

## 산사태 조사·해석 기법의 개발 및 적용

김경수<sup>1\*</sup> · 송영석<sup>1</sup> · 채병곤<sup>1</sup> · 조용찬<sup>1</sup> · 정교철<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

<sup>2</sup>안동대학교 지구환경과학과

## Development of Investigation and Analysis Technique to Landslides and Its Application

Kyeong-Su Kim<sup>1\*</sup>, Young-Suk Song<sup>1</sup>, Byung-Gon Chae<sup>1</sup>,  
Yong-Chan Cho<sup>1</sup>, and Gyo-Cheol Jeong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

산사태연구는 산사태를 발생시키는 여러 인자들의 상호관계를 규명하는 방법, 확률론적으로 산사태 발생가능성을 예측하는 방법, 사태물질의 이동경로와 확산범위를 산정함으로써 산사태 위험성을 평가하는 방법 등으로 구분할 수 있다. 우리나라에서 발생한 대부분의 산사태는 여름철의 집중호우에 기인되는 것으로 기반암 상부의 토층에서 발생되며, 강우조건, 지형조건과 지질 및 토질특성 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 산사태 조사부터 위험성평가에 이르기까지의 산사태연구는 다양한 산사태를 체계적으로 조사하고 해석함으로써 공학적 관점에서 여러 특징들을 관찰하고 그 특성들을 총괄적으로 해석하여야만 한다. 이 연구에서는 경상남도 마천지역을 대상으로 산사태 현장조사를 수행하였다. 조사결과를 토대로 자연사면 산사태에 대한 최적의 표준모델로 활용할 수 있는 산사태 조사 및 해석 기법을 제안하고자 한다.

**주요어** : 산사태, 위험성, 조사기법, 해석기법

Landslide researches are divided to a method of interrelationship for various factors, method of predicting landslide possibility, and method of estimating landslide risk which are occurring landslides in the natural slope. Most of landslides occurred in natural slope are caused by a heavy rainfall in summer season. Weathered soil layer located in upper side of rock mass was occurred. As well as, they are announced to have an influence to geometry, geology, soil characteristics, and precipitation in the natural slope. In order to investigate and interpret the variety of landslides from field investigation to risk analysis, landslide analysis process due to geotechnical and geological opinions are systematically demanded. In this research, the study area is located in Macheon area, Gyeongsangnam-do and performed the landslide investigation. From the results of landslide investigation and analysis, optimized standard model based on natural landslide is proposed to high technical method of landslide investigation and interpretation.

**Key words** : landslide, risk, investigation method, analysis method

### 서 론

산사태조사는 오랜 기간 동안 산사태와 그 발생지역에 대한 연구에서 매우 중요한 부분으로 알려져 왔다 (Philbrick & Cleaves, 1958; Sowers and Royster, 1978).

산사태를 조사할 경우, 사면붕괴의 원인 및 형태의 확인이 직접적으로 이루어져야만 한다. 또한, 실제 혹은 잠재적 산사태에 대한 예측이 필요하다. 이러한 산사태의 원인규명과 형태분류 및 예측 등은 산사태의 예방이나 복구를 위해 적합한 방안을 수립하는데 매우 중요하기 때문이다.

\*Corresponding author: kks@kigam.re.kr

Rid and Liang(1978)은 산사태를 조사할 때 네 가지의 기본적인 지표에 대한 참고자료가 마련되어야 한다고 제안한 바 있다. 첫째, 적절한 시기에 적합한 조사가 진행되었더라면 대부분의 산사태 혹은 잠재적인 사면활동은 예측이 가능하다는 것이다. 둘째, 산사태를 예방하는데 소요되는 비용은 산사태를 복구하는데 소요되는 비용보다 적다는 것이다. 셋째, 대규모 산사태의 경우에는 구조물의 피해예방을 위해 소비하는 비용보다 매우 많은 복구비용이 소요된다는 것이다. 넷째, 초기의 사면붕괴는 부가적인 불안정조건과 활동에 의해 일어난다는 것이다. 산사태는 지속적으로 변화되는 현상이기 때문에 현장조사만으로 충분히 파악할 수 없다. 또한, Johnson and DeGraff(1988)는 산사태를 조사할 때 조사의 체계화, 자료의 선별, 자료의 분석, 해석기법의 적용 및 결과토의 등 다섯가지 요소가 포함되어야 한다고 제안한 바 있다.

산사태에 대한 조사부터 위험성평가에 이르기까지의 산사태연구에서 다양한 산사태를 체계적으로 조사하고 해석함으로써 산사태를 적절히 평가하는 과정이 필수적으로 요구된다. 이러한 필요성에 의해 그동안 여름철의 집중호우에 의해 발생한 산사태자료들을 종합하여 지질공학적 관점에서 여러 특징들을 관찰하고 그 특성들에 관한 총괄적인 해석이 요구된다. 이에 이 연구에서는 Johnson and DeGraff(1988)가 제안한 다섯가지 요소들을 포함하여 우리나라의 자연사면 산사태에 최적의 표준모델로 활용할 수 있는 산사태 조사 및 해석 기법을 제안하고자 한다. 이 기법은 산사태연구의 궁극적이고 최종적 목표라고 할 수 있는 산사태예측과 위험성평가 및 방지에 이용될 수 있을 것이다.

### 조사 및 해석 기법 개발

이 연구에서는 산사태조사의 체계화, 자료의 선별, 자료의 분석, 해석기법의 적용 및 결과토의에 대한 요소를 적용함으로써 이러한 요소들이 최대한 반영된 새로운 산사태 조사 및 해석 기법을 개발하였다. 자연사면 산사태의 조사 및 해석은 현장조사, 시험분석, 강우특성, 기하특성, 토질특성 및 종합평가와 같은 순서로 진행됨이 바람직하다.

산사태 조사 및 해석의 수행과정은 크게 3단계로 구분된다. 제 1단계(체계적인 현장조사단계), 제 2단계(특성평가 및 해석단계), 제 3단계(기법의 적용)로 구분되는데, 이 중에서 2단계까지가 이 연구에서 개발된 조사 및 해석 기법이다. 3단계는 개발된 기법을 기존의 해석

법과 분석모델들에 적용하여 산사태를 예측하고 위험성을 평가하는 것으로 이들 일련의 과정은 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

제 1단계는 산사태의 체계적인 현장조사단계로서 다양한 산사태 조사방법을 체계적으로 구분하고 선별하여 산사태가 발생된 지역이나 발생할 가능성이 있는 지역에 대해 현장조사를 실시하는 것이다. 먼저, 산사태 발생지역 혹은 발생가능지역을 선정하여 산사태와 관련된 기본적인 자료를 수집한다. 이러한 기본적인 자료조사를 통하여 현장조사지역의 범위를 선정하고 조사일정, 방법 및 내용 등을 설정한다. 이와 같은 일련의 조사계획이 결정되면 체계적인 조사방법을 수립하고 그에 따라 현장조사를 실시한다.

산사태지역의 현장조사는 개략조사, 정밀조사, 전수조사 및 토질조사로 구분되는데, 개략조사에서는 1:50,000 축척의 지형도와 조사시트를 이용하여 광역적인 산사태의 분포와 발생양상을 조사한다. 정밀조사에서는 개략조사의 결과를 근거로 하여 선정된 산사태들을 대상으로 1:5,000 축척의 지형도와 조사시트를 이용하여 산사태의 위치 및 붕괴양상, 노두의 발달상태 및 풍화도, 토층의 분포양상 등 전반적인 사항을 조사한다. 이를 위해서는 전수조사를 필요로 하는데, 전수조사에서는 산사태의 기하형태와 규모, 사태물질의 이동거리 등을 실측한다. 토질조사는 전수조사와 병행해서 수행되며 토층의 분포양상을 파악하기 위한 표토조사와 함께 토질특성 분석을 위한 토층시료를 채취한다. 이러한 일련의 조사과정을 통하여 산사태 발생지역 혹은 발생가능지역에 대한 다양한 자료들을 수집한다.

제 2단계는 산사태의 특성평가 및 해석단계로서 제 1단계에서 수행된 산사태 발생지역 혹은 발생가능지역에 대한 조사자료를 선별하여 특성평가와 해석을 실시하는 것이다. 사전에 조사된 산사태지역의 강우기록과 산사태 이력들을 토대로 강우와 산사태간의 상관관계를 분석한다. 그리고 개략조사, 정밀조사 및 전수조사를 통해 획득한 각종 자료들로부터 산사태의 규모, 경사, 유형, 사태물질의 이동거리 및 확산범위 등의 기하특성을 해석한다. 또한, 현장에서 채취된 토층시료에 대한 각종 토질시험 결과들로부터 산사태지역의 토질특성을 분석하는데, 토질특성은 물리적 성질, 공학적 특성 및 지화학적 특성을 세분하여 토질특성이 산사태에 미치는 영향을 평가하고, 산사태와 토질특성간의 상관성을 검토한다.

마지막으로 제 3단계에서는 개발된 조사 및 해석 기법의 적용단계로서 제2단계까지의 다양한 자료들을 이

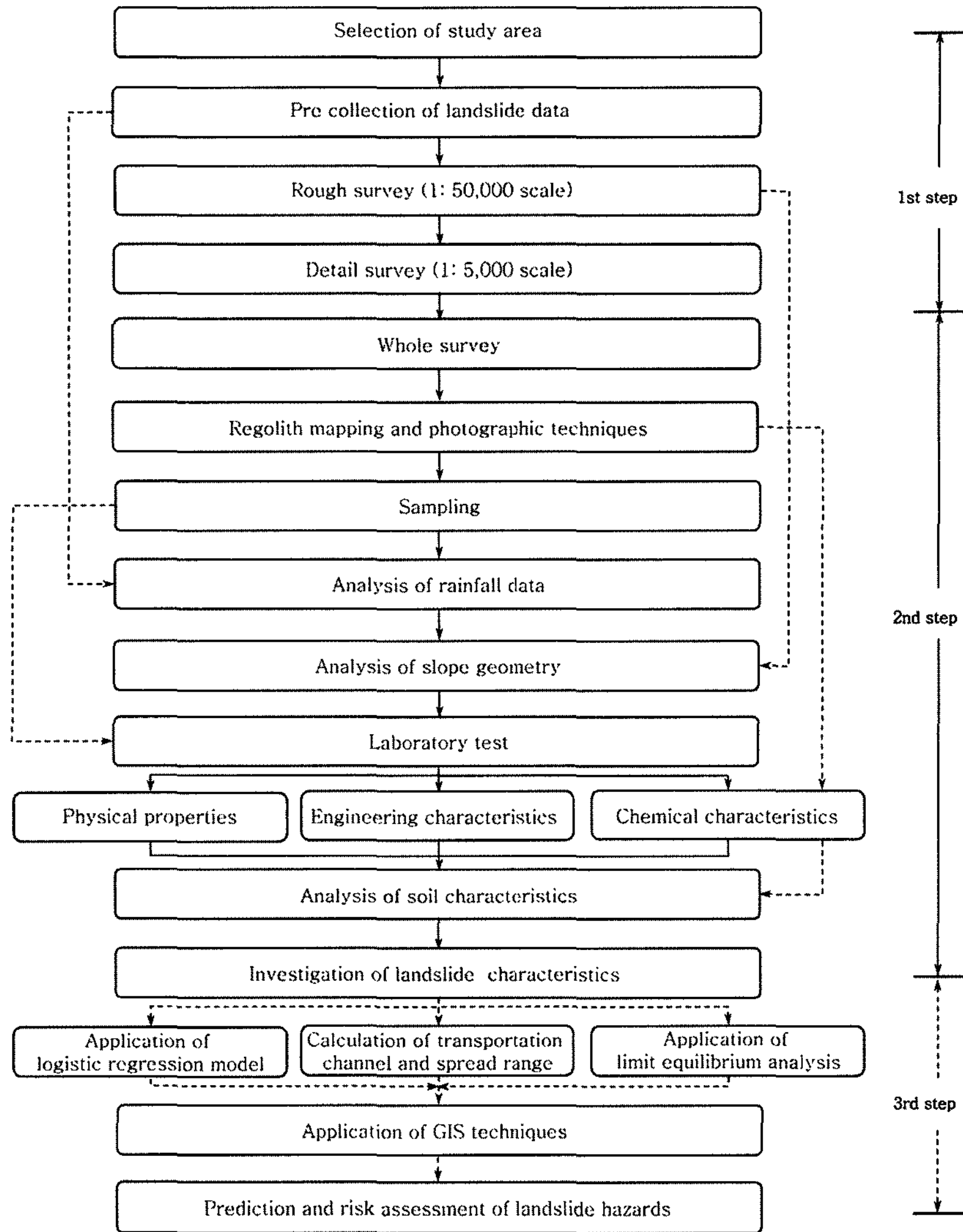


Fig. 1. Flow chart of investigation and analysis techniques of landslides in natural slopes.

용하여 안정성해석과 발생가능성 분석을 실시함으로써 산사태 예측 및 위험성을 평가한다. 안정성해석 및 발생가능성 분석을 위한 기법으로는 기 개발되어 토층사면에서 주로 이용되고 있는 한계평형해석법과 로지스틱회귀모델 등을 이용한다. 한계평형해석법은 토층사면을 대상으로 한 안정성을 평가할 때 가장 많이 이용되고 있는 방법으로서 한계평형해석법 중에서도 이미 검증된 Fellenius법(1936) 및 Bishop의 간편법(1955)이 적용될 수 있다. 로지스틱회귀모델은 김원영 외(2003)에 의해 제안되었는데, 자연사면 산사태의 발생가능성을 예측하기 위한 방법으로서 그 정확도가 매우 높은 것으로 평가되고 있다.

### 조사 및 해석 기법 적용

이 연구에서 개발된 산사태 조사 및 해석 기법을 집중호우로 인해 산사태가 밀집되어 발생되었던 지역에 적용하여 적합성을 검증하였다. 대상지역은 2002년 여름에 700 mm가 넘는 집중호우로 인해 많은 산사태와 함께 큰 피해가 발생되었던 경남 마천지역으로서 소백산맥의 남단인 지리산의 북측에 위치하고 있으며 대체로 험준한 지형을 이루고 있다. 행정구역상으로는 경상남도 함양군 마천면 가흥리와 군자리, 의탄리, 그리고 전북 남원시 산내면 백일리 일부가 해당된다. 연구지역의 면적은 약 15 km<sup>2</sup> 정도에 이르며, 지리좌표상으로는 대략

동경 127°37'55"~127°41'20", 북위 35°23'05"~35°25'01"에 해당된다(Fig. 2).

### 제 1단계: 체계적인 현장조사

#### 개략조사

이 지역에서는 2002년 8월 31일~9월 1일 사이에 태풍 '루사'의 영향으로 지리산의 어름터일대에서 최대일강우량 651 mm 및 누적강우량 702 mm를 기록하는 등 집중호우가 쏟아져 많은 산사태가 발생되었다. 그리고 이들 산사태로 인해 8명이 목숨을 잃었으며, 가옥 12채가 전파되는 피해가 발생되었다. 산사태는 마천면소재지를 중심으로 북부에 위치한 백운산(902.7 m)의 북측사면과 남서부에 위치한 삼정산(1,182.2 m)의 남측사면에서 집중적으로 발생되었다. 또한, 여러 곳의 계곡부에서 사태물질과 수목들이 조사지역 중앙부로부터 동쪽방향으로 흐르는 임천강까지 떠 내려와 도로가 유실되기도 하였다. 이 지역일대의 수계는 주로 남북으로 형성되어 있으며 이들은 조사지역의 중앙부에서 동쪽방향으로 흐르는 임천강에 합류된다.

개략조사에서는 1:50,000 축척의 지형도와 개략조사용 시트를 이용하여 광역적인 산사태 발생특성을 조사하였다. Fig. 2는 1:50,000축척의 지형도에 연구대상지역과 산사태 발생위치를 도시하였다. 조사결과 대상지역에서는 모두 47개 산사태가 발생된 것으로 확인되었으며, 산사태는 전반적으로 사면고도 70% 이상인 높은 고도의 토층사면에서 원호형, 준원호형 내지 전이형 슬라이드로 시작되었다. 그리고 사태물질들이 하부의 평지나 계곡부

로 이동되면서 유동성 산사태로 변화되는 양상을 보였다. 이들 산사태들 중에서 산사태 빈도와 지형조건 등을 고려하여 총 10개 산사태를 정밀조사 대상으로 선정하였다.

#### 정밀조사

정밀조사에서는 1:5,000 축척의 지형도와 정밀조사용 시트를 이용하여 세부적인 산사태의 특징을 조사하였다. Fig. 3은 조사대상 산사태의 일부지역을 보여주는 전경사진과 그 영역에서의 산사태 발생위치, 형상, 규모 및 진행 양상 등을 1:5,000 축척의 지형도에 표시한 것이다. Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 산사태는 좁은 면적에서도 많은 산사태가 발생함으로써 발생빈도가 비교적 높음을 알 수 있다. 또한, Fig. 3(b)는 산사태의 유형을 보여주는 것으로서 분홍색으로 표시된 부분은 시작지점의 원호형, 준원호형 및 전이형 슬라이드이고, 그 하부로 길게 이어지는 파란색부분은 사태물질이 사면이나 계곡을 따라 흘러내리는 유동성산사태의 양상을 나타낸 것이다. 그리고 조사시트에 기재된 산사태자료들을 이용하여 통계적인 방법으로 산사태특성을 해석하였다.

#### 전수조사 및 시료채취

정밀조사와 병행하여 전수조사를 실시하였으며, 산사태의 기하학적 형태 및 규모, 사태물질의 이동거리 및 퇴적양상 등을 조사하였다. Fig. 4는 전수조사를 실시하고 있는 모습을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 산사태의 규모를 파악하기 위하여 길이방향으로 테이프를 길게 늘인 후 기하양상이 변화하는 지점들 즉, 길이방향과 횡단

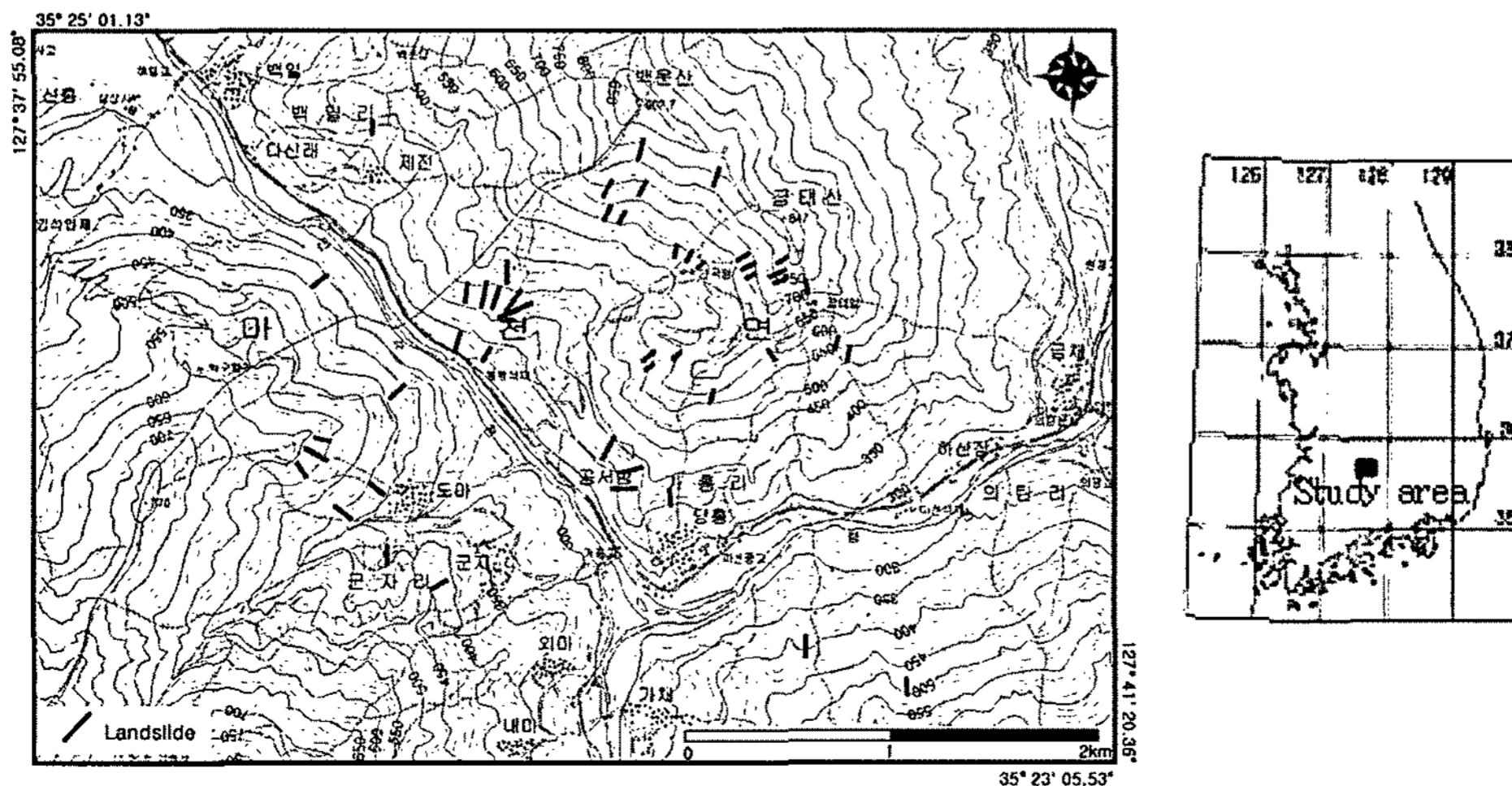


Fig. 2. Landslide distribution map with the 1:50,000 scale in the Macheon area.



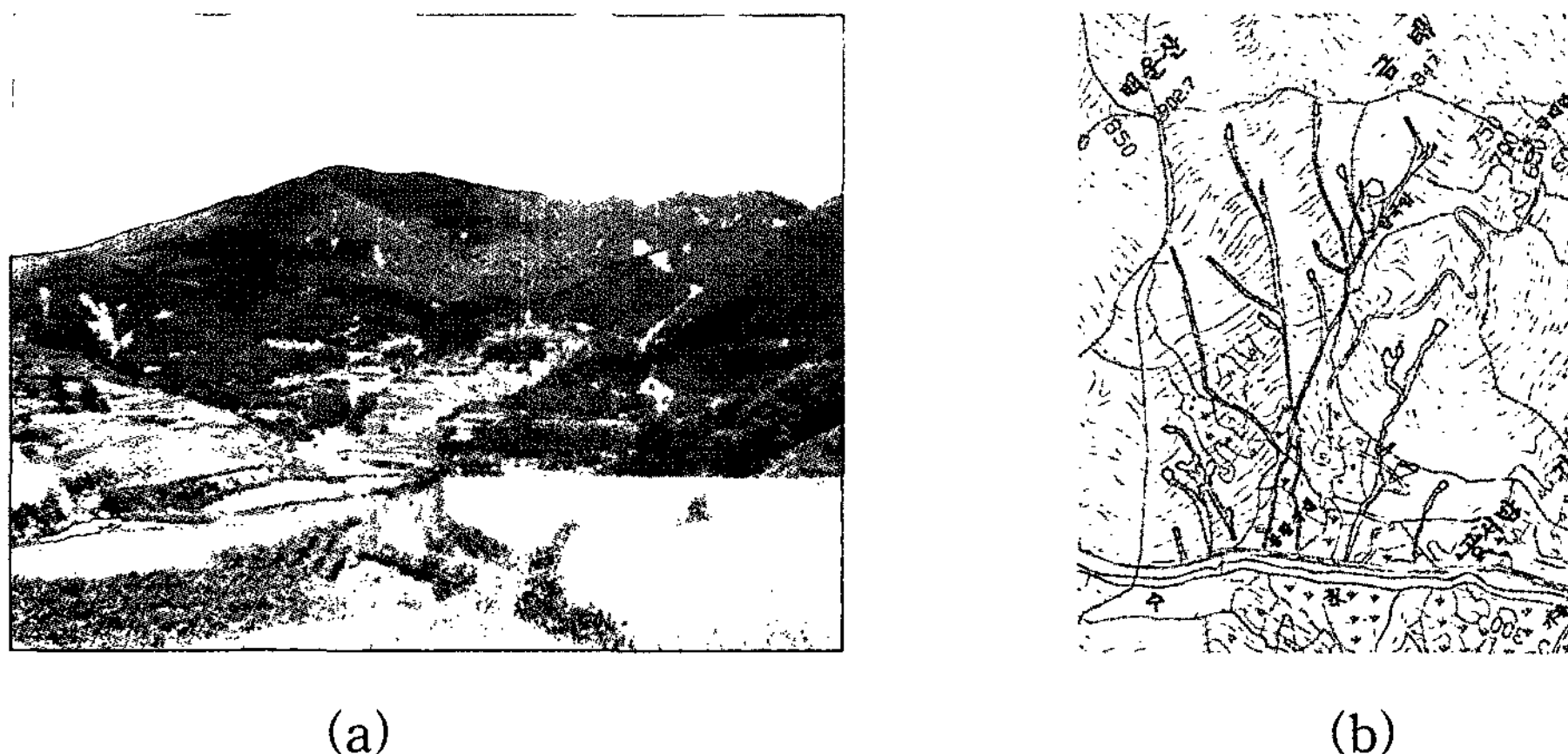


Fig. 3. Panoramic topograph of landslide sites and landslide distribution map with the 1 : 5,000 scale: (a), panoramic topograph; (b), landslide distribution map (pink part, translational slip; blue part, debris flow).

방향으로 나누어 원지반이 침식되어 깎여나간 깊이를 측정하는 모습이며, Fig. 4(b)는 하부지점으로 이동되어 쌓인 사태물질의 퇴적양상을 관찰하는 모습이다. 이와 같이 산사태규모, 사태물질의 측정 및 관찰결과를 통해 산사태의 전반적인 기하특성과 함께 퇴적양상을 정확하게 파악하였다.

산사태지역의 토질특성을 평가하기 위해 시험목적에 부합된 위치들에서 실내시험용 토층시료를 채취하였다. 토층시료는 표토를 제거한 후 40~60 cm 정도의 깊이에서 불교란 및 교란시료로 구분하여 채취하였다(Fig. 5). 불교란시료는 스테인레스로 제작된 원통형샘플러를 사용하였다. 교란시료는 비닐팩을 이용하여 채취하였으며, 모든 시료는 현장조건이 최대한 유지되도록 밀봉상태로 운반하여 실내실험을 수행하였다.

**제 2단계: 특성분석 및 평가**  
**강우특성**

산사태지역을 중심으로 지리산에 연접한 함양군, 산청군 및 남원시청으로부터 산사태 발생시기인 1998년 8월 31일을 전후로 10일간의 강우자료를 수집분석하였다. 총 37개 관측소에서 수집된 강우기록에 의하면, 태풍 “루사”의 영향으로 8월 30일부터 9월 1일까지 3일간에 최대누적강우량이 702 mm에 달하는 집중호우가 있었다.

Fig. 6은 산사태지역을 중심으로 약 30 km 이내의 거리에 위치한 37개 관측소에서의 강우기록을 정리하여 누적강우량으로 구분한 등강우도에 산사태지역을 표시한 것이다. 누적강우량이 가장 많았던 마천지역에서 산사태가 집중적으로 발생되었음을 볼 때, 집중호우가 산사태를 지배하는 주요 외적 요인임을 쉽게 알 수 있다.

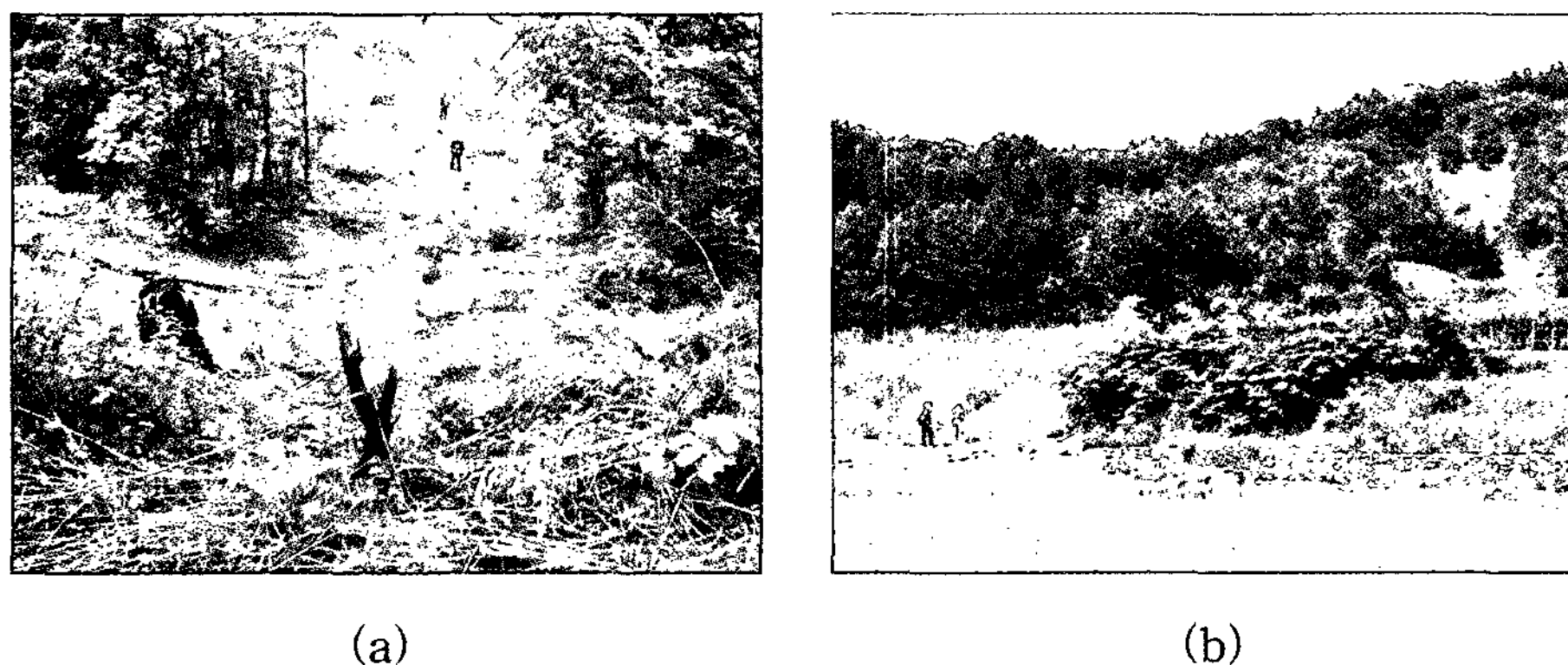
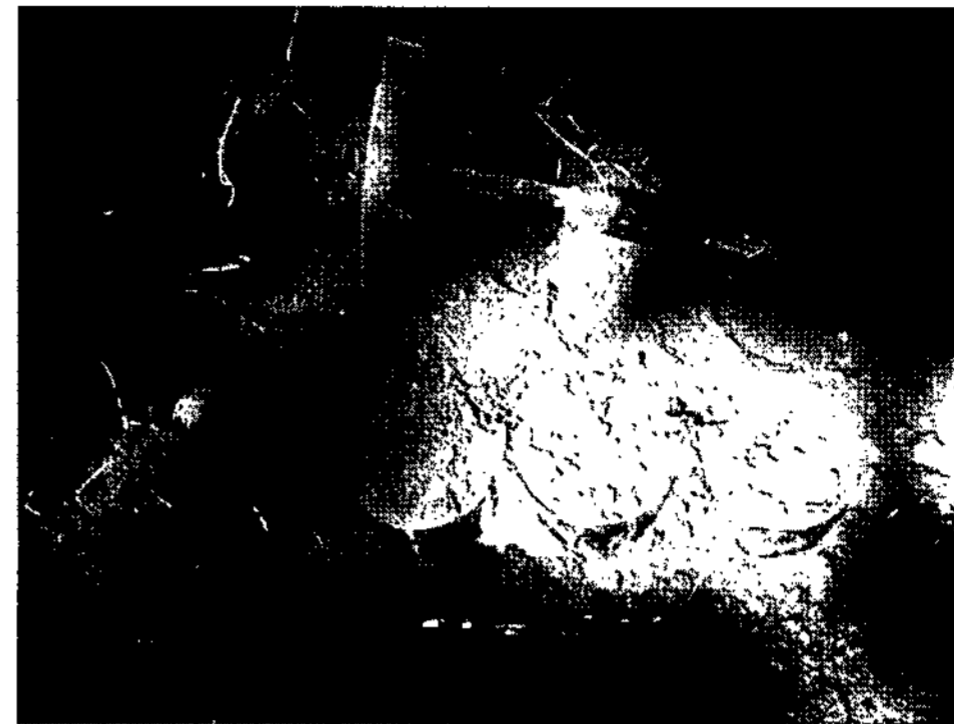


Fig. 4. Surveying geometry using tape in landslide site: (a), measuring breakdown point; (b), observing of landslide material.



(a)



(b)

Fig. 5. Undisturbed soil sampling for laboratory test in landslide site: (a), cylindrical mold; (b), sampler into soil layer.

강우는 이틀째에 집중되었으며, 특히 산사태지역 주변에는 강한 폭우가 쏟아져 일강우량이 무려 651 mm에 달하였고, 이틀간의 누적강우량이 701 mm를 기록한 곳도 있었다. 그러나 강우의 분포양상은 첫날과 비슷하여 산사태지역에만 집중되었을 뿐 비교적 근거리인 10 km 정도를 벗어난 지역에는 누적강우량이 400 mm 미만이었으며, 15 km 이상의 먼 거리에는 200 mm 정도에 불과하였다.

Fig. 7은 산사태지역에 인접한 6개 관측소에서의 강우 자료를 시간강우량과 누적강우량으로 표현한 것으로 막대그래프는 6개 관측소의 시간강우량을 평균하여 하나로 표시하였고, 누가실선은 각각의 누적강우량을 나타낸 것이다. 강우기간은 3일간이었으나 거의 모든 비의 양은 이틀째인 8월 31일 하루에 집중되었으며, 특히 시간강우량 40 mm 이상의 큰 강우강도는 오후 1시부터 오후 7시까지로서 그 지속시간 또한 6시간에 달하였음을 알 수 있다.

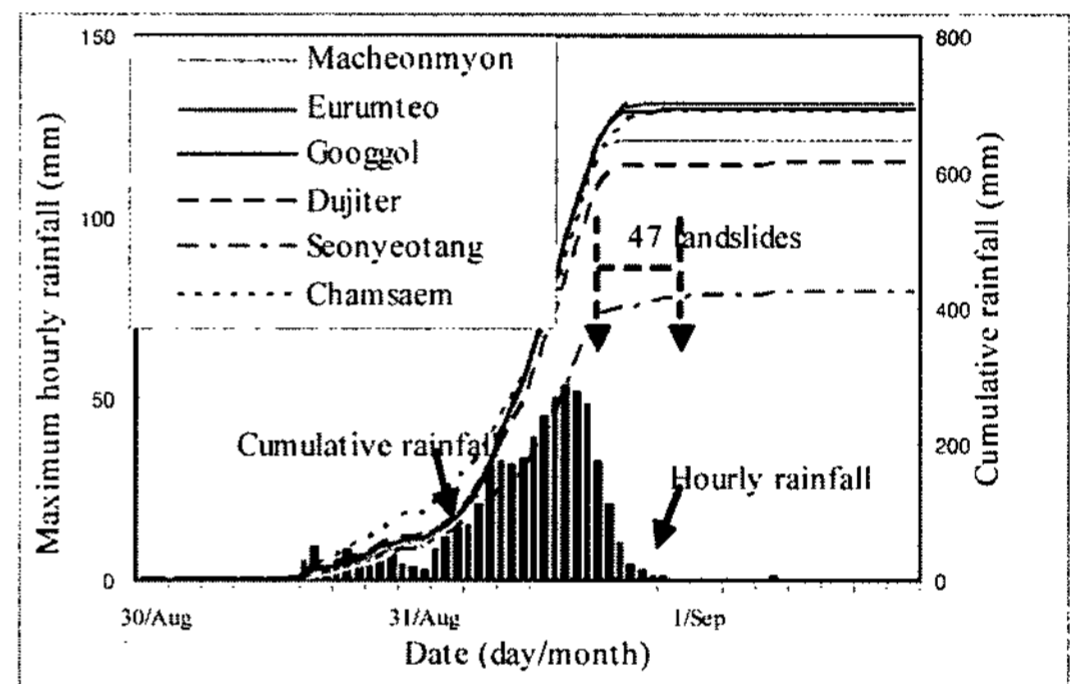
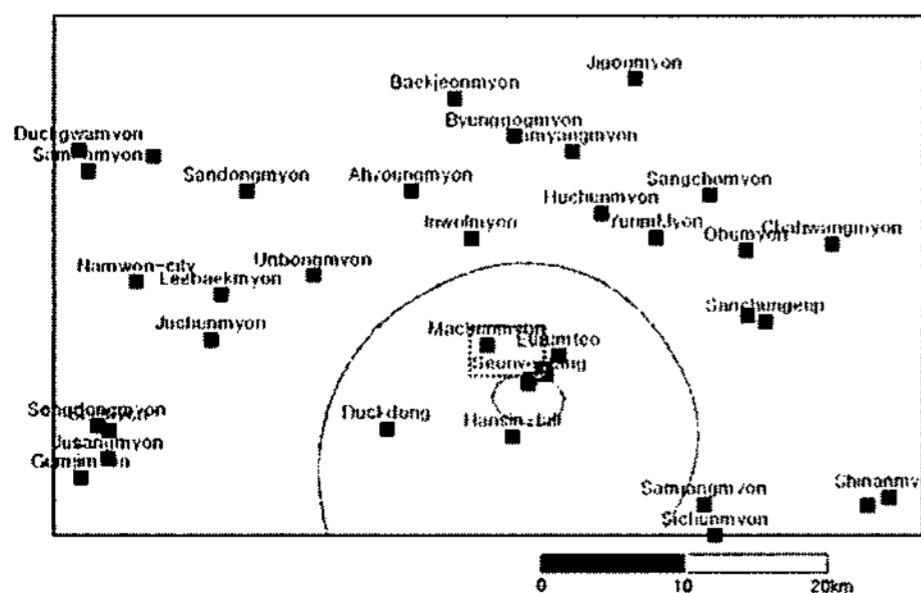
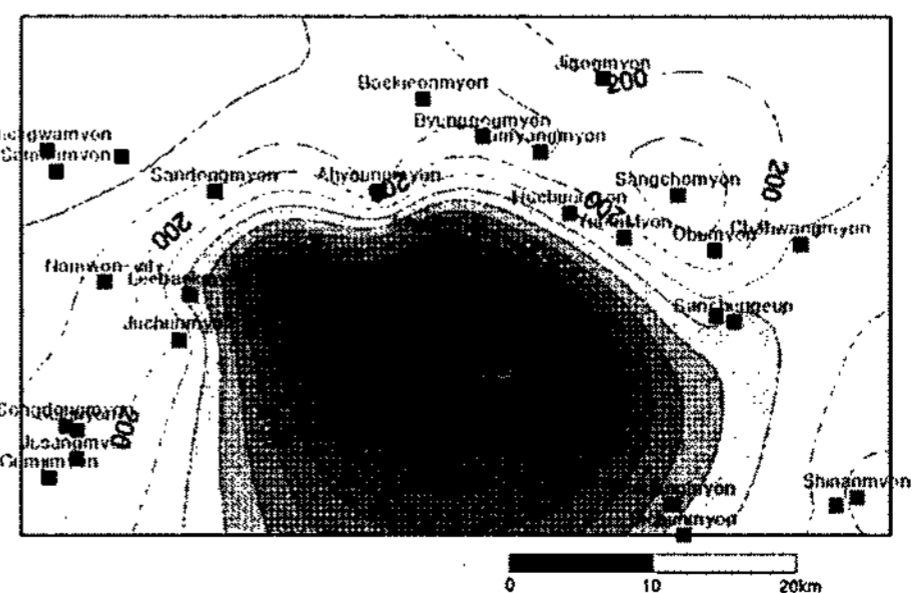


Fig. 7. Hourly cumulative rainfall distributions during 3 days at the 6 rain gauge stations in the Macheon area.

이와 같은 결과를 종합해 볼 때, 집중호우시에 마천지역과 같은 지질이나 지형조건에서 이틀간의 누적강우량이 약 400 mm에 달하거나 시간강우량이 40 mm 이상



(a)



(b)

Fig. 6. Contour diagram according to relationship between landslide frequency and localized torrential rainfall in the Macheon area: (a), for one day; (b) for two days; , Landslide sites.

인 강우강도가 3시간이상 지속될 경우가 대규모 산사태를 일으킬 수 있는 충분조건일 것으로 판단된다. 따라서 마천지역과 같은 곳에서 집중호우가 발생할 경우에 이와 같은 강우조건이 산사태예측이나 예보, 또는 경보를 위한 기준으로 적용될 수 있다.

**기하특성**

마천지역 산사태의 기하특성 분석은 1단계에서의 조사방법에 따라 총 10개 산사태에 대한 기하양상을 측정하여 분석하였다. Fig. 8은 조사결과에 의한 산사태규모를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 사태물질의 확산거리를 포함한 산사태의 총길이는 168~483 m 범위로서 비교적 길이가 길게 나타남을 알 수 있는데, 그 원인은 산사태지역의 사면고도가 약 400 m부터 800 m까지로 높은 산체를 이루고 있기 때문이라 할 수 있다. 이들 산사태는 해발고도를 기준으로 하였을 때 440~620 m 범위에서 시작되었는데, 이는 사면고도를 기준하였을 때 대부분 70% 이상의 높은 지점들에 해당된다. 이처럼 높은 곳에서 산사태가 시작되었고 사태물질들이 사면길이가 긴 지형을 따라 평지에까지 흘러내렸기 때문에 산사태의 길이가 긴 양상을 보였다. Fig. 8(b)는 산사태의 폭이 변화하는 양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태의 폭은 개개 산사태별로 측정위치마다 다양한 분포양상을 보였는데, 최소 2 m 부터 최대 65 m에 이르며 단일 산사태 내에서도 폭의 변화가 심함을 알 수 있다. 산사태의 사면경사도 각 지점마다 다양하게 변화하지만, 가장 급한 사면경사는 36° 정도이고 대부분은 30° 미만의 분포를 보였다. 경사변화도는 산사태의 전체길이에 대한 평균경사를 말하는 것으로 경사가 변화될 때마다 사면경사에 대한 사면길이

의 비를 각각 구하여 전체로 평균한 값이다. 이는 사면경사, 일정한 경사를 가지는 구간의 사면길이, 그리고 산사태길이 등의 상호관계에 의해 결정된다.

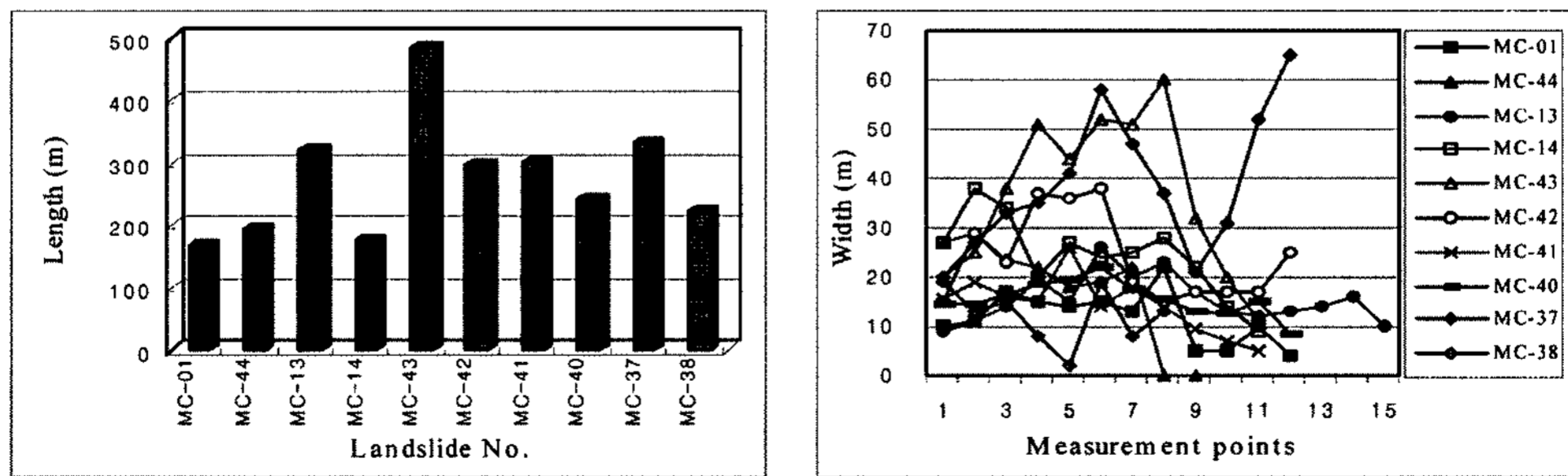
Fig. 9는 산사태의 사면경사와 폭의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 이들 관계는 완만한 경사구간이 급한 경사구간에 비해 폭이 반드시 넓게 나타나지만은 않음을 알 수 있다. 이는 여러 가지 원인들이 있겠지만, 그 중에서도 단일 산사태에서 폭에 크게 영향을 미치는 요소로 지형특성과 함께 토층의 구성물질 등을 들 수 있다.

산사태지역의 사태물질은 다양한 크기의 입자로 구성되어 있는데, 그 크기가 수십cm부터 1 m 이상에 이르는 다수의 핵석들이 존재하고 있음이 특징적이다. 이와 같은 사태물질의 이동은 비교적 등립질로 구성된 사태물질의 경우보다 불규칙적으로 이동되므로(諏訪와 西, 1990) 사면경사와 폭의 관계가 선형적이지 않는 것으로 생각된다. 그러나 경사변화를 구간별로 구분해서 살펴보면, Fig. 9(b)에서와 같이 34°에서 15°로 경사가 급격히 완만해지는 구간에서는 산사태의 폭이 크게 증가함을 알 수 있다.

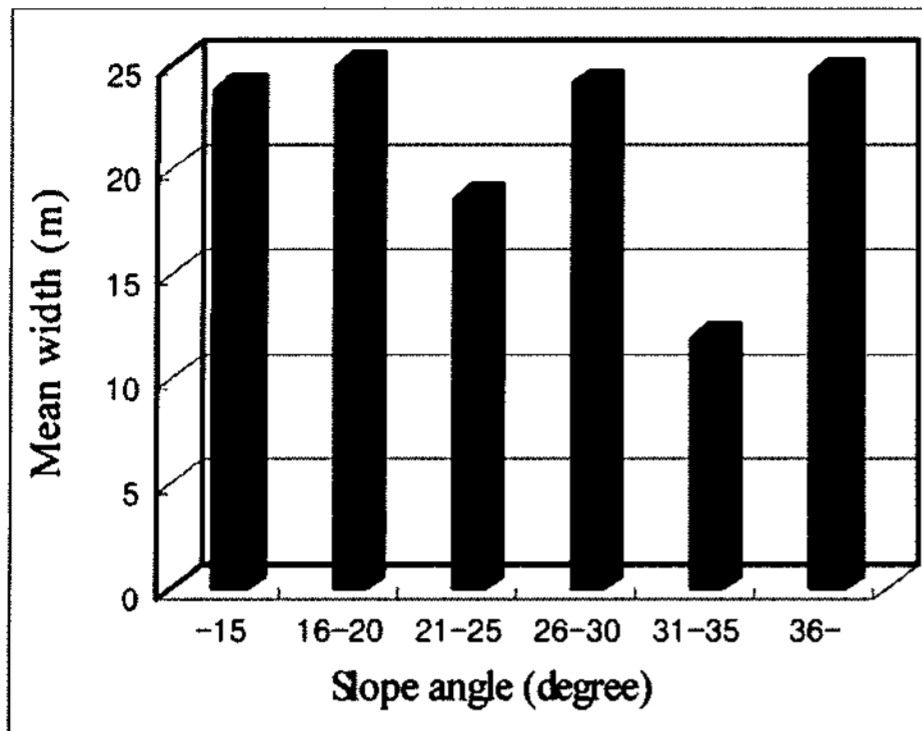
**토질특성**

조사대상인 10개 산사태에 대한 토층의 물리적 성질과 공학적 및 지화학적 특성을 분석하기 위하여 총 40 개소(원지반토 24개소 및 퇴적토 16개소)에서 토층시료를 채취하였다. 시료는 산사태지역의 지질과 지형조건 및 토층분포 등을 반영하고 가급적 단위면적당의 밀도 비율을 고려함으로써 토질특성을 균등하게 평가하였다.

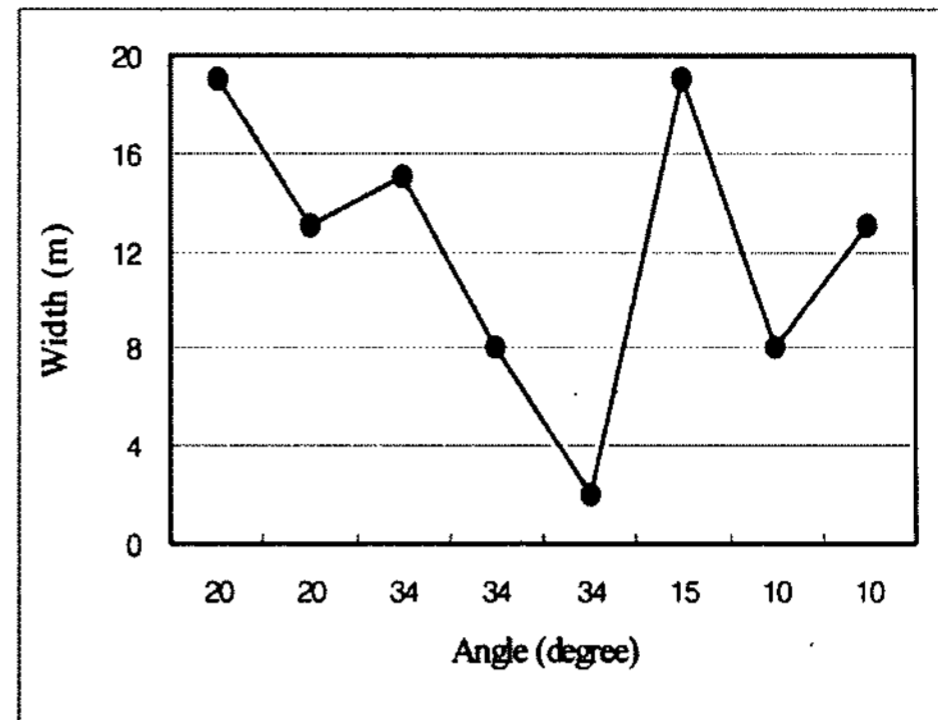
마천지역 산사태들의 원지반토에 대한 시험결과로부터 토질특성들을 살펴보면, 비중은 2.63~2.86의 범위가



**Fig. 8.** Pattern of landslides in the Macheon area: (a), distributions of landslide length; (b), variation of their widths on each measurement point.



(a)



(b)

Fig. 9. Relation between slope angle and width of landslide in the Macheon area: (a), mean width and slope angle; (b), distributions of width on each measurement point on landslide.

고 평균은 2.73으로서 모암인 반려암의 비중과 거의 유사하였으며, 일반적인 토층의 비중에 비해서는 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 모암에 함유된 광물성분에 기인되는 것으로 볼 수 있다. 간극비는 0.83~1.97의 범위로서 평균은 1.35이다. 또한, 건조밀도는 0.94~1.48 g/cm<sup>3</sup>의 범위이고 평균은 1.18 g/cm<sup>3</sup>이다. 액성한계의 경우 일부 퇴적토는 비소성(non plastic)을 보여 주로 모래질로 구성되어 있음을 알 수 있다.

원지반토의 대부분은 모래 이상의 입자크기가 90% 이상을 차지한 반면, 하부의 퇴적토에선 자갈크기 이상인 굵은 암편이나 큰 암석덩어리들의 함유비율이 50% 이상을 차지함으로써 매우 조립질의 분포특성을 보였다. 원지반토는 세립의 함유비율이 평균 8% 내외이나 퇴적토는 퇴적이 시작된 상부에서는 거력들이 많이 섞여 있는 반면, 하부로 내려갈수록 점점 작은 입경들의 함유율이 상대적으로 높아짐으로써 유수에 의한 전형적 퇴적양상이 관찰되었다. 대부분의 원지반토는 입도분포가 양호한 편이고 퇴적토는 자갈과 큰 암편 및 암석덩어리들이 많이 함유되어 있기 때문에 입도분포가 불량하거나 불균형한 입도조건을 가지는 것으로 나타났다. 통일분류법에 의한 흙의 분류에 의하면, 원지반토는 SW, SW-SC가 주를 이루는 반면, 퇴적토는 대부분 GP로 분류되었는데, 이는 앞서서도 언급한 바와 같이 거력들이 포함된 사태 물질들이 유수와 함께 떠내려가 퇴적되는 과정에서 비슷한 크기의 입경들이 같은 위치에 퇴적되었기 때문인 것으로 해석되었다.

원지반토를 대상으로 한 투수시험 결과에 의하면, 투수계수가  $7.16 \times 10^{-4} \sim 2.43 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 의 범위로서 투수

계수가 대체로 작거나 아주 큰 편이 분포되어 있기도 하나, 평균 투수계수는  $3.33 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로서 대체로 투수성이 양호한 토층지반으로 평가되었다. 또한, 전단시험 결과에서 전단저항각은 34~39°, 점착력은 0.025~0.046 kg/cm<sup>2</sup>의 범위로서 평균치는 각각 36° 및 0.037 kg/cm<sup>2</sup> 정도인 것으로 나타났는데, 이는 Holtz and Gibbs(1956)에 의하면 대체로 다짐도가 매우 느슨(very loose)~중간정도(medium dense)의 사질지반에 해당된다.

Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 비중은 원지반토와 퇴적토가 거의 차이점이 없는데, 이는 개개 사면별로도 거의 유사한 경향성을 보였다. Fig. 10(b)는 소성도를 표현한 것으로 원지반토와 퇴적토가 뚜렷이 구별됨을 알 수 있다. 즉, 원지반토는 액성한계가 35% 이상이고 소성지수는 10% 이상인 반면, 퇴적토는 액성한계가 40% 미만이고 소성지수는 17% 미만으로 구분되었다. 따라서 원지반토가 퇴적토에 비해 더 높은 소성도를 지니고 있으며, 그 범위 또한 비교적 저소성도에서 다소 고소성도까지 고르게 분포하였다.

Fig. 11은 입도시험 결과에 의해 도시된 입도분포도이다. 실내시험만으로 작성된 입도분포도(Fig. 11(a))에 비해 조합형으로 나타낸 입도분포도(Fig. 11(b))가 훨씬 조립의 영역으로 구분되어짐을 알 수 있다. 또한, 전반적으로 원지반토가 퇴적토에 비해 더 세립질의 경향성을 보이며 양호한 입도조건을 가지는 것으로 평가되었다. 일부 퇴적토는 자갈과 거력들의 영향으로 인해 불량한 입도이거나 불균형한 입도특성을 보였다. 또한, 원지반토는 세립으로 구분되는 입경 0.075 mm 미만의 실트나



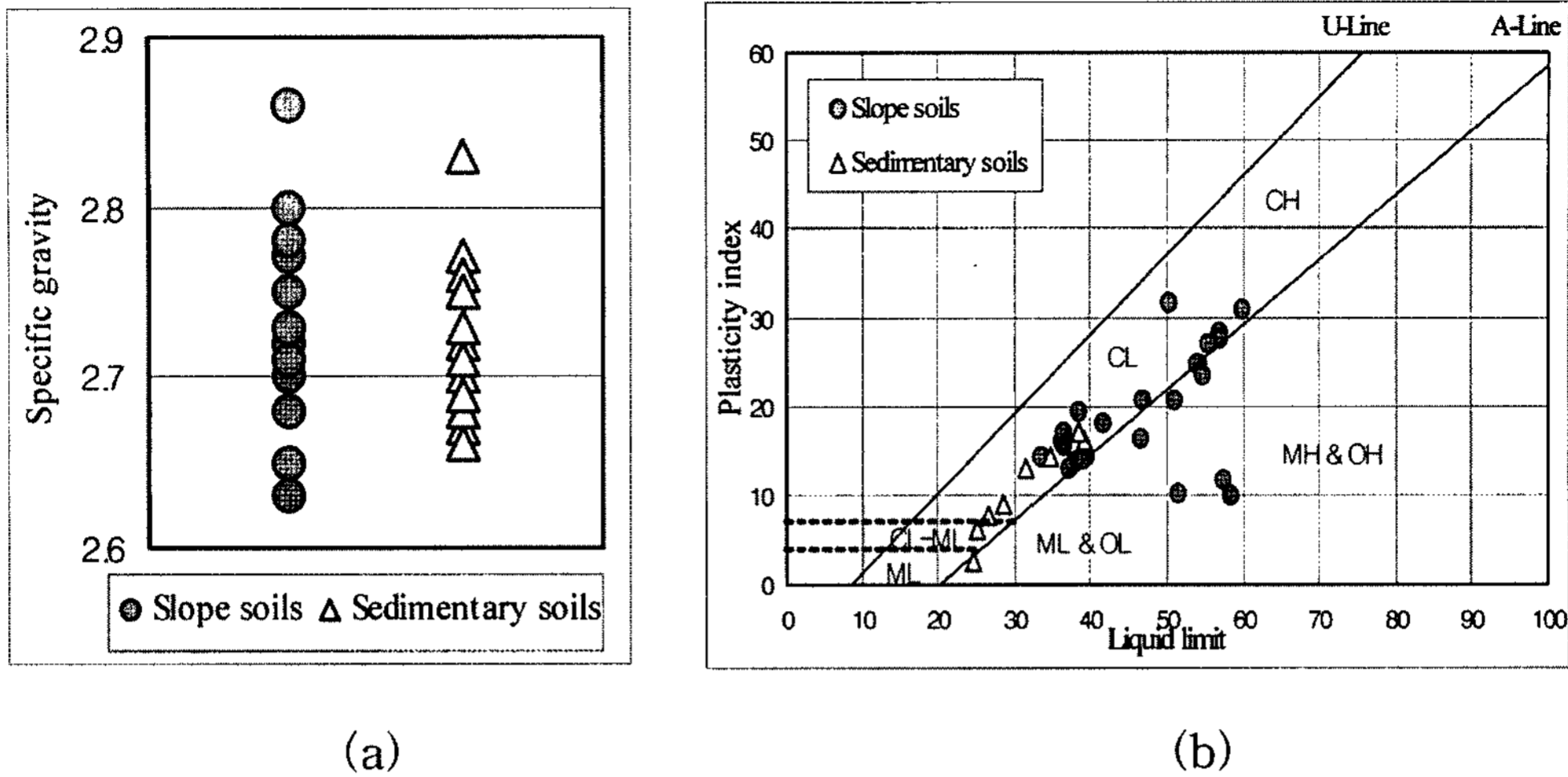


Fig. 10. Specific gravity according to soil conditions and relationship between plastic index and liquid limit: (a), specific gravity; (b), liquid limit and plastic index.

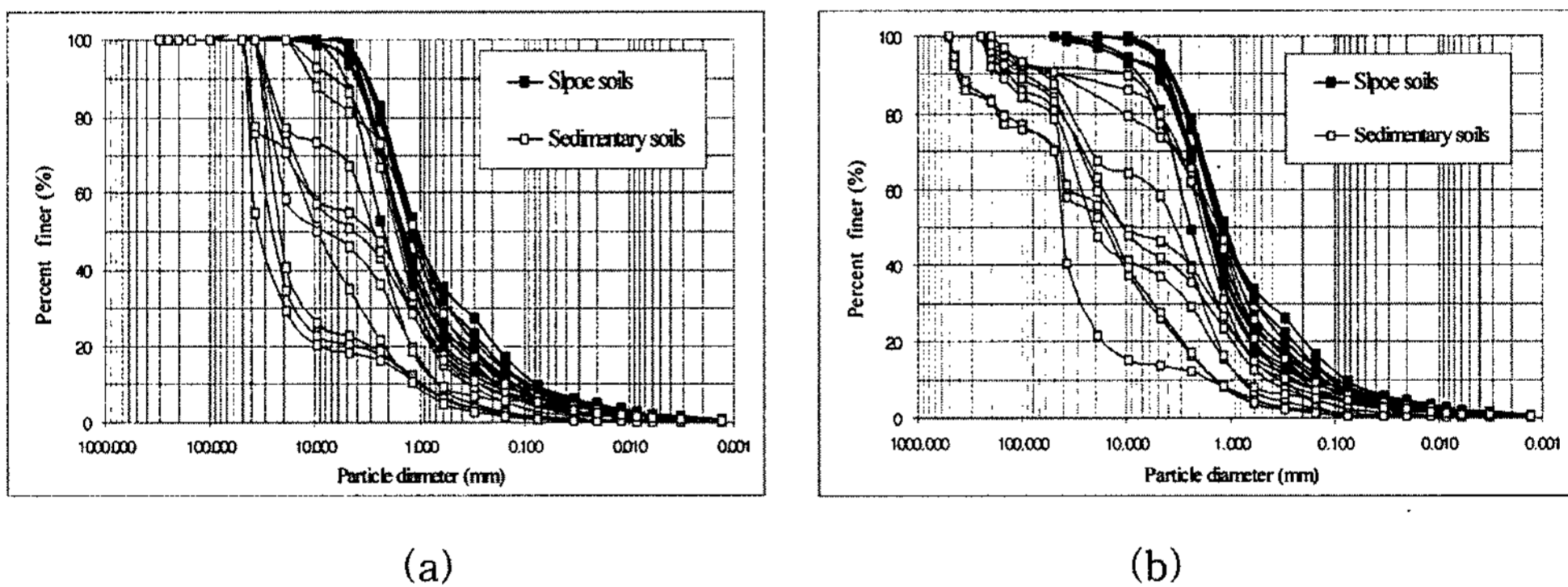


Fig. 11. Grain size distribution curves of slope soils and sedimentary soils collected from landslide sites in Macheon area: (a), before application of photographic techniques; (b), after application of photographic techniques.

점토의 함유비율이 평균 6.81% 정도이고 퇴적토는 평균 3.58% 정도인 것으로 나타났는데, 이는 세립이나 미립자들이 유수에 섞여서 멀리까지 떠내려갔음을 반증하는 결과이다.

Fig. 12는 토층시료에 대한 입도분석 결과 조립질 중에서도 자갈크기 이상인 조립자의 함유비율과 실트크기 이하인 세립토의 함유비율로 구분한 입도분포의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 원지반토와 퇴적토로 나누어 비교가 가능한 8개 토층시료의 조립자 함유비율을 도시한 것으로, 원지반토는 위치별로 입도변화가 거의 없어 수평적 입도분포를 보인 반면, 퇴적토의 경우 상부에는 암편이나 돌덩어리와 같은 큰 입자들이 주를 이루고 하부에 이를 수록 점점 작은 크기의 입자들이 쌓임

으로써 위치별 입도분포가 급한 경사도를 보여주고 있다. 그리고 원지반토는 조립자의 함유비율이 매우 낮은 반면, 퇴적토는 10~80% 범위로서 조립자의 함유비율이 상대적으로 매우 높게 나타났다. 이는 산사태지역의 토질특성 외에도 산사태의 유형과도 밀접하게 연관됨을 지시하는 결과이다. 사면경사가 급하고 산사태의 바로 하부지역 또한 경사가 심한 편이며, 계곡이나 하천들이 바로 인접한 지형조건을 갖추고 있기 때문에 사태물질들 중 세립토들은 잘 퇴적되지 않았을 것이다. 따라서 토질특성과 함께 지형특성이 원지반토에 비해 퇴적토의 조립자 함유비율을 상대적으로 더 높게 하는 요인으로 작용되었던 것으로 해석된다. 특히, 강우로 인해 산사태가 발생될 때 마천지역과 같이 자연사면의 토층이 두껍게

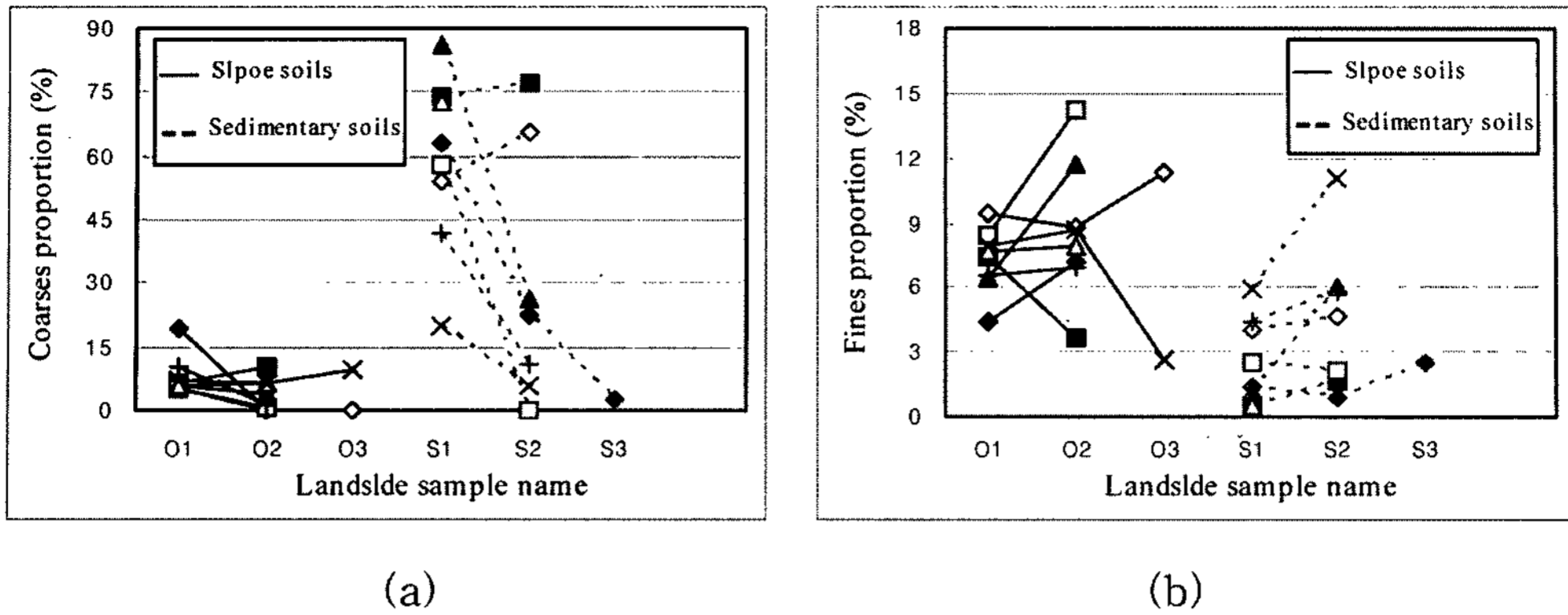


Fig. 12. Grain size characteristics according to soil condition: (a), distributions ratio of very coarse grain; (b), distributions ratio of fine grain.

발달되어 있고 경사가 급한 사면일 경우에는 많은 양의 사태물질이 생성된다. 그리고 이동속도 또한 매우 빠르게 되어 하부에 위치한 마을이나 농경지들에 많은 피해가 초래될 수 있다.

주사전자현미경(SEM) 하에서 토층에 잔류된 광물 중에서 Si 다음으로 Al이 풍부하게 함유되어 있으며 표면에서 많은 에칭을 보이는 점이 특징적이다(Fig. 13). 이들은 결정의 C-결정축에 평행한 방향으로 잘 발달되어 있으며 용해동공들도 많이 관찰된다. 일반적으로 토층에서 배수(drainage)가 취약할수록 각섬석의 에칭속도는 줄어드는 것으로 알려져 있는데(Brantley et al., 1993), 이와 같은 에칭속도의 감소는 배수가 불량한 토층 내부의 간극수에서처럼 용질의 농도가 증가하기 때문이다. 그러나 배수가 양호한 토층에 산소가 존재하면 각섬석의 용해속도가 증가한다. 즉, 간극율이 높고 함수율이 높은 토층에서는 더 빠르게 용해될 수 있다. 또한, 입자들 간의 경계부에서는 간극이 잘 발달되어 있으며, 길쭉하게 잔존하는 석영의 주변부에는 간극이 비교적 큰 반면에 점토광물들이 서로 치밀하게 붙어있어 간극발달이 비교적 불량한 편이다.

마천지역과 같은 고지대에서는 계절적으로 심한 기온의 차이에 의하여 물리적 풍화작용이 가속화되기가 쉽다. Locke(1995)에 따르면, 특히 평균적인 에칭의 심도는 오래된 토층일수록 깊게 나타나며, 에칭속도는 평균 강우량이 낮은 조립질 화강암에서 가장 느린 반면, 강우량이 많고 모암이 세립질일 수록 훨씬 빠르다. 산악지형에 기인한 높은 강우량 때문에 염기성 반려암에서 풍부한 각섬석과 휘석류 광물들은 쉽게 풍화되어 용해작용이 진행됨으로써 표면에 에칭이 잘 발달될 뿐만 아니라

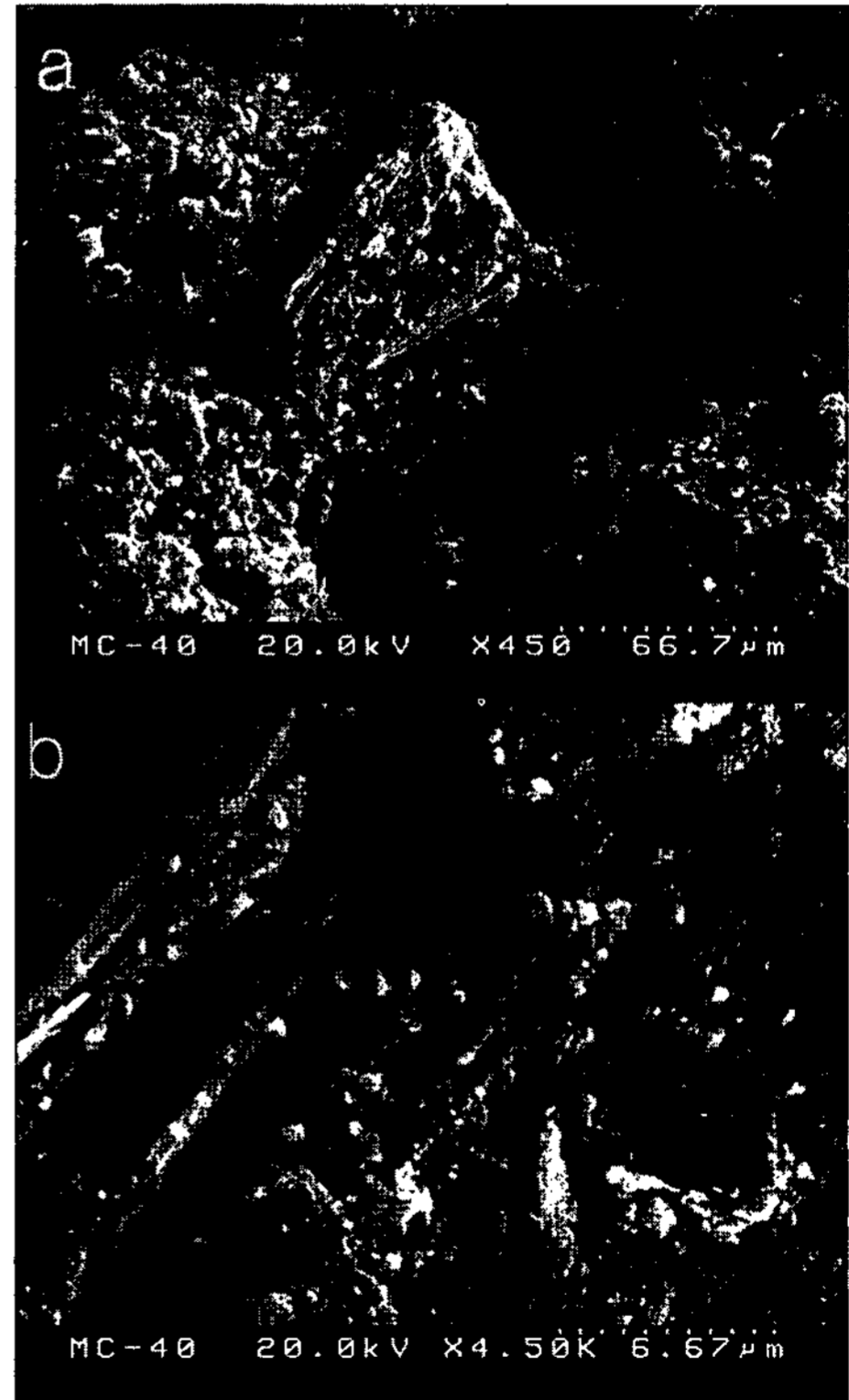


Fig. 13. SEM photomicrographs of soil collected from soil sample of landslide in Macheon area: (a), Hornblende showing crystallographically controlled etch pits along prismatic planes; (b), Enlarged image of (a) showing boxwork structure with skeletal frame and dissolved surface.

표면적이 증가되어 함수비가 커지게 될 것이다.

풍화작용이 더 진행된다면 이들은 버미클라이트, 할로사이트와 같은 함수성 광물을 형성시키며, 기존의 함

철광물은 변질되어 점차 점토광물의 함량이 증가하게 된다. 마천지역의 토층에서는 XRD나 SEM, EDS 분석에서도 휘석의 존재가 인지되지 않았는데, 이들은 풍화에 대한 저항도가 매우 낮아서 이미 다른 이차 점토광물로 변질되었다고 볼 수 있다. 따라서 마천지역은 풍화토로부터 발달되어 기저부에 집적되어 있는 많은 점토광물들 때문에 그렇지 않은 지질조건들에 비해서 집중호우 시 산사태가 상대적으로 더 쉽게 발생할 가능성이 있다.

### 제 3단계: 기법의 적용

제 3단계는 기법의 적용단계로서 이 연구를 통해서 개발된 산사태 조사 및 해석 기법을 산사태예측이나 위험성평가에 적용할 수 있도록 적합한 과정과 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 대상지역의 자연사면에 대한 안정성해석과 산사태 발생가능성을 분석하여야 하는데, 그에 적합한 방법으로는 기존의 기술자나 연구자들에 의해 토층사면에서 주로 이용되어지고 있는 한계평형해석법과 로지스틱회귀모델 등이 이용될 수 있다. 산사태가 발생할 가능성이 있는 지역에 대해서는 산사태로 인한 피해가능성의 분석과 사태물질의 이동특성을 평가할 수 있어야 하는데, 그에 적합한 방법으로는 인공지능기법이 이용 가능하다.

한편, 이러한 방법들에 의해 개개 사면별 사면안정성 해석과 광역적 산사태 발생가능성의 분석, 그리고 산사태 발생가능지역에 대한 사태물질의 이동특성 등을 평가한 후 이들 모든 결과들의 총합으로 산사태를 진단함으로써 비로소 합리적인 산사태 예측 및 위험성평가가 가능할 것이다. 이러한 산사태 분석 및 예측, 위험성평가에 이르는 일련의 과정들에는 필요에 따라서 최근 다양한 분야에서 응용되어지고 있는 GIS기법이 적절히 이용될 수 있다.

## 토 의

마천지역에서는 2002년 8월말 태풍 ‘루사’의 영향으로 일강우량 700 mm가 넘는 집중호우와 그로 인해 많은 산사태가 발생하여 인명과 재산피해가 초래되었다. 산사태는 대체로 사면고도가 높은 위치에서 원호형, 준원호형, 또는 전이형슬라이드로 시작되었으나 하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다. 또한, 산사태지역은 토층심도가 깊고 거력들이 많이 발달하고 있을 뿐만 아니라 암반과의 경계면이 불규칙적으로 발달되어 있기 때문에 규모가 크고 사태물질의 양 또한

많아 하부지역에 큰 피해가 초래되었다.

높은 고도에는 선캠브리아기 편마암이 발달하고 있으며 그 이하에는 염기성 반려암이 주로 발달하고 있는데, 편마암지역보다는 반려암이 분포되어 있는 지역에서 산사태가 집중적으로 발생되었을 뿐만 아니라 과거에 발생되었던 산사태의 흔적 또한 반려암지역에서 주로 관찰된다. 이와 같은 현상은 무엇보다도 이 지역에 분포하는 반려암이 주변의 암석들에 비해 풍화에 더 취약한 지질특성을 가지고 있기 때문이다. 그리고 큰 핵석을 포함한 봉적층이 최대 10 m 이상으로 두껍게 형성되어 있는 지질조건이 산사태규모가 크고 파괴양상이 원호나 준원호 형태를 보이는 주 원인이다.

지질조건을 달리하는 지역에서의 산사태 조사자료 분석방법으로부터 정확성 및 실용성 검증을 위해 마천지역 산사태를 대상으로 이 기법에서 제시된 바에 따라 개략조사, 정밀조사, 전수조사 및 토질조사의 과정으로 이루어지는 현장조사와 물성시험, 공학시험 및 지화학분석을 수행하였다. 그 결과, 이 연구를 통해 개발된 산사태 조사 및 해석 기법은 자연사면의 산사태를 종합적으로 평가할 수 있는 새로운 모델로써 충분한 합리성을 갖추고 있을 뿐만 아니라 산사태의 취약성분석, 발생예측 및 피해영역 산정에 이르는 일련의 위험성평가기술에 실질적으로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

## 결 론

이 연구에서 우리나라 자연사면에서의 산사태와 관련하여 얻은 결과는 크게 두 가지로서 그 첫째는 산사태 조사 및 해석 기법의 개발이고, 둘째는 우리나라 산사태의 지질공학적 특성평가로 요약될 수 있다. 이들 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 자연사면에서 집중호우로 인한 산사태의 발생양상 및 지질공학적 특성들을 합리적으로 평가할 수 있는 산사태 조사 및 해석 기법을 개발하였다. 이 기법은 먼저 사전 자료조사를 통해 현황파악을 실시한 후 현장조사와 실내시험 및 산사태분석을 실시한다. 현장조사는 개략조사, 정밀조사, 전수조사 및 토질조사의 과정으로 수행하고, 실내시험은 물성시험, 공학시험 및 지화학분석을 구분하여 실시한다.

2) 연구지역에서는 태풍 “루사”의 영향으로 3일간에 최다누적강우량이 702 mm에 달하는 집중호우가 있었고, 이 때 47개 산사태가 발생된 것으로 조사되었다. 산사태들 또한 집중호우가 직접적이고도 가장 큰 외적 요인

으로 작용되었다. 그 근거로는 지질, 지형 및 토질 등 내적 조건이 다른 지역 모두에서 누적강우량이 많고 강우강도가 컸던 지역에서 상대적으로 더 높은 빈도로 산사태가 발생되었음을 들 수 있다.

3) 산사태는 주로 사면고도가 높은 토층사면에서 토층과 기반암과의 접촉부를 따라 발생하였다. 시작지점에서의 우세한 파괴형태는 원호나 준원호 및 평면파괴로서 기반암의 표면을 파괴면으로 하여 상부에 위치한 토층이 미끄러지는 전형적인 전이형 슬라이드가 주를 이룬다. 그리고 토석류로 이뤄진 사태물질이 사면의 하부로 이동되면서 유동성산사태로 변화되는 양상을 보였다.

4) 사면경사에 따른 산사태 발생빈도는 26~30°의 사면경사에서 발생빈도가 가장 높았다. 산사태규모는 부피로 보아 수십m<sup>3</sup>부터 수백m<sup>3</sup>까지이고 그 길이는 수미터에서 수백미터, 폭은 수미터에서 수십미터로서 좁고 긴 형태이고, 깊이는 대체로 1미터 이내로서 매우 얇은 특징을 보였다.

5) 산사태 발생지역의 토층은 미발생지역에 비해 균등계수와 곡률계수가 더 크고 세립자의 함유비율이 높고 더 낮은 연경도를 가진며, 대체로 큰 간극율과 작은 밀도특성을 갖는 것으로 나타났다. 이는 산사태 발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 더 불량한 입도분포와 느슨한 지반상태에 있음을 보여주는 결과로서 동일한 지질조건일 경우 간극율이 크고 밀도가 작은 토층이 산사태에 더 취약하다.

## 사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 산사태 피해규모 정량화 및 최적 피해저감 기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김원영, 채병곤, 김경수, 조용찬, 최영섭, 이춘오, 이철우, 김구영, 김정환, 김준모, 2003, 산사태 예측 및 방지 기술연구, 과학기술부, KR-03-(T)-03, 339p.
- 諏訪 浩, 西 一夫, 1990, 土石流の流動特性材料特性と規模, 京都大學防災研究所年報, 33, B1, 191-212.
- Bishop, A. W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5, 1, 7-17.
- Brantley, S. L. and Blai, A., Cremeens, D.L., MacInnis, I., Darmody, R.G., 1993, Natural etching rates of feldspar and hornblende, *Aquatic Sciences*, 55, 262-272.
- Fellenius, W., 1936, Calculation of the stability of earth dams, *Transactions Seond Congress on Large Dam, Int. Com. on Large Dams of the World Power Conference*, 4, 445-462.
- Holtz, W. G. and Gibbs, H. J., 1956, Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, *Journal, Soil Mechanics and Foundation. Div., ASCE*, 82, SM1, 867p.
- Johnson, R. B. and DeGraff, J. V., 1988, *Principle of Engineering Geology*, John Wiley and Sons, New York, 497p.
- Locke, W.W., 1995, Rates of hornblende etching in soils on glacial deposits, Baffin Island, Canada, In: *Rates of Chemical Weathering of Rocks and Minerals*. Colman, S.M. and Dethier, D.P.(eds), 129-145.
- Philbrick, S. S. and Cleaves, A. B., 1958, Field and laboratory investigations, in *Special Report 29: Landslide and Engineering Practice*, HRB (now TRB), National Research Council, Washington D.C., 93-111.
- Rid, H. T. and Liang, T., 1978, Recognition and Identification, in *Special Report 176: Landslide: Analysis and Control*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 34-80.
- Sowers, G. F. and Royster, D. L., 1978, Field investigation, in *Special Report 176: Landslide: Analysis and Control*, TRB, National Research Council, Washington D.C., 81-111.

2008년 2월 16일 원고접수, 2008년 3월 15일 게재승인

**김경수**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3054  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: kks@kigam.re.kr

**송영석**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3035  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: yssong@kigam.re.kr

**채병곤**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3052  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: bgchae@kigam.re.kr

**조용찬**

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3059  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: choych@kigam.re.kr

**정교철**

안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
Tel: 054-820-5753  
Fax: 054-822-5467  
E-mail: jeong@andong.ac.kr