.00	47.09	1.318	2.39E-02			"
AS59	2.65	22.85	158	0.6	SC	1.33	45.86	1.140	1.79E-03			"
AS60	2.69	34.74	129	0.6	CL	1.59	58.66	1.040	3.95E-04	0.015	37	"
AS61	2.64	40.58	78	1.5	SC	1.60	67.09	1.017	7.25E-04			"
AS62	2.63	19.69	131	1.5	SC	1.22	42.43	1.180	2.75E-03			"
AS63	2.69	25.41	109	0.6	CL	1.20	56.84	1.220	1.99E-04			"
AS79	2.62	18.53	26	1.4	SC	1.16	41.96	1.214	4.96E-02	0.027	36	"
AS80	2.71	6.92	9	1.8	SW-SM	0.84	22.19	1.470	1.14E-02			"
AS81	2.69	23.00	21	1.1	SM	1.51	40.93	1.070	3.49E-04			"
AS82	2.77	24.98	43	0.8	SC	1.37	50.43	1.168	3.09E-03			"
AS83	2.71	17.22	97	0.9	SC	1.32	35.39	1.170	3.32E-03			"
AS84	2.67	17.73	97	1.3	SC	1.05	44.99	1.300	7.16E-04	0.045	34	"
AS85	2.76	10.85	58	1.3	SC-SM	1.54	19.34	1.088	1.82E-02			"
AS86	2.71	16.68	128	0.5	SC	1.39	32.57	1.140	2.02E-03	0034	38	"
AS87	2.63	11.34	123	1.0	SC	0.94	31.53	1.350	2.25E-03	0.179	36	"
AS88	2.63	17.54	139	1.0	SC	0.89	52.10	1.395	3.29E-04			"
YI51	2.67	16.56	135	1.7	SC-SM	0.86	51.68	1.440	2.13E-03			"
YI52	2.69	23.55	150	0.3	SC	0.98	62.95	1.380	2.12E-04			"
YI54	2.73	14.10	121	1.3	SC-SM	0.95	40.53	1.400	8.48E-04			"
YI55	2.66	28.25	100	0.5	SC	1.53	49.17	1.050	7.73E-04			"
YI56	2.63	19.78	79	0.4	SC	0.71	73.24	1.540	2.24E-05			"
YI64	2.64	26.56	68	1.8	SC-SM	1.39	50.59	1.106	1.41E-04	0.019	37	"
YI65	2.71	24.04	138	0.3	SC	1.23	52.94	1.210	1.30E-03	0.146	39	"
YI66	2.73	20.81	30	1.5	SC-SM	1.14	50.05	1.280	5.06E-03			"
YI67	2.74	18.35	114	0.5	SC-SM	0.93	55.07	1.428	5.50E-04			"
YI68	2.65	12.93	69	1.4	SC	1.05	32.52	1.290	2.10E-03			"
YI69	2.66	18.63	80	0.8	SC	1.15	42.99	1.240	3.01E-04			"
YI71	2.70	17.87	21	0.2	CL	0.90	53.52	1.420	2.16E-03			"
YI72	2.70	13.65	138	0.4	SC-SM	1.28	29.17	1.190	1.31E-03	0.175	33	"
YI73	2.61	21.46	74	1.3	SM	1.22	45.96	1.180	2.08E-03			"
YI74	2.63	17.98	121	0.6	SC	0.81	58.12	1.451	4.80E-04	0.017	35	"
YI75	2.70	15.94	91	1.2	SC	0.94	45.63	1.390	4.11E-04			"
YI76	2.72	12.65	34	0.4	SC-SM	0.89	38.74	1.450	4.70E-02			"
YI77	2.69	19.28	77	0.4	SC	1.03	50.69	1.328	4.48E-04			"
YI78	2.73	17.55	31	0.6	CL	0.97	48.94	1.390	5.21E-04			"



(a)



(b)

Fig. 7. Relationship between landslide scales and frequency in the study area. (a) length, and (b) width.

에 의해 대부분이 점토질 모래 혹은 실트질모래로 분류되는데, 이는 주로 지질조건과 관계되는 것으로서 산사태 발생여부와 다소의 관련성이 관찰되나 특징적으로 구분되지는 않는다.

입도분포

Fig. 8은 연구지역의 산사태발생지역과 미발생지역에서 채취한 토층시료에 대한 입도시험 결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태발생지역의 토층시료는 모래의 구성비가 높으며 자갈들이 많이 섞여있는 양상을 보이는 반면, 미발생지역의 토층시료는 대체로 실트나 점토크기의 입자구성비가 높고 자갈크기의 조립들은 비교적 낮은 비율의 구성비를 보인다. 이러한 차이점은 산사태가 일어나지 않은 지점에 비해서 산사태가 발생한 지점의 토층 중에는 사

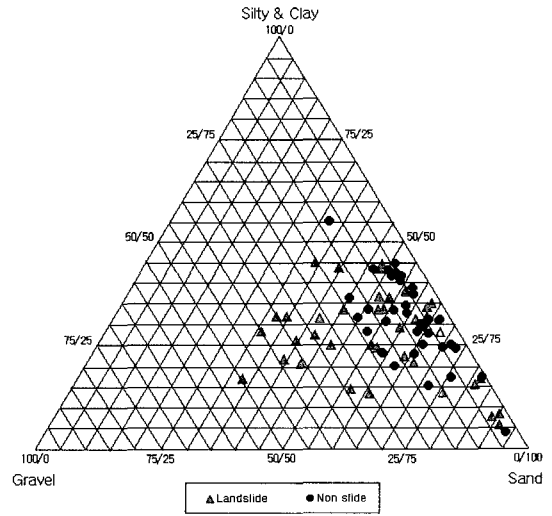


Fig. 8. Distributions of grain sizes of soil samples from landslide non slide sits (after Giannecchini and Pochini, 2003, modified).

면의 상부로부터 토석류들이 흘러내려와 쌓여 있는 물질 즉, 붕적토들이 상대적으로 많다는 점을 보여주는 결과라고 생각된다. 이러한 결과는 산사태발생지역은 잔류토와 붕적토가 혼재되어 있는데 반해 미발생지역은 주로 잔류토로만 구성되어 있는 양상을 보여주는 것으로, 현장조사 결과와도 대체로 일치된 경향성을 보인다. 이로 미루어 보아 붕적토가 주로 분포한 지역은 잔류토의 분포비가 우세한 지역에 비해 산사태의 발생가능성이 상대적으로 높을 것으로 판단된다.

물성간 상관관계

기존에 수행된 연구(Kozeny and Carman, 1956; Amer and Awad, 1974; 김경수 외, 2004)에 의하면, 여러 토질인자들 중에서 전단강도와 투수계수에 영향을 미치는 인자로는 균등계수(Cu), 곡률계수(Cg), 간극비 및 건조밀도 등을 들 수 있다. Fig. 9는 균등계수, 곡률계수, 간극비 및 건조밀도에 대한 시험결과를 산사태 발생지역과 미발생지역으로 각각 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 이들 물성들은 산사태 발생지역과 미발생지역간에 차이점이 있음을 알 수 있다. 균등계수와 곡률계수는 평균치를 기준으로 했을 때 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 더 큰 것으로 나타났는데, 미발생지역은 모두 140 이하의 균등

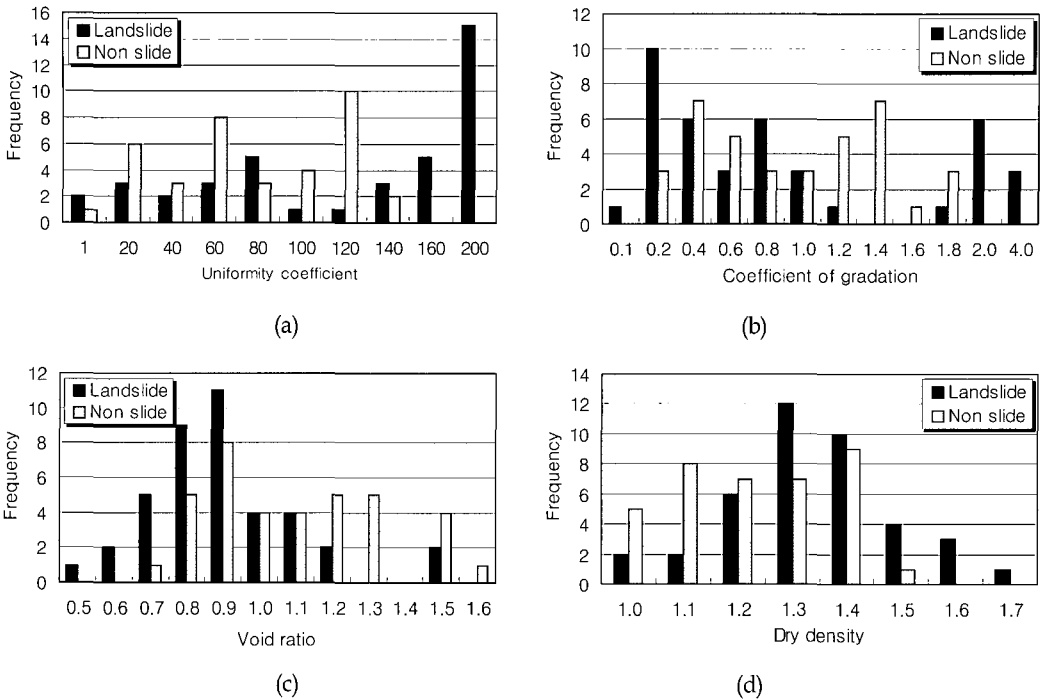


Fig. 9. Relationship physical elements of soil samples from the landslide and non slide sites. (a) Uniformity coefficient, (b) Coefficient of gradation, (c) Void ratio, and (d) Dry density.

계수값을 가지며 그 이상은 모두 산사태발생지역에 해당된다. 그리고 곡률계수도 이와 유사한 경향성을 보여 미발생지역은 모두 1.8 이하이고 그 이상은 대부분 산사태발생지역에 해당되는 것으로 나타났으며, 특히 산사태발생지역의 균등계수는 1.2이하이거나 1.8 이상으로 분급되는 양상을 보였다.

간극비와 건조밀도는 평균치를 기준으로 했을 때 산사태발생지역이 각각 0.95 및 1.38g/cm³로서 미발생 지역의 1.13 및 1.27g/cm³에 비해 작은 간극비와 큰 밀도를 가지는 것으로 나타났다. 이를 자세히 살펴보면, 간극비는 산사태발생지역이 0.52~1.51의 범위로서 대부분 1.2 이하의 값을 가지는 반면, 미발생지역은 0.71~1.60의 범위로서 산사태발생지역에 비해 대체로 큰 간극비를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 건조밀도는 산사태발생지역이 1.04~1.78g/cm³의 범위를 보이는데 반해 미발생지역은 1.02~1.54g/cm³로서 산사태발생 지역이 전반적으로 큰 밀도를 가지는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 연구지역 토층시료에 대한 간극비와 건조밀도, 습윤밀도 및 포화밀도의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 간극비와 밀도는 상호 반비례

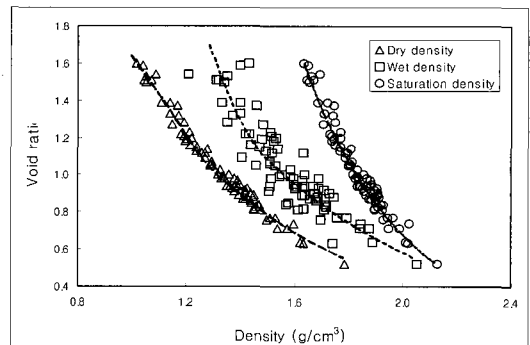


Fig. 10. Relationship between void ratio and density of soil samples from the landslide and non slide sites.

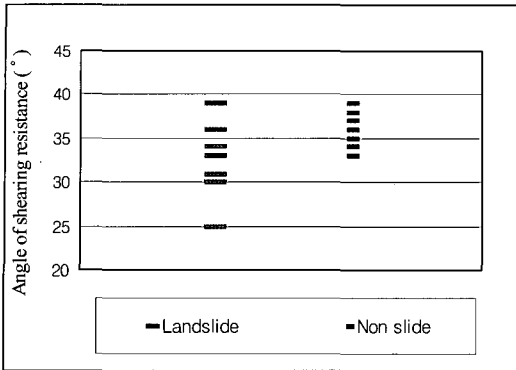


Fig. 11. Distribution shear strength of soil samples from the landslide and non slide sites.

관계에 있으며, 건조, 습윤 및 포화밀도는 서로 밀접한 관련성이 있는 물성으로 이들은 정비례적 관계에 있음을 알 수 있다. 또한, 이는 김경수 외(2001, 2004)의 연구결과와도 일치하는 경향성을 보였다.

전단강도

전단시험결과 점착력은 0.008~0.247kg/cm², 전단저항각은 25~39°의 범위를 보였는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 중간정도 (medium dense)인 사질지반에 해당하는 값이다. Fig. 11은 연구지역의 토층시료에 대한 직접전단시험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태발생지역의 전단저항각은 25~39°이고 미발생지역의 전단저항각은 33~39° 정도인 것으로 나타나 산사태발생지역이 부분적으로 낮은 전단저항각을 가지는 것으로 분석되었다. 평균치를 기준으로 하였을 때, 전단저항각은 산사태발생지역이 34°로서 미발생지역의 36°에 비해 다소 작은 경향성을 보이는 것으로 나타났으며 평균치에 못 미치는 시료들은 대부분 산사태발생지역에 해당되는데, 이는 전단강도가 낮은 토층이 산사태에 더 취약함을 반증하는 결과인 것으로 해석된다. 또한, 점착력은 산사태발생지역이 0.083kg/cm²로서 0.073kg/cm²인 미발생지역에 비해 다소 큰 것으로 나타났다.

투수성

투수계수는 전단강도와 함께 산사태를 일으키는 요소 중 가장 중요한 역할을 하는 인자로 이해되고 있는

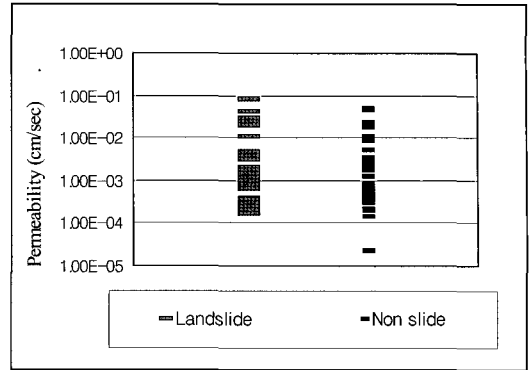


Fig. 12. Distribution permeability of soil samples from the landslide and non slide sites.

데, 연구지역에서의 토층시료를 대상으로 시험한 결과에서도 투수계수는 산사태와 상관성이 있는 것으로 분석되었다. Fig. 12는 연구지역의 토층시료에 대한 투수시험결과를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 투수계수는 2.24×10⁻⁵~8.50×10⁻²cm/sec의 범위에 있는 것으로 나타났다. 이는 Darcy(1856)에 의하면, 대부분 세립모래~실트질토 정도의 투수계수에 해당하는 것으로서 투수성이 보통~약간 빠른 지반으로 평가될 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태발생지역의 투수계수는 1.72×10⁻⁴~8.50×10⁻²cm/sec의 범위이고 미발생지역의 투수계수는 2.24×10⁻⁵~4.96×10⁻²cm/sec 범위를 보였는데, 평균치는 각각 6.55×10⁻³cm/sec와 5.42×10⁻³cm/sec로서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 투수성이 약간 큰 것으로 나타났다.

결론

산사태를 야기하는 요인들 중에서도 강우는 주요한 외적 요인에 해당되는데, 얼마의 기간동안 얼마나 많은 양의 강우가 산사태를 일으키는지를 알기는 매우 어렵다. 다만, 24시간 내에 연평균 강우량의 20% 이상 일 때 대형 산사태가 발생할 수 있고, 2~3일간의 짧은 기간 내에 내리는 집중강우는 지질조건이나 수문지질 조건에 관계없이 산사태를 발생시킨다는 기존의 보고들이 있다. 연구지역인 용인·안성지역에서도 1991년 7월 19일부터 21일까지 3일간에 걸친 약 250mm의 집중강우가 있었으며, 이로 인하여 660여개의 산사태가 발생되었다.

이 연구에서는 집중강우로 인해 발생된 용인.안성 지역의 산사태들에 대하여 위치, 지형, 지질, 기하형태 및 강우 등을 조사하여 산사태의 발생양상을 분석하였다. 그리고 토질특성에 따른 산사태의 특징을 규명하기 위해 산사태가 발생한 지역과 발생하지 않은 지역에서 각각의 토층시료를 채취하고 실내시험을 통해 토층의 공학적 특성을 평가하였다. 이와 같은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 자연사면의 토층에서 발생하는 산사태는 대부분 집중강우에 의해 발생되고, 발생초기에는 전이형슬라이드로 시작되어 사태물질이 가파른 사면과 계곡을 따라 빠르게 흘러내리는 유동성산사태로 변환되는 양상을 보였다.

2) 발생위치는 대부분 능선가까이의 평탄사면에서 비롯되었으며, 지형적으로 약간 오목한 부근에서 주로 발생하였다. 그리고 급사면보다는 대체로 완만한 사면에서 더 높은 발생빈도를 보였으며, 특히 30도 전후인 사면에서 가장 많이 발생되었다.

3) 산사태는 비교적 소규모로서 길이 50m 이하의 산사태가 전체의 90% 정도이고 폭은 10m 미만인 80% 이상을 차지하였다. 그리고 깊이는 대부분 1m 내외로서 매우 얇은 경향성을 보였다.

4) 산사태가 발생한 지역의 토층은 붕적토가 많아 대체로 자갈과 모래의 함유비가 높은 조립질인데 비해서 발생하지 않은 지역은 대체로 실트나 점토입자인 세립질의 구성비가 높다.

5) 산사태가 발생한 지역의 토층은 전단저항각이 25~39°로서 발생하지 않은 지역의 33~39°에 비해 부분적으로 낮은 전단저항각을 갖는다. 그리고 평균치를 기준으로 하였을 때도 산사태발생지역은 34°로서 미발생지역의 36°에 비해 전단저항각이 약간 낮은 것으로 나타났다.

6) 산사태가 발생한 지역의 토층은 투수계수가 $1.72 \times 10^{-4} \sim 8.50 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위이고 발생하지 않은 지역은 $2.24 \times 10^{-5} \sim 4.96 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위를 보였다. 그리고 투수계수의 평균치는 각각 $6.55 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 및 $5.42 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로서 산사태발생지역이 미발생지역에 비해 투수성이 더 큰 것으로 나타났다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 '산사태위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발' 연구

의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 지질공학, 10, 2, 163-174.

김경수, 2001, 지형 및 토질특성을 고려한 산사태 예측, 한국지질자원연구원 논문집, 5, 4, 29-41.

김경수, 이문세, 조용찬, 채병곤, 이춘오, 2004, 지질에 따른 토층사면의 토질공학적 특성 -부산 황령산지역-, 지질공학, 14, 4, 487-498.

김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천-철원지역을 대상으로-, 지질공학, 8, 2, 115-130.

김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09.

김원영, 채병곤, 김경수, 조용찬, 최영섭, 이춘오, 이철우, 김구영, 김정환, 김준모, 2003, 산사태 예측 및 방지기술연구, 과학기술부, KR-03-(T)-03.

여상철, 임주환, 1974, 한국지질도 이천도폭, 국립지질광물연구소.

오인섭, 박석환, 1973, 한국지질도 오산도폭, 국립지질광물연구소.

오인섭, 윤윤영, 1972, 한국지질도 수원도폭, 국립지질조사소.

이상만, 김형식, 송용선, 1989, 안성도폭지질보고서, 한국동력자원연구소.

최 경, 1986, 한국의 산사태 발생 요인과 예지에 관한 연구, 강원대학교 박사학위 논문, 45p.

홍원표, 송영석, 2002, 우리나라에서의 사면안정 대책 공법 적용사례연구, 사면안정학술발표회 논문집, 1-28.

홍원표, 김원영, 송영석, 임석규, 2004, 인공신경망모델을 이용한 산사태 예측, 한국지반공학회 논문집, 20, 8, 67-75.

Amer, A. M., and Awad, A. A. 1974, "Permeability of Cohesionless Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 100, GT12, 1309-1306.

Anderson, S. A., Sitar, N., 1995, Analysis of rainfall-induced debris flow. Journal of Geotechnical Engineering, ASEC 121, 7, 544-552.

Brand, E. W., 1981, Some thoughts on rain-

- fall-induced slope failures. Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3, 373-376.
- Brenner, R. P., Tam, H. K., Brand, E. W., 1985, Field stress path simulation of rain-induced slope failure. Proceedings 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2, 991-996.
- Brunsdon, D., 1985, Landslide types, mechanisms, recognition, identification. Proceedings of landslides in the South Wales, 18-29.
- Dai, F. C., Lee, C. F., Xu, Z. W., 2001, Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong, Environmental Geology, 40, 2, 381-391.
- Darcy, H., 1856, Les Fontaines Publiques de la Ville de Digon, Dalmont, Paris.
- Giannecchini, R., Pochini, A., 2003, Geotechnical influence on soil slips in the Apuan Alps (Tuscany): first results in the Cardoso area. Proc. International Conference on Fast Movements-Prediction and Prevention for Risk Mitigation (IC-FSM 2003), 241-245.
- Griffiths, J. et al, 1990, Engineering geomorphology, Bull. of engineering geology, 42, 39-44.
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, Journal, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE, 82, SM, 1867.
- Hutchinson, J. N., 1988, Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology, In Landslides Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, 1, 3-35.
- Ikeya, Hiroshi, 1978, Classification of debris flows, Civil Engineering Journal, 20, 3, 44-79.
- Ikeya, Hiroshi, 1989, Debris flow and its counter-measures in Japan, Bull. of the IAEG, 40, 15-33.
- Johnes, D. K. et al. 1983, A preliminary geomorphological assessment of part of the Karakoram highway, The Q. J. of Engineering Geology, 16, 4, 331-355.
- Kozeny, J., and Carman, P. E., 1956, Flow of gases Through Porous Media, Academic, New York.
- Mathewson, C. C., Keaton, J. R., Santi, P. M., 1990, Role of bedrock ground water in the initiation of debris flows and sustained post flow stream discharge. Bulletin of Association of Engineering Geologists 27, 1, 73-83.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T., Loague, K., 1997, Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. Water Resources Research 33, 1, 91-109.
- Olivier, M. et al., 1994, The effect of rainfall on slope failure, with examples from the Greater Durban area, Proc. 7th Int. Cong. IAEG, 3, 1629-1636.
- Sitar, N., Anderson, S. A., Johnson, K. A., 1992, Conditions leading to the initiation of rainfall-induced debris flows. Geotech. Engrg. Div. Specialty Conference: Stability and Performance of Slopes and Embankments-II. ASEC, 834-839.
- 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.

투 고 일	2005년 5월 7일
심 사 일	2005년 5월 8일
심사완료일	2005년 6월 15일

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

김원영
 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30
 Tel : 042-868-3345
 Fax : 042-861-9723
 E-mail : kwy@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

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel : 042-868-3035

Fax : 042-861-9723

E-mail : yssong@kigam.re.kr