

우리나라 산사태의 형태분류에 따른 사례

김원영, 김경수, 채병곤, 조용찬(한국자원연구소 환경지질연구부)

Case study of landslide types in Korea

Won-Young Kim, Kyeong-Su Kim, Byung-Gon Chae, Yong-Chan Cho

(Environmental Geology Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials)

요 약 : 우리나라에서 가장 흔히 발생하는 산사태는 쇄설성유동(debris flow)이며 이는 집중 호우 시기인 6월-8월 사이에 대부분 발생한다. 조사통계에 의하면 2일간의 강우량이 200mm 이상일 때 발생하기 시작한다. 이들은 산사면의 노두 발달이 양호한 지역에서는 발생하지 않으며 노두가 없는 지역에서만 발생한다. 초기에는 전이형슬라이드(translational slide)로 시작되며 파괴물질이 산사면의 계곡으로 유동되면서 쇄설성유동으로 전이된다. 쇄설성유동의 원인이 되고있는 전이형 슬라이드의 발생인자는 강우와 인위적 조건을 제외하면 암석의 종류, 지형고도, 사면경사, 입도분포, 투수계수, 건조밀도, 공극율 등이다. 이들 발생 인자들의 통계처리, 특히 로지스틱 회귀분석에 의하여 인자들의 정량적 가중치를 구하여 산사태 발생 확율을 정량화 하였다.

암반포행(rock mass creep)은 대부분 경상계 퇴적암지역에서 발생되며 직접 원인은 거의 사면 하단 부의 절토 때문이다. 전단전이는 적은 편으로 1m 내외이나 포행암반의 규모가 크기 때문에 매우 위험하다. 칠곡, 부산 황룡산 터널입구, 사천 산사태 등이 이 범주에 속한다. 포행의 원인이 되는 상부 전단대는 대부분 주변에 발달되어있는 단층이나 대규모 전단절리와 연관되어 있어 사면설계 조사시 지질구조에 주의를 요한다.

회전형 슬라이드(rotational slide)는 토양층이 두껍거나 기반암이 심히 풍화된 연약층에서 발생하며 이들도 흔히 사면 하단부의 절토와 연관되어있다. 이 산사태는 원호 또는 반원호형으로 진행되는 특징이 있으며 우리나라에서는 제3기 응회암 지역이 취약하다. 이는 화산재와 화산쇄설 물질이 혼재된 제3기 응회암의 절리가 매우 잘 발달되어있어 팽윤과 흡수율이 높고 이로 인하여 심부까지 풍화에 취약하기 때문으로 경주 산사태와 포항-구룡포간 국도변의 산사태가 이 종류의 산사태에 속한다.

주요어 : 쇄설성유동, 전이형 슬라이드, 암반포행, 회전형 슬라이드

Abstract : The most dominant type of landslide in Korea is debris flows which mostly take place along mountain slopes during the rainy season, July to August. The landslides have been reported to begin activation when rainfall is more than 200mm within 2days. The debris flows are usually followed by translational slips which occur upper part of mountain slopes and they transit to debris flow as getting down to the valleys. Lithology, location, slope inclination, grain size distribution of soil, permeability, dry density and porosity have been proved as triggering factor causing translational slides. The triggering data taken from mapping are statistically analysed to get landslide potential quantitatively.

Rock mass creeps mostly occur on well bedded sedimentary rocks in Kyeongsang Basin. Although the displacement of rock mass creep is relatively small about 1m, the

creep can cause severe hazards due to relatively large volume of the involved rock mass. Examples are rock mass creep occurred in the mouth of Hwangryongsan Tunnel, in Chilgok and in Sachon in 1999. Although the direct factor of the creeps are due to slope cutting at the foot area, more attention is required

A rotational slide occurring within thick soil formation or weathered rock is also closely related to bottom part of slope cutting. It is propagated circular or semi-circular type. Especially in Korea, the rotational slide may be frequently occurred in Tertiary tuff area. Because they are mainly composed of volcanic ash and pyroclastic materials, well developed joints and high degree of swelling and absorption can easily cause the slide. The landslide among the Pohang-Guryongpo national road is belong to this type of slide.

Keywords : debris flow, translational slide, rock mass creep, rotational slide

1. 서 언

산사태를 형태(type)에 따라서 분류할 때 대체로 낙반(fall), 토폴(topple), 슬라이드(slide), 측면 퍼짐(lateral spread), 유동(flow)으로 분류하고(UNESCO Working Party, 1990, EPOCH, 1993), 파괴면의 모양(form)에 의하여 분류할 때는 평면(planar), 쐐기(wedge), 단계(stepped), 원호(circular), 준원호(semi-circular) 등으로 분류할 수 있다. 또한 이들의 생성이 복합적인 작용에 의한 것인가 아닌가에 따라 단일(single) 또는 복합(multiple)이라는 용어를 사용하기도 한다(Brunsdon, 1985, Hutchinson, 1988).

우리나라에서는 대체로 쇄설성유동(debris flow), 암석낙하(rock fall), 암석과 토양 슬라이드(planar slide), 암반포행(rock creep) 및 회전형 슬라이드(rotational slide) 5가지 형태의 산사태가 많이 발생한다. 그중 산사면 계곡부를 따라 발생하는 쇄설성유동 형태의 산사태가 가장 많다. 쇄설성 유동은 산사면 상부의 잔류토양과 붕적토에서 발생하는 전이형슬라이드(translational slide) 물질이 계곡부로 유동하여 발생한다. 그러므로 전이형슬라이드를 수반하지 않는 쇄설성 유동은 규모가 크지 않은 것이 특징이다. 1996년부터 1998년까지 3년간 경기도 일대에서 조사한 통계자료에 의하면 이와 같은 산사태는 2일간 200mm 이상의 집중강우가 있을 때 발생한 것으로 확인되었다(김원영 외, 1999).

암반포행은 암반 내부의 약대를 따라 파괴면이 형성되면서 발생되는데 우리나라에서는 경상계 퇴적암 지역에서 흔히 발생하고 있다. 대표적인 사례가 부산 황룡산 터널 입구에서의 대형 산사태와 사천지역의 산사태 등이다. 이는 빈도수에 있어서 쇄설성 산사태보다 훨씬 적지만 개개 산사태에 대한 재해 측면을 고려할 때 위험성이 크다. 우리나라에서 발생한 이런 종류의 산사태는 대부분 단층이나 전단절리 등 큰 규모의 불연속면과 연관되어 있다.

회전형 슬라이드는 토양층이나 토양과 같이 심히 풍화된 암반이 심하게 불연속면이 발달할 때 발생하는데 우리나라의 경우 토양층의 심도가 비교적 얇기 때문에 풍화 암반층에서 주로 발생한다. 포항 부근에서 발생한 회전형 산사태도 이 지역의 제3기 화산암이 풍화에 매우 취약하여 발생한 것이다.

이번 연구에서는 앞에서 언급한 쇄설성 산사태, 암석포행 및 회전형 산사태에 관한 사례를 현장에서 조사한 자료를 토대로 언급하였다.

2. 쇄설성 유동(debris flow)

최근 3년간 경기도 지방에 많은 산사태가 발생하였다. 이중 대부분은 쇄설성 유동 산사태로서 경기도뿐 아니라 우리나라에서 발생하는 이런 종류의 산사태는 대부분 7, 8월에 집중되는 호우에 기인되는 것으로 알려져 있다. 우리나라의 연 평균 강우량은 1,200mm 정도이나 이 중의 절반 이상이 7, 8에 집중될 뿐 아니라 최근 3년간 경기도 일대에서 측정된 강우자료에 의하면 2-3일간에도 최대 600mm 이상이 기록된 바도 있다. Olivier(1994)는 24시간 동안의 강우량이 연 평균 강우량의 20%를 초과할 경우 대형 산사태가 일어날 수 있다고 보고한 바 있고 Brand(1984)와 Premchitt(1986)는 짧은 시간에 내리는 집중강우는 지질조건이나 수문지질 조건과 관계없이 대형 산사태를 일으킬 수 있다고 보고한 바 있다. 이와 같은 보고는 '96년 6월과 '98년 8월 및 '99년 8월에 경기도 북부에 내린 집중호우가 대형 산사태를 일으킬 만한 충분한 강우조건을 갖춘 것이다.

분류상으로 볼 때 경기도 지역의 산사태는 슬라이드와 유동으로 분류되는데 사태가 발생한 상부에서는 슬라이드로 시작되었고 슬라이드 물질이 하부로 전이되면서 유동형태로 변하였다. 전이형 슬라이드는 미끄러짐 면이 평면을 형성하는 비-원호파괴(non-circular failure)의 형태를 보이는데 이는 미끄러짐 면이 다른 부분에 비하여 전단응력이 현저히 낮을 때 발생한다. 이와 같은 현상은 대체로 집중호우 또는 지진의 영향으로 발생하는 경우가 많은데(Caine, 1980) 이 지역은 집중호우의 결과로 발생한 것으로 해석된다. 집중호우에 의한 파괴는 갑작스런 공극수압의 상승으로 인하여 전단강도의 급격한 저하를 초래하게되어 사태를 일으키는 것으로 알려지고 있다. 이 지역의 전이형 슬라이드는 산사태의 최 상부로부터 시작되고 길이는 10~100m까지 다양하게 나타난다. 산사태가 시작되는 지점에는 1~2m 정도의 외호(scarp)를 형성하고 있어 사태가 발생되기 전 인장크랙(tension crack)이 급격히 발달되었음을 알 수 있다.

이 지역의 암설유동 물질은 세립 토양(모래, 실트, 점토)과 자갈, 암편, 불더 등의 혼합으로 구성된다. 암설(debris)은 세립물질이 50%를 초과하지 않는 범위 내에서 암편과 세립질인 모래, 실트, 점토들이 서로 혼재된 상태를 의미하는데(Varnes, 1978), 이것이 유동할 때는 발생지점의 수압과 암편의 중력이 복합적으로 작용하기 때문에 세립물질로만 구성된 토양유동(sediments flow)에 비하여 규모와 속도가 커지게 된다.

이 지역의 암설유동은 주로 V형 계곡을 따라 발생되었는데 대개는 전이형 슬라이드와 복합적으로 발생되었다. 즉, 비교적 평탄한 산 사면에서 전이형 평면파괴가 일어나고 파괴된 물질이 하부로 이동되면서 주위의 물질과 혼재되어 암설유동의 형태로 변이 되면서 계곡을 따라 흘러내리는 양상을 나타낸다. Fig. 1은 1:5,000 지형도에 표시한 산사태들 중 하나로서 산사태 상부의 진한 색의 둥근 모양은 산사태 발생지점의 전이형 슬라이드이고 그 밑의 옅은 부분은 쇄설성 유동을 나타내고 있다.

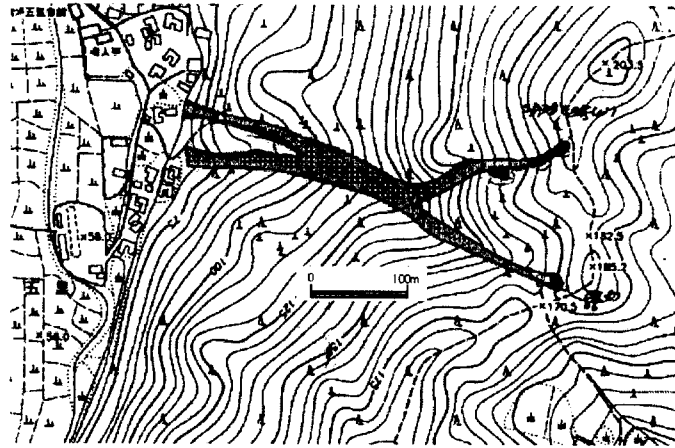


Fig. 1. Plan view of the landslide; translational slide of upper part transits into debris flow getting down to the valley.

2-1. 발생인자

강우조건이 산사태를 일으키는 가장 큰 요인이지만 사면의 형태와 파괴 전단특성은 강우 외적 조건으로 중요한 요소이다.

자연 사면의 형태는 지형에 의해서 결정되므로 지형은 사면파괴 분석 요소 중 가장 중요한 사면의 기하학적(slope geometry) 형태를 결정해 줄뿐 아니라 산사태 자체가 지형발달의 한 과정이므로 산사태 발생과 밀접히 연관되어 있다(Johnes,1983, Griffiths et al,1990). 기하학적 형태를 결정하는 지형자료로는 산사태가 발생한 지점의 고도, 경사각, 경사방향, 표면 굴곡정도 등이다

쇄설유동형 산사태는 발생지점에서의 파괴 메카니즘에 의하여 규모가 좌우되므로 사태 발생지점에서의 지형특성이 중요하다. 즉, 산사태 최 상부 전이형 슬라이드(translational slip)의 지형 특성에 관한 것으로 쇄설성유동 산사태의 대부분은 전이형 슬라이드의 파괴에 연이어 후속적으로 발생하기 때문이다.

슬라이드 파괴는 능선에 가까울 수록 발생빈도가 높아지는 경향을 보인다. 산사태 발생 고도(해수면 기준)와 능선의 고도와 의 비를 백분율로 계산하여 그 값으로 산사태 빈도를 보면 90% 이상의 값을 보이는 고도에서 산사태 발생빈도가 가장 높고 그 다음이 80-90%, 70-80%의 순으로, 고도가 낮아질 수록 발생빈도가 감소하고 있으며 고도가 더욱 낮아져 70% 이하로 내려가면 산사태는 급격히 감소한다. 예를 들어 능선의 고도가 500m일 경우 450m 이상의 고도(90% 이상)에서 산사태의 발생 확률이 가장 높고 350m 이하의 고도(70% 이하)에서는 발생할 확률이 급격히 저하된다. Fig. 3은 산사태의 발생위치별 고도를 발생 빈도로 표시한 것으로 능선으로부터 고도가 낮아질 수록 산사태의 발생빈도가 현저히 감소됨을 보여준다(Fig. 2).

산 사면의 경사각을 기준으로 볼 때 산사태가 가장 많이 발생한 지역의 경사는 26~30도이며 이 범위에서 전체 산사태의 32%가 일어났다. Fig. 3은 산사태 발생지점에서의 경사각에 따른 산사태의 발생 빈도와 산사태의 전체 길이에 대한 평균 경사를 표시한 그림으로서 산사태 발생지점에서의 경우 경사가 20도 미만일 때는 산사태가 거의 발생하지 않으나 20도보다 경사가 커지면서 산사태 발생은 급격히 증가함을 보여준다. 그러나 경사각이 30도

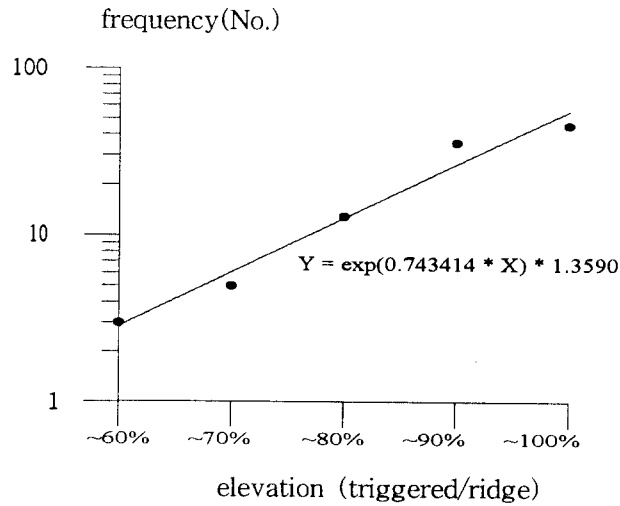


Fig. 2. Landslide frequency exponentially increase as topographic elevation becomes high. Diagram showing frequency number against elevation.

가 될 때까지 급격히 상승하던 발생빈도는 경사각이 30도보다 커지면서 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다. 산사태의 전체 길이에 대한 평균 경사도와 산사태 발생빈도를 비교하여도 유사한 경향을 보이고있어 결국 30도 전후의 경사면에서 산사태가 가장 빈번히 일어남을 알 수 있다.

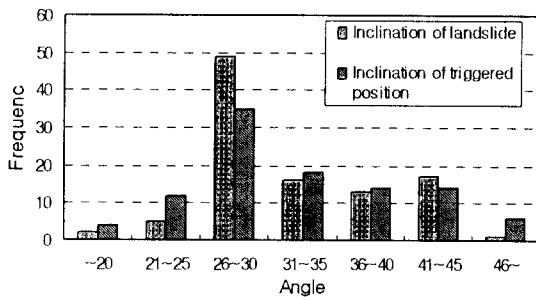


Fig. 3. Inclination of landslides and slope face at landslides triggered position.

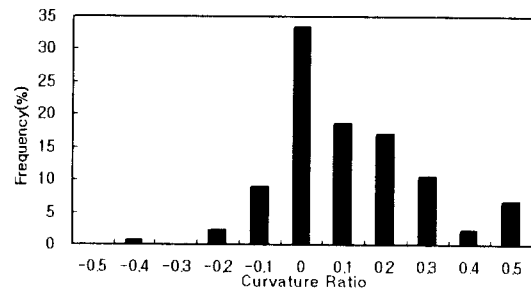


Fig. 4. Landslide frequency vs slope surface curvature

산사태가 발생하는 지점의 산 사면은 비교적 평탄한 지형적 특성을 보이고 있다. 산사태 발생 지점의 표면 굴곡도는 거의 대부분 평탄면(planar surface)에서 발생되었다(Fig. 4). 즉, 평탄한 산 사면에서 전이형 파괴가 일어나고 파괴된 물질들이 주위의 계곡으로 흘러들어 쇄설성 유동의 양상으로 변하게 되었다.

사면의 기하학적 형태와 더불어 사면파괴를 결정하는 중요 요소는 파괴면의 전단특성이다. 암석에서의 전단파괴는 암석 불연속면의 특성에 좌우되므로 암석 사면에서는 파괴 불연속면의 전단특성을 규명하는 것이 중요하다. 토양 사면에서도 전단 파괴면이 어느 정도 알려져 있을 경우 파괴면에 대한 전단특성을 규명할 수 있다.

그러나 여기서는 특정 사면에 대한 설계 값이나 안전율을 구하는 목적이 아니고 일반적으로 일어나고 있는 자연 산 사면의 파괴 원인을 찾고자 하는 것이므로 산사태를 일으키는

일반적인 파괴물질의 성질만을 살피고자 하였다. 경기도 지역에서의 산사태는 대체로 기반암 상부의 토양이 파괴되어 일어나는 양상을 보이므로 여기서는 토양의 특성만을 파악하였다.

어떤 지역에 분포하는 토양의 물리적 성질은 그 지역에 분포하는 암석과 연관되어 있을 것이고 결과적으로 암석의 분포 현황을 파악하면 토양의 물리적 성질을 어느 정도 유추할 수 있게 될 것이다. 이와 같은 관점에서 산사태를 일으키는 토양 물성치의 한계를 규명하는 것은 산사태를 일으키는 암석들의 상대적 평가를 가능하게 할 것이다.

우리나라의 산사태는 대부분 기반암 상부의 토양의 붕괴에 의한 것이다. 여기서 말하는 토양은 Varnes(1978)가 정의한 암편과 풍화암을 포함한 미 고결 물질을 통칭하는 용어로서 연구지역의 산사태에 의한 파괴물질도 세립토양 뿐 아니라 약간의 풍화 암편이 포함된 물질로 구성되어 있다.

산사태의 파괴 메카니즘의 하나인 토양의 전단특성은 토양의 물리적 성질에 의하여 좌우되므로 산사태를 일으킨 지점의 토양과 그렇지 않은 지점의 토양과의 물리적 성질을 비교하면 산사태를 일으키는 물성치의 한계값을 구할지도 모른다. 이러한 관점에서 연구지역에서 산사태가 일어난 지점에서 81개의 토양시료와 일어나지 않은 지점에서 64개의 시료를 채취하여 실내 물성시험을 실시하였다.

시료당 총 8개종의 물성 시험을 실시하여 산사태 지점과 그렇지 않은 지점에서의 물성 비교를 검토하였다. 그 결과 함수비, 공극율, 공극비, 밀도 등 모든 부분의 물성값에서 약간의 차이를 보이고 있다. 함수비의 경우 같은 조건에서 시료가 채취되지 않으면 비교 자료로서 사용할 수 없기 때문에 큰 의미는 없다. 또한 실험에 의하여 나타난 물성치만을 가지고 산사태의 발생 여부를 판단할 수는 없는 것으로 보인다. 그러나 개개 물성치와 산사태 빈도의 관계(Fig. 5)를 살펴보면 산사태 발생이 토양 물성과 어느 정도의 관련성이 있음을 알 수 있다.

산사태를 일으키는 요인 중 투수계수는 가장 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 연구지역에서 채취한 토양 시료를 대상으로 시험한 결과와 산사태 빈도수의 관계를 살펴보면 투수계수가 높을 수록 산사태가 발생할 확률은 현저히 감소됨을 나타내고 있다.

투수계수 시험은 화강암 지역에서 11개, 흑운모 편마암 지역에서 24개, 운모편암 지역에서 5개 등 39개의 시료를 대상으로 하였는데 투수계수는 화강암이 편마암이나 편암보다 약 1 order 정도 높은 반면(Fig. 6), 단위 면적 당 산사태 발생 빈도는 화강암이 편마암의 1/2 만큼 감소하는 현상을 보이고 있다(Fig. 7).

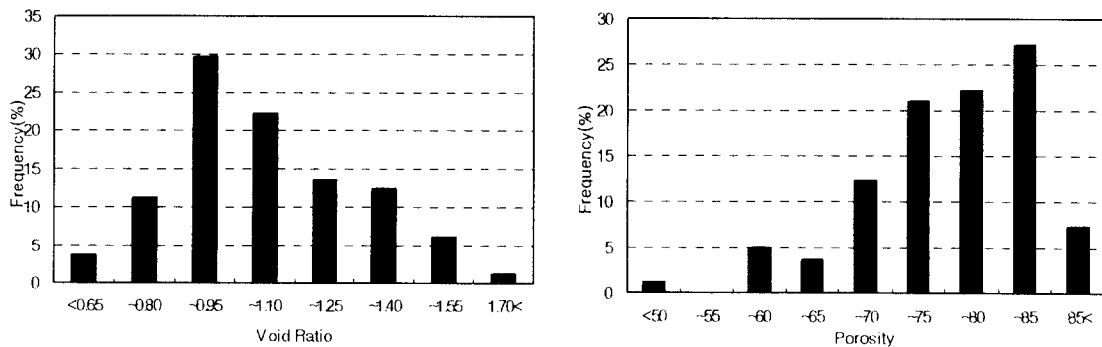


Fig. 5. The frequency of landslide vs void ratio and porosity.

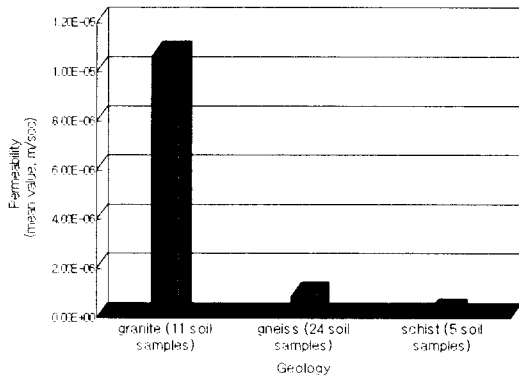


Fig. 6. Permeability values of three different rock masses; granite, biotite gneiss and mica schist.

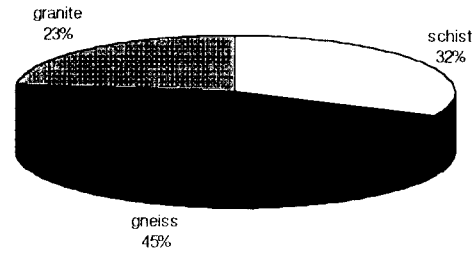


Fig. 7. Landslide frequency within unit area in three different rock masses.

2-2. 산사태발생예측도 작성

산사면에서 발생하는 전이형 슬라이드의 발생 가능성을 예측함으로써 debris flow의 예측도 가능하다. 앞에서 지적하였듯이 전이형 슬라이드는 debris flow의 발생 여부에 직접적 영향을 주는 원인을 제공하기 때문이다.

이를 위하여 산사태 조사된 발생인자를 통계 처리하고 처리된 자료들을 GIS 기법에 의하여 산사태발생예측도(혹은 산사태발생등급도)를 작성하였다(Fig. 8). 기존의 산사태 관련 연구에서는 발생인자에 대한 가중치를 주관적으로 설정하거나, 혹은 이를 고려하지 않은 상태에서 산사태 취약성과 발생가능성을 추정하였다. 이 경우 산사태가 발생할 가능성이 잘못 예측되어 왜곡된 결과가 도출될 수 있다. 이러한 오류를 배제하기 위해 이 연구에서는 통계적 기법을 이용해 현장조사 결과 및 실내시험에서 획득한 자료와 인자를 대상으로 각 인자별 상호관련성을 검토하였다. 상호관련성이 높은 인자들을 별도로 추출해서 이들이 산사태 발생에 기여하는 상대가중치를 결정하고, 이를 토대로 실제 산사태가 발생한 지역에 적용하여 통계적 측면에서의 타당성을 검증하였다. 이러한 과정을 통해 산사태 발생에 큰 영향을 미치는 인자들을 추출하고, 이 인자들의 정확한 가중치를 부여할 수 있다.

통계기법을 통한 산사태 영향인자별 가중치 설정에 이용한 자료는 총 표본수 116개로 산사태가 발생한 지점 79개소와 산사태 미발생 지점 37개소이다. 그리고 상기한 바와 같이 산사태에 영향을 미치는 변수로 총 9개의 변수가 선정되었다. 9개의 변수 중 암질과 USCS 입도분포는 수치 데이터가 아닌 명목형 데이터이며, 그 외 7개의 변수는 모두 수치 데이터이다.

먼저 변수들의 상호 연관성 및 구조적 특징을 파악하기 위하여 주성분 분석을 실시하고 주성분 분석을 통하여 몇 개의 주성분을 판별변수로 이용할 수 있을지를 점검해 보았다. 이 분석의 궁극적인 목적은 전술한 대로 통계적으로 산사태에 유의한 영향을 미치는 변수들을 찾아내고, 이러한 변수들을 토대로 산사태 발생 여부를 예측하는데 있다. 따라서, 그러한 예측을 위한 통계기법의 하나인 로지스틱 회귀분석(logistic regression analysis)을 통하여 단계적으로 유의한 변수들을 선택하고 선택된 변수들로 이루어진 하나의 판별함수를 구하였다. 이 분석을 위해 사용한 통계 패키지는 SPSS 9.0과 SAS E-Miner이다.

1차 기본적 통계처리를 통해 산사태 발생에 영향을 주는 요인으로 지질 및 토질자료로

는 암질(lithology), 공극율(porosity), 건조밀도(dry density), 입도분포(grain size distribution), 투수계수(permeability)를, 지형자료로는 고도(elevation), 사면경사방향(dip direction), 사면경사(dip angle), 산사태 시작부 사면경사(angle of top)를 각각 선정하였다.

산사태에 영향을 미치는 인자를 확률적으로 구하기 위해 주성분 분석과 로지스틱 회귀 분석을 이용한 결과, 암질, 건조밀도, 입도분포, 공극률, 투수계수, 고도, 사면 최상부 경사 등이 산사태에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 주성분 분석법보다는 로지스틱 회귀 분석법이 보다 합리적인 산사태 예측 방법인 것으로 확인되었다. 로지스틱 회귀분석법에 의하여 산사태 발생인자의 가중치를 정량화 하였으며 이를 일부지역에서 검증한 결과 적용성이 높은 것으로 확인되었으며 이는 Fig. 8과 같다.

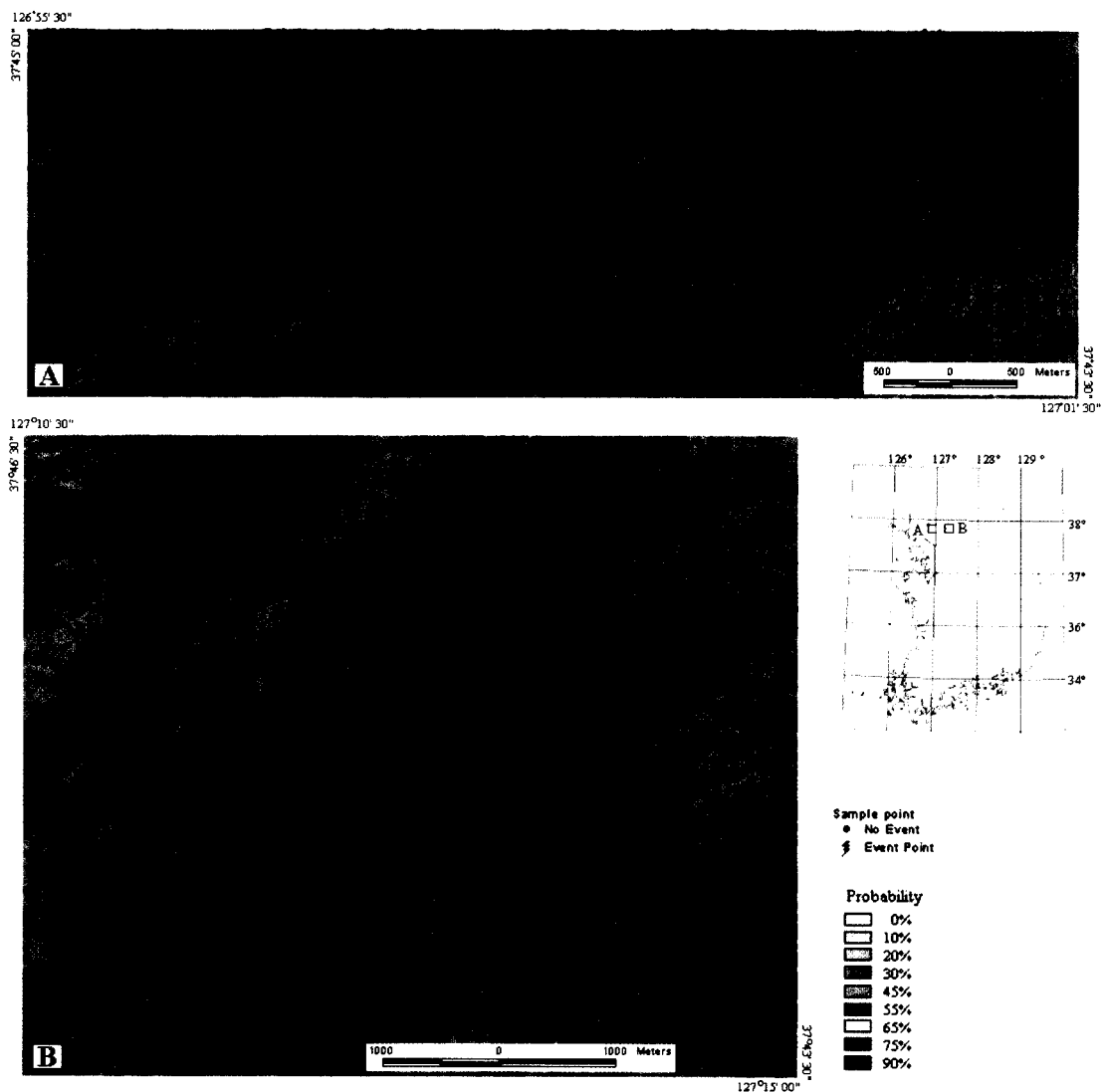


Fig. 8. Map showing quantitative probability of landslide potential; the colored area indicates maximum probability.

3. 암반포행(rock mass creep)

암반포행은 분류상 암반유동(rock flow)에 해당한다(Brunsdén, 1985). 암반포행은 sagging, deep seated gravitational creep 등의 용어로도 쓰이는데 이는 암반포행이 다른 산사태에 비하여 파괴면이 비교적 깊은 심도에 발달하면서 서서히 중력파괴가 일어나기 때문이다. 그러므로 암반포행은 층리면이 잘 발달된 암반이나 불연속면이 심히 발달된 암반에서 나타나기 쉽다. 또한 이런 형태의 산사태는 후면도플(backward topple)이나 columnar 슬라이드의 형태를 띠는 경우가 많다.

암반포행은 대부분 다음과 같은 특징을 갖고있는데(Dramis and Sorriso Valvo, 1994);

- 1) 규모는 비교적 커서 최대 수천 m^3 에 이르며 심도도 크게는 수십 m에 이른다.
- 2) 파괴는 반드시 연속된 면을 따라서 일어나지는 않는다.
- 3) 규모에 비하여 파괴 변위는 작은 것이 특징이다.
- 4) 상부는 인장 전단면이 생기는데 이것이 진행되면서 graben-ridge-ridge depression 또는 trough 등의 지형 형태를 형성한다.

암반포행의 발생원인은 명확히 규명된 바는 없으나 Mencl(1968)과 Zischinsky(1969)가 제시한 모델에 의하면 사면 중심부위에 압력이 집중되고 전단을 일으키기에는 주변압력이 작기 때문에 연성파괴(viscous deformation)가 일어난다고 주장하였다. 그러나 Savage와 Varnes(1987)은 연성파괴는 연속성이 있는 전단파괴면을 따라 진행되는 파괴로 인하여 암반 내에서 생성되는 것으로 파괴면 상부에서는 전단파괴가 일어나지만 하부로 갈수록 파괴양상이 달라질수 있음을 설명하였다.

우리나라에서 발생한 암반포행은 아래에서 설명하는 칠곡 산사태, 부산 황룡산 터널입구에서의 도로붕괴, 사천시 사면붕괴 및 삼척-태백간의 지방도의 도로붕괴 등 여러 사례가 있다. 그중 삼척-태백간의 지방도 붕괴를 제외하면 모두 경상계 퇴적암 지역에서 발생한 것이다.

3-1. 칠곡 산사태

이 산사태는 1998년 9월 경북 칠곡군 왜관읍 지천면 금호리 일대에서 발생하였다. 이 지역은 경상누층군 내 신동층군 최하부 지층인 낙동층이 분포하는 지역으로 담회색의 중립질 내지 조립질 사암이 주구성 암석이다(Fig. 9). 그리고, 사암층 사이에 실트암 또는 세일등이 얇게 협재한다. 산사면에 나타나는 암석은 풍화를 많이 받았으며, 특히 사암은 심한 풍화로 인해 쉽게 부서지는 양상을 보인다.

이 지역에서 발생한 사면붕괴 경계부의 상단부는 고각의 경사와 수직에 가까운 미끄럼선을 보여주며 수직과 수평변위를 보여주고 있으며, 동쪽경계는 기존에 존재했던 N40W, 90°의 자세를 보여주는 좌수향 단층에 의해 규제되어 이 단층면이 경계를 형성하고 있으며, 서쪽경계는 단일 경계면이 존재하는 것이 아니라 이 지역의 절리인 N80E, 80SE와 N20W, 85NE 방향의 단열들이 마치 톱날모양을 보여주면서 서쪽을 경계 짓고 있다.

이 지역에서 파괴가 일어나지 않은 곳의 주향과 경사는 대체로 N40E, 23~25SE 정도이며, 파괴가 된 지점에서는 주향은 다소 불규칙하게 변하지만, 경사각은 원래의 경사보다는 작은 10~20° 내외를 보여주고 있다. 파괴가 일어난 곳 정상에서 북북동 방향으로 약 50m 지점에서 40~60cm정도의 층후를 가지는 녹색 세일층이 관찰되는데 이 지층의 자세는 대체로 N68E, 30SE를 나타내지만, 노두상에서 관찰 할 때 암층 단면의 중심부에서 양 끝단으

로 갈수록 경사각이 다소 더 급해지는 양상을 관찰할 수 있다. 또한, 사면 최하단에서 상단부와 동일층이라 판단되는 세일층이 관찰되는데, 이들은 N40E, 15SE 주향과 경사를 보여주고 있다.

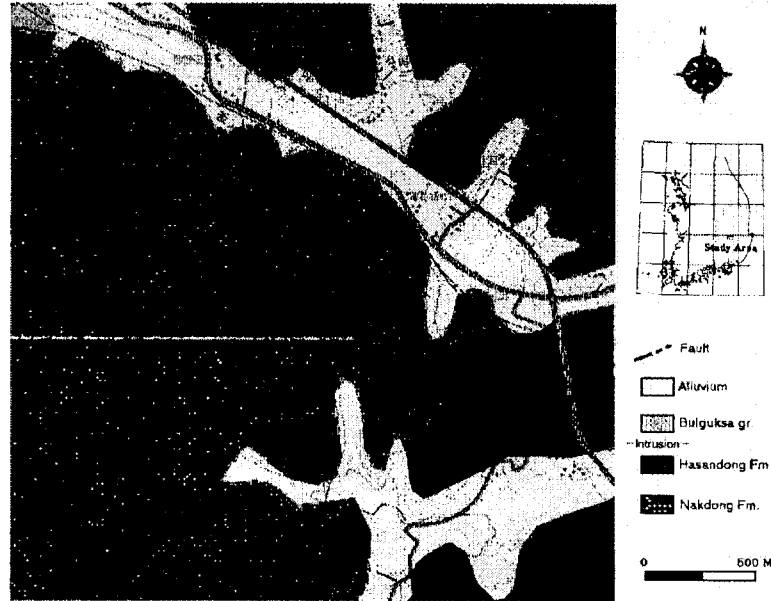


Fig. 9. Geologic map of the Chilgok area.

이 지역에서 관찰되는 단층면은 대체로 두 방향이다. N54W/90°, N70E/80SE ~ N88E/90° 로서, 이 두 방향의 단층이 산사태 지역 전역에 걸쳐 발달한다. 붕괴된 산사면의 동측 최외각은 N54W의 단층으로 경계 지워진다. 이 단층면 상에는 약 1cm 두께의 점토가 피복되어 있다. 점토 피복면 하부의 단층면에는 N150°의 선주향과 7° 선경사를 갖는 저경사 단층조선이 명확하게 발달한다. 점토면 상에는 50°의 선경사를 갖는 단층조선이 발달한다. 이 단층조선은 정감각(normal) 경사이동 운동을 한 것으로 판단되며, 점토 피복면 하부에서는 관찰할 수 없어 사면붕괴 발생시 암반의 마찰에 의해 형성된 것으로 생각한다.

N70E/80SE 방향의 단층면은 붕괴가 발생한 사면의 최상단에 나타나는 것으로 이 단층면에도 역시 점토가 피복되어 있다. 점토 피복면 하부의 단층면에는 두개 성분의 단층조선이 발달한다. 즉, N134°의 선주향에 57° 선경사 및 20° 선경사를 갖는 두 가지 단층조선이다. 57° 선경사의 조선은 정감각(normal sense)의 경사이동성 단층운동을 지시하고, 20° 선경사의 조선은 좌수향 주향이동 운동을 나타낸다. 이 두 단층조선 중 57° 선경사의 조선이 20° 선경사의 조선을 단절시키는 양상으로 보아 경사이동성 단층운동이 주향이동성 운동보다 후기에 일어났음을 짐작할 수 있다. 즉, 단층면 생성 당시에 좌수향 주향이동운동을 하고, 그 후 산사태가 발생하면서 고경사의 정감각 경사이동 운동을 한 것으로 해석할 수 있다.

이 지역의 대부분의 절리들은 연장성이 좋으며 서로 평행한 방향을 나타내는 규칙절리 상태로 분포하고 있다. 이들 절리의 평균 방향은 다소 약간의 변화를 보여주는 하지만 대체로 N80E, 80SE와 N20W, 85NE를 보인다. 이들 대부분은 경사각이 90° 에 가까운 고각이며 다소 절리틈을 가지는 신장성 절리의 특징을 나타내며 붕괴된 산사면의 서측 경계를 규제한다(Fig. 10).

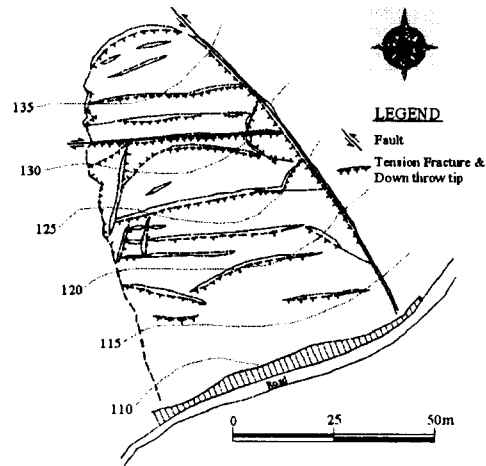


Fig. 10 Plan view of the landslide.

암반의 전단강도를 측정하기 위해, 층리면을 대상으로 한 직접전단시험을 실시하였다. 전단강도시험을 위해 층리면 사이에 점토가 협재된 사암을 채취하였다. 시험결과 채취한 시료 모두 낮은 전단강도 값과 내부마찰각을 보여준다.

일반적으로 암석이 강우나 지하수에 의해 완전 포화되면 전단강도는 시험 결과치 보다 훨씬 감소하는 것으로 알려져 있다(Rodrigues & Sousa,1981) 이런 측면을 고려해 산사태가 발생했을 당시의 강우자료를 살펴보면, 산사태 발생지역 인근의 대구와 구미에서 9월 중 최대 일강우량이 각각 225.8mm와 221.0mm에 이르러 이는 국내에서 발생하는 하절기 집중강우의 성격을 나타내는 것으로서, 암반을 충분히 포화시킴은 물론, 층리면의 전단강도를 현저히 약화시키는 결정적 역할을 수행했을 것으로 생각된다.

3-2. 발생원인

산사태가 발생한 사면의 중단부에는 1970년대에 개설한 임도가 있다. 이 임도는 1998년 초에 확장공사를 수행하면서 산사태가 발생한 사면을 60° 경사로 절개하였다. 절개면과 이 지역에 발달하는 층리면, 절리 및 단층과의 관계를 도해적 방법으로 살펴보면 대부분의 층리면이 절개면으로 인해 불안정한 상태에 놓인다(Fig. 11). 즉, 저각도의 경사를 가진 층리면이지만 사면의 절개가 층리면의 평형을 잃게 하는 결정적인 역할을 해 아주 느린 속도로 사면 변이가 발생하게 된 것이다.

한편, 이 인장단열을 따라 많은 양의 집중강우가 침투하면 전술한 바와 같이 층리면 사이의 실트질 내지 점토물 등이 강우를 다량 함유하게 된다. 빠른 속도의 배수가 이루어질 경우는 점토내 수분함유가 작아 층리면 사이의 전단강도 감소가 미약할 것이나, 배수가 원활히 이루어지지 않고 점토물질이 강우를 장기간 함유하게 됨으로써 유효응력과 전단 마찰력이 감소되고, 결국 전단강도가 현격히 감소된다. 이에 따라 사면을 구성하는 암반의 미끄러짐이 더욱 가속화되었다.

이 산사태의 또 다른 특징은 산사태의 단일 주 활동면이 존재하지 않고 층리면을 따라 블록형태로 파괴된 점이다. 블록형태의 암반은 현장에서 잘 관찰할 수 있다. 파괴된 암반을

자세히 관찰하면 미약하지만 다수의 층리면을 따른 slip이 관찰되며, 큰 규모의 산사태 기저부가 나타나지 않고 임도 변에서 블록형태로 무너진 부분만이 관찰됨을 통해 단일 주 활동면이 존재하지 않음을 알 수 있다.

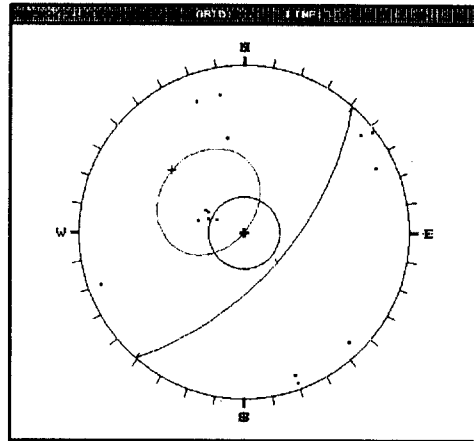


Fig. 11. Graphical analysis of slope stability. Most of bedding planes are plotted in unstable area. The internal friction angle is 20 degrees.

따라서 이 산사태의 활동변위는 미미할 것으로 생각되며 이는 암반포행의 일반적 특징이기도하다. Fig. 12는 Mahr(1977)의 암반포행 모델을 칠곡 산사태 지역에 적용시킨 도식도로서 파괴면의 대부분이 연성변형된 모양을 나타내고 변위는 작게 나타나는 특징을 보여준다.

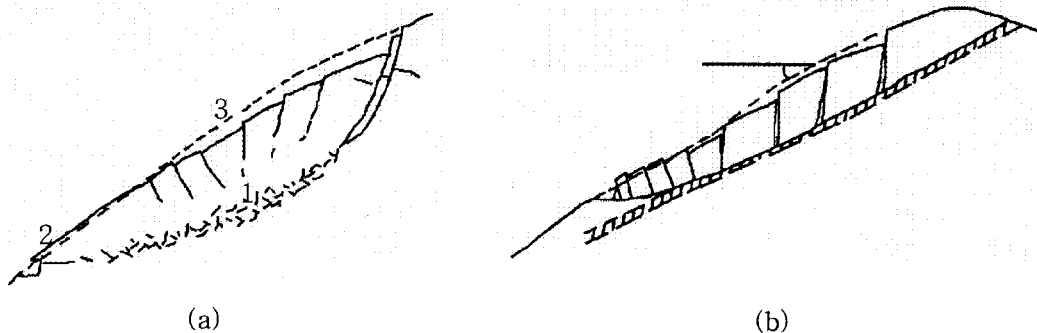


Fig. 12. Schematic cross section of the landslide. (a)1:zone of viscous deformation; 2:zone yielded by shearing; 3:shearing in the brittle(shallow) zone to accommodate for the volume decrease in the ductile(deep) zone(after Savage and Varnes,1987). (b)Schematic cross section of the studied landslide.

4. 회전형 산사태(Rotational slide)

이런 형태의 산사태는 전단면이 잘 발달되어있음이 특징으로 원호(circular)파괴나 수퓌형(spoon) 파괴의 형태를 띄는 것이 일반적이다. 파괴면은 단일, 복수 또는 여러 개가 연속적으로 발달할 수 있으며 암석, 토양 또는 쇄설물 내의 어느 곳에도 발달할 수 있다. 규모는 매우 다양하여 수 메타에서 수 km까지 발달될 수 있다.

일단 파괴가 시작되면 파괴물체(mass)는 새로 생성되는 횡 절리에 의하여 몇 개의 블록으로 나뉘어진다. 이들 블록들은 파괴면 상부에서는 사면 후위(backward)쪽으로 향하고 하부에서는 파괴면이 상부로 올라오게되어 부풀어 오른 양상(bulging)을 띤다.

이런 형태의 산사태는 토양이나 쇄설 퇴적물이 투겹게 쌓인 지역이나 산림이 빈약한 토양층 등에서 가장 많이 발생한다. 그러나 기반암 일지라도 심하게 불연속면이 발달하였을 경우 흔히 발생되는데 점토질암과 여러 다른 종류의 암층으로 구성된 퇴적암층이 회전형 산사태에 취약하다. 많은 산사태는 사면하부에 건설공사 또는 하천에 의한 절단면이 있을 경우 등과 연관되어있는 경우가 많다(Varnes, 1978). 인위적 원인이 제공되지 않은 경우 발생 원인으로서는 지진, 폭파진동 또는 강우에 의한 급격한 지하수위 상승 등이 있는데 특히 강우에 의한 지하수위 상승과 건기의 수위하강이 반복되면 산사태의 발생을 촉진시킨다. 우리나라에서 회전형 슬라이드의 특징적 예는 포항-구룡포간의 국도확장 공사구간으로 그 규모에 있어서는 우리나라 산사태중 가장 큰 것 중의 하나이다.

4-1. 경주 산사태

이 산사태는 1999년 8월 경북 경주시 양북면 용동2리에서 발생하였다. 산사태가 발생한 지역은 산지와 산 중턱의 농경지로 이루어져 있으며, 산 하부는 폭 2-3m의 하천이 흐른다. 붕괴가 일어난 사면의 서측 경계 끝부분에는 인가가 위치하고 있다. 이 산사태로 인해 전답 2천평과 임야 3천평, 분묘 3기가 매몰되고, 가옥 일부에 균열이 발생하는 피해를 입었다(경주시, 1999).

이 지역은 제3기 최하부의 유문암질 용결응회암, 응회질 사암 및 역암으로 구성된다(Fig. 13). 파괴단면에 노출되는 노두는 대체로 풍화가 많이 진행되지 않은 상태이며, 사면파괴 당시 지반의 이동에 의해 생성된 조선(striation)이 희미하게 관찰된다.

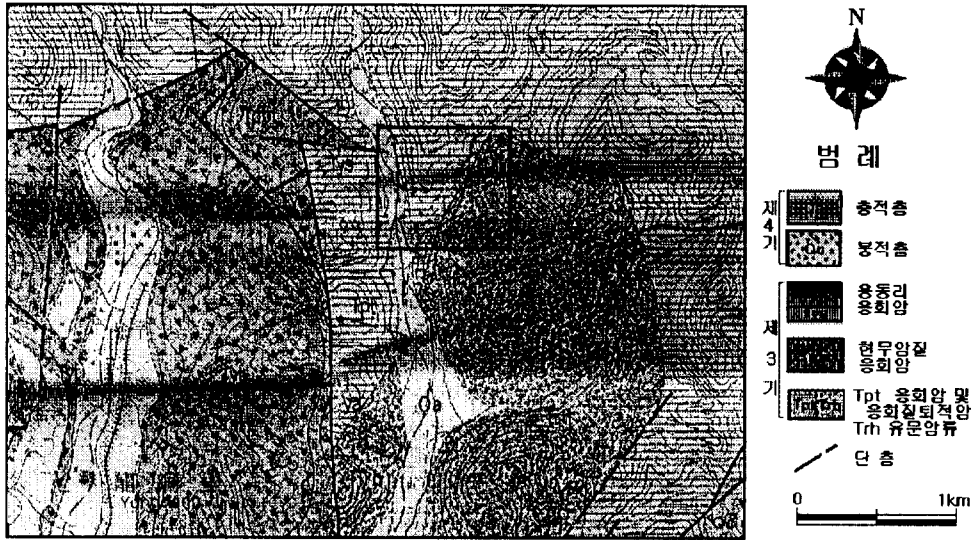


Fig. 13. Geologic map of the Kyungju area.

이 산사태는 저각도의 지형경사에서 발생한 반원호파괴(Semi-circular failure)이다. 붕괴된 사면의 지형은 대체로 완만한 부분으로서 22° 의 평균 경사를 보인다. 산사태의 길이는 165m, 폭은 52m 정도이며 두께는 지표하 약 10-15m 정도에 이를 것으로 추정된다. 산사태 시작부는 N10W의 서측 경계부와 N50W의 동측 경계부가 서로 접해 삼각형 형태를 이룬다 (Fig. 14). 시작부의 파괴면 경사는 36° 로서 비교적 완만한 경사를 이루고, 수직낙차는 1.5m이다. 산사태는 시작부를 기준으로 N130° 방향으로 진행된 양상이다.

산사태의 서측 경계부는 얇은 계곡에 위치하고 동측 경계부는 평평한 사면에 위치한다. 서측 경계부는 산사태 기저부(toe)를 중심으로 해서 N10W의 방향으로 발달한다. 서측에서의 파괴단면은 날카롭게 절단된 양상을 보이며, 붕괴된 수직낙차는 산사태 시작부에서 약 1.5m, 중간부에서 약 3.5~4.0m 이고, 최대 수직낙차는 6m에 이른다. 경계부 인근 원지반에는 2차 단열(secondary fracture) 또는 인장단열(tension fracture)등이 관찰되지 않는다. 붕괴된 지반 서측부에는 2기의 분묘가 위치하는데, 이 분묘의 파손부를 통해 개략적인 변이량을 추정할 수 있다. 2차원 평면상에서 분묘의 이동거리는 N-S, E-W 방향에서 각각 12.8m, 6.9m 이다. 붕괴 전 위치와 붕괴 후 위치간의 수직경사는 20° 이며, 실 이동(net slip)은 18m로 측정되었다. 즉, 이 부분에서는 N130° 방향으로 20° 의 수직경사를 가지며 18m 이동하였다.

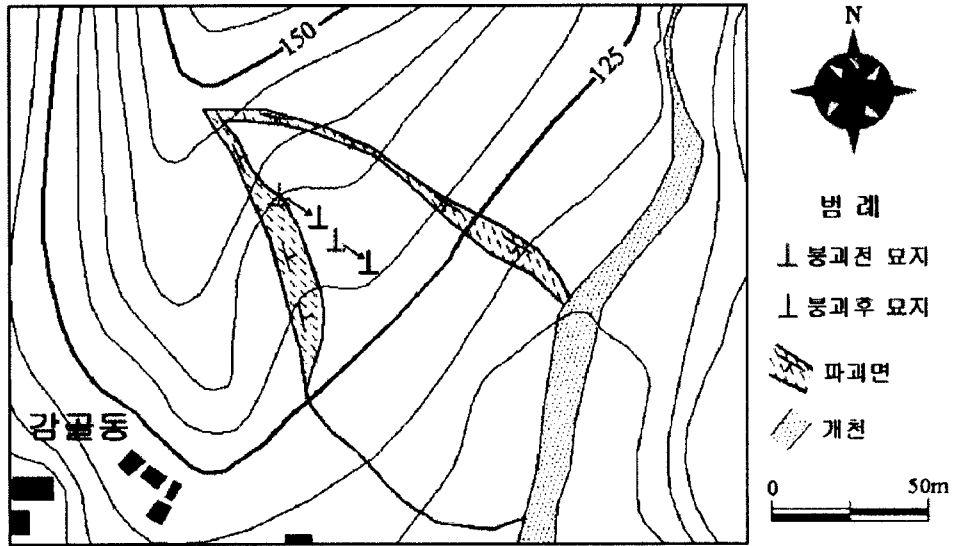


Fig. 14. Plan view of the Kyungju area.

동측 경계부는 N50W의 방향으로 날카로운 단면을 형성하며 발달한다. 동측에서는 10m의 NW-SE방향 변이와 2.0-3.5m의 수직낙차를 보인다. 이 부분은 지반이 N130° 방향으로 이동한 관계로 NW-SE 방향의 변이만 관찰된다.

산사태 시작부에서 약 50m 하부 지점부터는 붕괴지반이 상승하는 양상을 보인다. 회전 미끄러짐(rotational slip)에 의해 시작부는 원지반보다 표고 상으로 낮게 위치하지만, 회전축의 역할을 하는 50m 지점 하부에서는 붕괴지반이 원지반 보다 높아지기 시작하여, 약 100m 지점에서 지반의 상승폭은 약 3-4m 정도로 최대에 이른다(Fig. 15).

산사태가 발생한 당시 인근의 울산, 영천 지역의 강우자료를 보면 8월의 월 누적강우량은 울산이 447.4mm로써 상당히 많은 강우량을 나타냈다. 특히, 8월 4일은 108.8mm의 일 최대강우량으로 집중강우가 내렸고, 18일과 23일에도 각각 46.0mm, 36.0mm의 비교적 많은 비가 내렸다. 이런 상태에서는 지하수위가 상승하여 지표면 직 하부까지 완전포화상태에 이르게 되었을 것으로 추정된다.

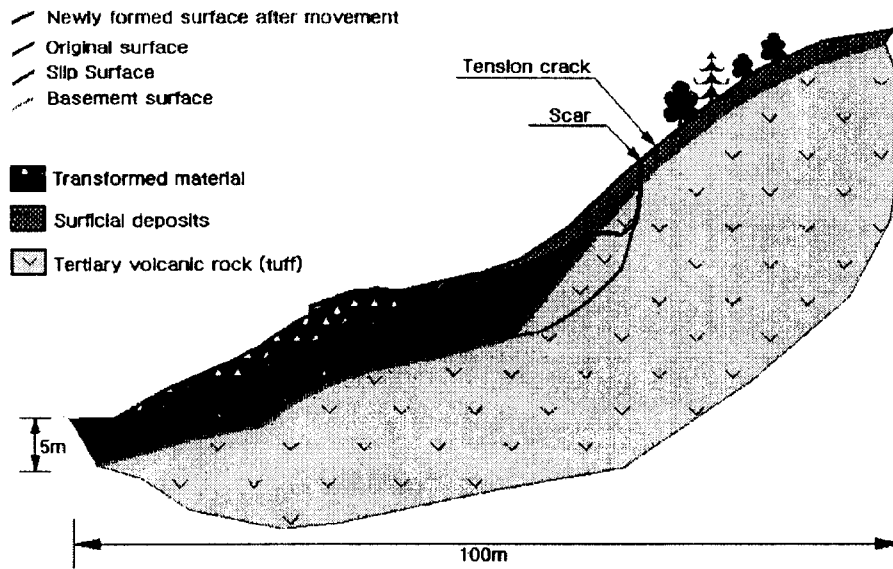


Fig. 15. Schematic cross section of the Kyungju area

5. 토의 및 결론

최근 급격한 기상변화에 의하여 많은 양의 강우가 집중되는 현상이 빈번하며 이로 인한 산사태가 급증하는 추세이다. 특히 1996년을 기점으로 이러한 현상이 뚜렷이 나타나고 있는데 더욱이 사회 간접자본 구축의 일환으로 국도, 지방도, 고속도로 및 고속전철 등의 확충과 건설에 따라 산사태 재해가 더욱 가속화하는 현상을 보이고 있다.

최근에 발생한 산사태의 사례별 현황은 다음과 같다.

- 1) 우리나라에서 가장 흔히 발생하는 산사태는 쇄설성유동(debris flow)이며 그 특성은 다음과 같다.
 - 집중호우 시기인 6월-8월 사이에 대부분 발생한다. 조사 통계에 의하면 2일간의 강우량이 200mm 이상일 때 발생하기 시작한다.
 - 발생빈도는 산사면의 노두의 발달상태와 연관되어 있으며 대부분 노두가 없는 지역에서 발생한다.
 - 초기에는 전이형 슬라이드(translational slide)에 의하여 발생되며 파괴물질이 산사면의 계곡으로 유동되면서 debris flow로 전이된다. 그러므로 대부분의 debris flow는 전이형 슬라이드와 연관되어있다.
 - debris flow의 원인이 되고있는 전이형 슬라이드의 발생인자는 강우와 인위적 조건을 제외하면 암석(crystalline, non-crystalline, stratified), 지형고도, 사면경사, 입도분포, 투수계수, 건조밀도, 공극률 등이다.
 - 발생인자들의 통계처리, 특히 로지스틱 회귀분석에 의하여 인자들의 정량적 가중치를 구할수 있고, 이를 통하여 산사태 발생확율을 정량화 하였다.

- 2) 암반포행(rock mass creep)은 최근의 절토공사와 연관되어 곳곳에서 발생되고 있으며 그 특성은 다음과 같다.
- 대부분 경상계 퇴적암지역에서 발생되며 직접 원인은 거의 사면 하단부의 절토 때문이다
 - 전단전이는 적은 편으로 1m 내외이나 포행암반의 규모가 크기 때문에 매우 위험하다. 칠곡, 부산 황룡산 터널입구, 사천 산사태 등이 이 범주에 속한다.
 - 포행의 원인이 되는 상부 전단대는 대부분 주변에 발달되어있는 단층이나 대규모 전단절리와 연관되어 있어 사면설계 조사시 상당한 주의를 요한다.
- 3) 회전형슬라이드(rotational slide)는 토양층이 두껍거나 기반암이 심히 풍화된 연약층에서 발생하며 흔히 사면 하단부의 절토와 연관되어있으며 특징은 다음과 같다.
- 이 산사태는 원호 또는 반원호형으로 진행되는 특징이 있으며 우리나라에서는 제3기 응회암 지역이 취약하다.
 - 화산재와 화산쇄설 물질이 혼재된 제3기 응회암은 절리가 매우 잘 발달되어있어 팽윤과 흡수율이 높아 심부까지 풍화에 취약하므로 이런 형태의 산사태가 발생할 가능성이 높다.
 - 경주 산사태와 포항-구룡포간 국도변의 산사태가 이 범주에 속한다.

사 사 : 이 연구는 과학기술부 국가중점연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업의 일환으로 수행한 연구결과와 일부로서 이 자리를 빌어 과학기술부의 적극적 후원에 대하여 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, "지형특성에 따른 산사태유형 및 취약성", 대한지질공학회지, 8, 2, 115-130
- 채병곤, 김경수, 김원영, 조용찬, 1998, "용인-안성지역 산사태의 지형 및 토질특성", '98대한지질학회 학술발표회 초록집 5-4, p27
- 김원영, 김경수, 채병곤, 조용찬, 1999, 경기북부지역 산사태의 특징, 대한지질학회 제54차 추계공동학술발표회, 대한지질학회
- 채병곤, 조용찬, 김원영, 김경수, 1999, Characteristics of Rock Sliding at Waegwan, Korea, 대한지질학회 제54차 추계공동학술발표회, 대한지질학회
- 김원영, 김경수, 채병곤, 조용찬, 1999. 11, 우리나라 산사태의 지형 및 지질공학적 특성, 대한지질공학회 '99 응용지질 Workshop 보문집, 45-60
- Brunsdon, D., 1985, Landslide types, mechanisms, recognition, identification. Proceedings of landslides in the South Wales, 18-29
- Canine, N., 1980, The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, Geografiska Annaler, 62A, 23-27
- Dikau, R. et al., 1996, Landslide recognition, John Wiley & Sons, p251
- Dramis, F. and Sorriso-Valvo, M, 1994, Deep seated gravitational slope deformations

- related landslides, and tectonics, *Eng. Geology*, 38, 231-243
- EPOCH(European Community Programme), 1993, Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. 3 Volumes, Contract no. 900025
- Griffiths, J. et al, 1990, Engineering geomorphology, *Bull. of engineering geology*, 42, 39-44
- 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
- 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
- Kim, W.Y., B.K.Chae, 1998, "Landslide characteristics in Korea", *Proceeding of Korea-France Joint Seminar on Geological and Environmental Basic Survey*, Seoul, Korea, 5 pages
- Kim, W.Y, Woo, N.C. and Chae, B.K., 1997, *Geologic Hazards in Korea-Perspective*, ITIT International Symp., Osaka, Japan
- Mahr, T., 1977, Deep-reaching gravitational deformations of high mountain slopes, *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 16, 121-127
- 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
- UNESCO Working Party on Landslide Inventory, 1990, A suggested method for reporting a landslide, *Bull. of IAEG*, no. 41, 5-12
- Varnes, D. J., 1978, Slope movement types and process, *National Academy of Science, Special report*, 2, 11-33