

## 지질조건에 따른 사태물질 이동특성 고찰

채병곤\* · 김원영 · 이춘오 · 김경수 · 조용찬 · 송영석  
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해연구팀

### A Study on Transportation Characteristics of Debris dependent on Geologic Conditions

Byung-Gon Chae\* · Won-Young Kim · Choon-Oh Lee · Kyeong-Su Kim  
Yong-Chan Cho · Young-Suk Song  
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

토석류 산사태물질은 암석의 풍화 산물이므로 사태물질의 특성은 그 지역에 분포하는 기반암의 종류에 의존한다. 이 연구에서는 사태물질의 종류에 따른 이동특성에 대한 연구를 수행하기 위하여 암석의 풍화 특성과 지형조건이 서로 다른 3개 지역에서 발생한 26개 산사태를 연구대상으로 하였다. 산사태 발생지점의 정밀야외조사를 통하여 암석의 종류, 풍화 및 지형특성 등을 분석하였고 사태물질의 입도분포와 체적에 따른 이동과 지형특성과의 관계를 추적하였다. 지형조건 중 사면의 경사변화는 사태물질 이동거리에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 이는 경사 변화가 많을 경우 사태물질의 확산속도와 에너지가 변화하기 때문에 일정한 경사를 따라 사태물질이 흘러내리는 것보다 더 큰 이동거리를 보이는 것으로 해석하였다. 사태물질의 이동거리는 사태물질의 체적과 입도에도 큰 영향을 받는 것으로 파악되었다. 특히 사태물질 체적은 지질특성에 확연히 구별되어 반려암 지역의 경우 화강암 지역에 비해 4~5배 크다. 사태물질의 입도측면에서 중립질의 화강암 분포지역보다 대규모 핵석이 발달하고 풍화심도가 불규칙적인 반려암 지역에서 사태물질 규모 및 이동거리가 훨씬 크게 나타난다.

**주요어:** 사태물질, 이동특성, 지질특성, 경사변화, 사태물질 체적, 입도

Properties of sliding materials are dependent on the lithology because debris is the product of rock weathering processes. In order to characterize transportation behavior of debris dependent of debris types, this study selected 26 debris flows over three areas composed with different rock weathering types and topographic conditions. Analyses of lithology, weathering, and topographic characteristics were performed by detailed field survey. Based on the field survey data, transportation behavior of debris was studied at the aspect of the relationship of grain size and volume of debris as well as topographic conditions. According to the study results, change of slope angle is very influential factor on runout distance of debris among the topographic factors. Because the sliding velocity and the energy of debris are frequently changed and more irregular on an undulating slope, the runout distance of debris is larger than that of an uniformly dipping slope. Runout distance of debris is also influenced by volume and grain size of debris. Volume of debris in the gabbro is four or five times larger than that of the granite area because it is controlled by the lithology. Considered with grain size distribution, runout distance of debris is longer in the gabbro area which is composed with irregular grain

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

size bearing large corestones than that in the medium grained granite area.

**Key words:** sliding material, transportation behavior of debris, lithology, change of slope angle, volume of debris, grain size

## 서 론

자연사면에서 발생하는 산사태는 토층이나 풍화대 또는 토층과 풍화암편이 집적된 붕적층 등의 미고결 층 물질이 강우에 의하여 포화될 때 전단력의 약화현상이 발생됨으로 인하여 파괴가 발생하는 현상으로 산사태의 형태상 분류에 의하면 토석류(debris flow)에 해당된다. 토석류 산사태는 사태 자체가 비록 인간 생활권과 떨어져 발생되거나 또는 소규모 일지라도 파괴물질의 많은 부분이 모래입자보다 큰 암편들로 구성되어있고 빠른 속도로 사면 하부로 이동하므로 사면 하부의 인간 생활권에 큰 피해를 줄 수 있다. 토석류는 모래보다 큰 입자를 50% 이상 함유한 물질로 최고 이동속도가 30m/s로서(Johnson & Rahn, 1970, Hutchinson, 1988), 우리나라에서 발생하는 토석류 산사태는 대부분 가파른 산 사면에서 발생되므로 매우 빠른 이동속도를 보이고 있다.

산사태가 발생하면 지표에서 파괴된 사태물질은 사면을 따라 이동하여 대부분 저지대의 5~10도 내외의 완경사지에 퇴적된다(Johnson and Rodine, 1984, Rapp, 1986). 이는 사태물질의 거동이 지형조건에 의하여 크게 좌우됨을 의미한다. 한편 사태물질은 암석의 풍화 산물이므로 사태물질의 생성은 지역에 분포하는 기반암의 종류에 따라 특성을 달리한다. 일반적으로 결정질 암석인 화강암이나 화강편마암은 풍화의 수평적 분포가 다른 암석에 비하여 규칙적인 특징이 있다.

이 연구에서는 사태물질의 종류에 따른 이동특성에 대한 연구를 수행하기 위하여 암석의 풍화 특성과 지형조건이 서로 다른 경남 거창 및 마천 그리고 강원도 강릉 지역 등 3개 지역에서 발생한 26개 산사태를 연구대상으로 하였다. 이와 같은 기존 산사태 지역의 사태물질 거동특성을 분석, 비교하여 우리나라에 분포하는 같은 종류의 암석분포지의 사태물질의 이동특성을 파악하려 하였다. 이 3개 지역은 비교적 최근에 산사태들이 발생하여 산사태 형태와 사태물질의 이동,

확산 및 퇴적 양상들이 잘 보존되어 있고, 지질분포도 화강암, 편마암 및 반려암 등 다양한 암상이 분포한다는 점을 고려하여 연구지역으로 선정하였다.

이 연구의 결과는 다음 단계로 인공신경망을 이용한 사태물질의 유형별 이동거리를 정량적으로 산정하기 위한 연구에 최종 활용되었으며, 이를 통해 사태물질 이동거리 예측모델을 선택하였다(김원영 외, 2004; 서용석 외, 2005).

## 연구지역

산사태에 의해 사태물질이 산사면 하부로 이동될 경우 사태물질의 이동경로를 예측하고 확산거리를 산정하기 위한 목적으로 지질특성별 사태물질의 이동특성에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 먼저 시범연구지역을 설정하고 기존에 발생한 산사태를 대상으로 현장 정밀조사를 수행하였다. 시범 연구지역의 선정기준은 비교적 최근에 산사태가 발생하여 산사태연장은 물론 사태물질의 확산범위 측정이 가능하면서도 사태물질의 물리적 특성이 차별화되는 곳을 기본으로 하였다. 이를 바탕으로 2002년 태풍 '루사'에 의해 산사태가 집중적으로 발생한 강원도 강릉시 사천면 일대, 경남 함양군 마천면 일대와 2003년 태풍 '매미'에 의해 산사태가 집중적으로 발생한 경남 거창군 가북면 일대를 연구지역으로 선정하였다.

강릉시 사천면 지역은 화강암으로 이루어진 지역으로서 지형은 대부분 200m 이하의 낮은 구릉으로 이루어져 있다. 조사지역의 표토와 풍화토층은 화강암 풍화로 인해 전형적인 사질토로 구성되어 있으며, 대체적인 풍화심도는 1m 내외로 풍화의 수평적 분포는 대체로 규칙적인 것이 특징이다.

경남 거창군 가북면 지역은 2003년 태풍 '매미'의 영향권에 직접적으로 들었던 곳으로서 가장 최근에 발생한 산사태이고, 현재에도 사태물질이 발생 당시의 형태를 유지하고 있는 곳이므로 연구지역으로 선정하였다.

경남 함양군 마천면 지역은 지리산에 근접한 곳으로서 반려암이 주로 분포하는 곳이며, 지형적인 영향에 의해 산사태 연장이 매우 길고 급경사를 이루는 곳이다. 또한, 이 지역은 풍화토층 내에 핵석(corestone)이 잘 발달함이 특징이다. 다른 2개 지역과는 달리 높은 고도와 사면경사가 급한 지형조건이 사태에 미치는 영향을 파악하고, 핵석이 발달하는 지점에서 산사태의 취약성은 물론 핵석, 모래, 실트 등 다양한 입자 크기를 갖는 물질들의 확산범위를 해석하고자 연구지역으로 선정하였다.

## 연구방법

전술한 연구지역을 대상으로 사태물질의 이동특성을 규명하기 위한 주요 연구방법은 야외 정밀조사, 사태물질 현장시험 및 실내 토질시험, 지형분석 등으로 구분할 수 있다. 이 중 본 논문에서는 야외정밀조사와 사태물질 현장 및 실내시험, 그리고 지형분석결과를 토대로 지질종류에 따른 이동특성을 고찰해 보았다.

야외 정밀조사로는 연구지역 지질분포, 전수조사를 통한 산사태 기하측정, 사태물질 이동경로 및 영향범위 파악, 주요 지점의 사태물질 시료채취 등을 수행하였다. 산사태 기하측정은 단일 산사태에서 각 지점별 사면경사, 폭, 방향을 측정하고 그 지점에서 사태물질의 침식 깊이 또는 퇴적 두께를 횡방향으로 등간격 측정하였다.

사태물질의 물리적 성질을 파악하기 위해 토층시료를 채취하여 총 13종의 실내시험을 실시하였다. 시료는 연구지역에 분포하고 있는 지질과 지형조건 및 토층분포 등을 반영하고 가급적 단위면적당의 밀도비를 고려함으로써 토층의 특성이 균등하게 반영될 수 있도록 하였다. 원지반의 토층시료는 표토를 제거한 후 40~60cm 정도의 깊이에서 불교란 및 교란시료로 구분하여 채취하였고, 산사태 종점부에 쌓여 있는 퇴적토는 교란 시료만을 채취하였다. 한편, 핵석과 같이 입자가 큰 사태물질로 구성된 경우와 같이 실내시험을 위한 시료채취가 불가능할 경우 현장에서 토층의 밀도 측정을 위해 현장밀도시험을 수행하였다. 연구지역에서 채취한 토층시료 중에서 교란시료로는 비중, 함수비, 입도분석, 액성한계 및 소성한계 등의 물성시험을 실시하였다. 그리고 불교란 시료로는 실내 밀도시험을 통해 간극비, 간극율 및 포화도를 산정하였으며, 직

접전단시험에 의한 전단강도의 측정과 연구지역 토층에 적합한 변수위법에 의해 투수계수를 구하였다.

## 지질종류별 사태물질 이동특성

### 등립질 화강암 분포지(강릉지역)

#### 지질특성

이 지역은 2002년 8월 31일~9월1일 양일간에 걸쳐 태풍 '루사'의 영향으로 약 900mm의 기록적 강우가 내려 강릉시 사천면과 양양읍 일대에 수 백개의 산사태를 발생시켰다. 강릉지역 내에서도 산사태가 집중적으로 발생한 지역은 2000년 4월 대규모 산불이 발생한 지역에 해당한다.

이 지역은 대부분 약 200m 이하의 구릉으로 이루어져 있다. 강릉지역은 전 지역이 중립질의 복운모 화강암으로 이루어져 있는데, 풍화가 상당히 진행되어 대부분의 지역이 완전 풍화암으로 이루어져 있다. 대체적인 풍화심도는 1m 내외로 풍화의 수평적 분포는 대체로 규칙적인 것이 특징이다.

#### 산사태 기하양상 및 거동특성

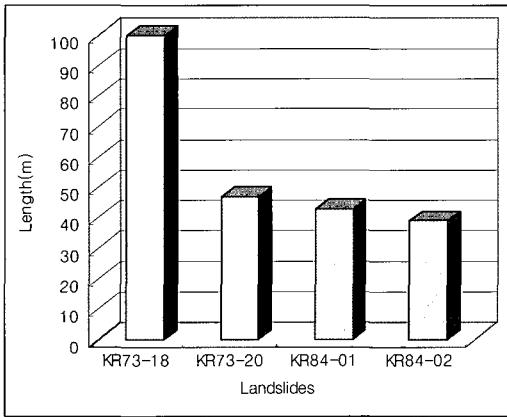
이 지역에서 발생한 525개의 산사태들은 대부분 발생지점이 서로 근접해 있고, 동일 수계에서 다수의 산사태가 발생하였다. 따라서, 전체 산사태를 대상으로 단일 산사태별 사태물질 확산거리를 정확히 구분하여 측정하기는 매우 어렵다. 또한, 이 지역에서는 2002년 태풍 '루사' 발생 당시 산사태 및 하천범람으로 인한 피해가 매우 심하였던 관계로 피해복구 작업이 비교적 빠르게 진행되었다. 이로 인해 산사태 발생 초기의 산사태 형태와 사태물질 분포양상이 보존되지 못하고 이미 훼손된 상태이다. 따라서, 이번 연구에서는 단일 산사태의 사태물질 확산범위를 정확히 측정할 수 있는 산사태만을 선별한 관계로 총 4개의 산사태를 대상으로 시범적 연구를 실시하였다. 선정된 4개 산사태는 태풍 '루사' 때 발생한 산사태 중에서 해발 50~60m의 낮은 구릉에서 2차적으로 산사태가 다시 발생한 것들이고, 서로 독립적으로 분포하고 있어 단일 산사태의 확산거리와 영향범위를 명확히 구분해야 하는 조건을 만족한다.

산사태의 기하양상 중 사태물질 확산거리를 포함한

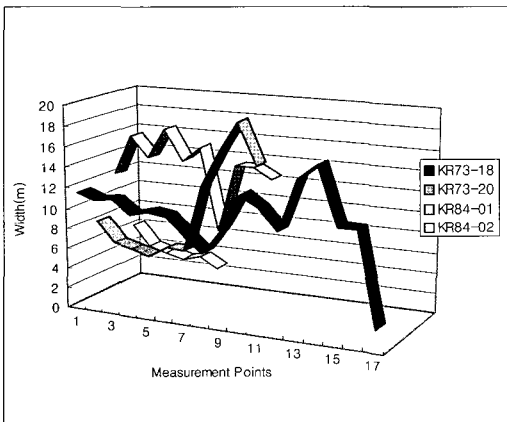
4개 산사태의 총연장은 39~100m 범위에 분포한다 (Fig.1 a). 이번 조사대상의 산사태들은 KR73-18을 제외하고는 50m이하의 비교적 짧은 산사태이다. 대부분 산사태의 폭은 개별 산사태별로 측정지점마다 다양하게 분포하는데 최소 2m에서부터 최대 18m에 이르며, 단일 산사태 내에서도 폭의 변화가 심하게 나타난다 (Fig. 1 b).

조사대상 산사태의 사면경사도 각 지점마다 다양하게 변화하지만, 최대 경사는 42도에 머무르고 대부분 30도 미만의 경사분포를 보인다. 단일 산사태에서 사

면길이에 대한 사면의 경사변화도(X)를 정량적으로 표현하기 위해 다음과 같이 계산하였다. 단일 산사태에서 경사가 변화하는 구간을 각각 나누어, 산사태 총길이에 대한 각 구간별 산사태 길이와 경사를 곱한 후, 각 구간 값의 합을 구하였다(Eq. 1 & Fig. 2). 이를 이용해 단일 산사태에서 길이 성분을 고려하여 경사 크기의 변화를 파악할 수 있다. 총 길이가 동일한 산사태이더라도 특정 경사를 갖는 구간별 산사태의 길이가 다르거나, 구간별 산사태 길이가 같더라도 사면의 경사가 다를 경우 경사변화도 X는 다양하게 나타난다. 따라서, 자연계에 존재하는 다양한 조건의 산사태들을 대상으로 이 값을 직접적으로 비교할 수는 없으나, 개별 산사태에서는 이 값을 이용하여 사면의 경사와 길이의 관계에 의한 경사변화도를 나타낼 수 있다. 연구 지역의 사면의 경사변화도는 Fig. 3과 같이 분포한다.



(a)



(b)

Fig. 1. Length of debris flow(a) and variation of their widths on each measurement point(b).

$$X = \sum_{i=1}^n L_i \tan \alpha_i \tag{1}$$

$$L_i = \frac{l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \tag{2}$$

면의 경사는 일반적으로 산사태 폭의 변화에 직접적으로 영향을 주는 것으로 알려져 있다(千木良,

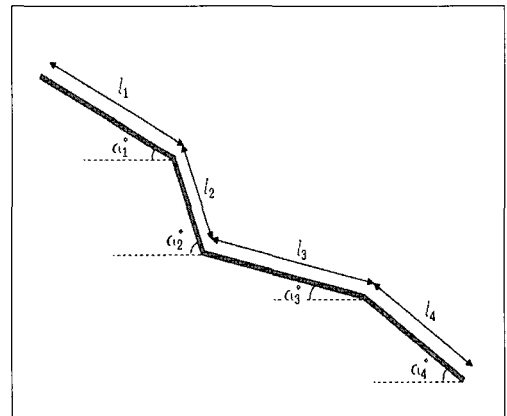


Fig. 2. Schematic explanation for changes of slope angles.

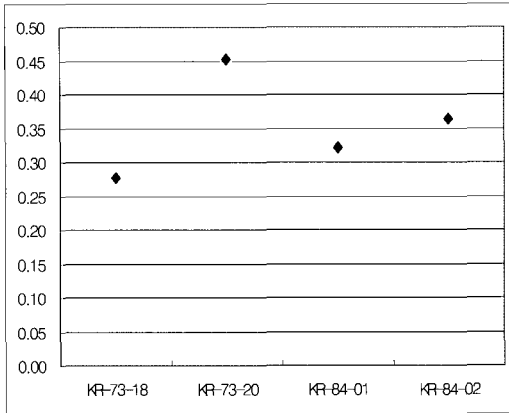
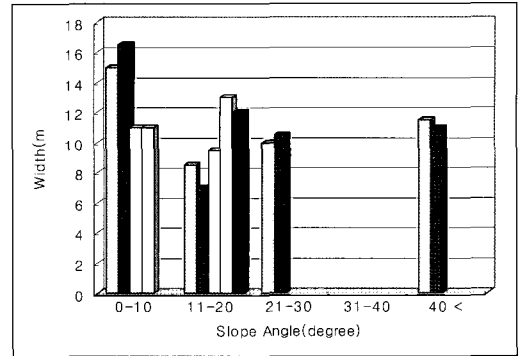


Fig. 3. Grades of slope angle changes at Gangneung area.

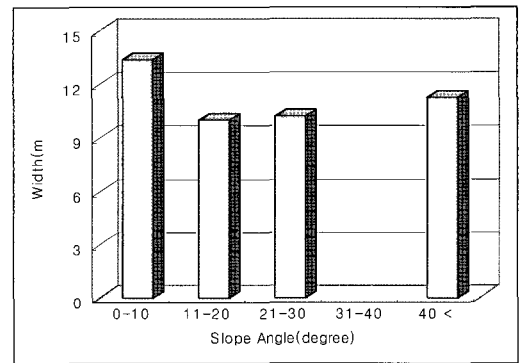
1997). 즉, 사태물질이 일정한 경사를 갖는 산사면 하부로 이동되다가 갑자기 경사가 완만한 구간에 이르면 완만해진 경사가 사태물질의 지속적인 흐름을 방해하게 된다. 이에 따라 사태물질은 경사방향으로의 지속적인 진행보다는 측방으로의 퍼짐현상이 두드러지게 된다. 사면의 경사와 산사태 폭을 측정지점별로 비교해 보면 대체로 급경사 구간보다는 완경사 구간에서 산사태의 폭이 더 넓게 형성됨을 알 수 있다(Fig. 4 a). 경사 구간별 산사태 평균 폭도 경사 10도 미만 구간에서의 폭이 10도 이상의 구간보다 더 넓은 양상을 보인다(Fig. 4 b). 단, 40도 이상의 구간은 산사태가 시작하는 부분으로서 이 지점에서는 전이형 슬라이드 (translational slide) 형태로 산사태가 시작하였기 때문에 산사태의 폭이 비교적 넓게 나타난다.

사태물질이 하부로 흘러내려간 지점의 단면적을 추출하고 이를 바탕으로 산사태 전체의 체적을 구하기 위하여 사면길이 방향으로 기하양상이 변화하는 지점에서 원지반이 침식되어 깎인 깊이를 횡단방향으로 측정하였다. 이와 함께 산사면 하부에서는 사태물질이 퇴적된 두께도 동시에 측정하였다. 산사태 횡단 깊이 또는 두께 측정결과를 통해 산사태의 전반적인 기하양상 변화를 확연히 파악할 수 있었다(Fig. 5).

사태물질 퇴적부 단면적은 일정한 변화양상을 보이지 않고 지점마다 차이가 있다. 이는 사면 상부 사태물질의 이동거리에 기인하여 차이가 발생할 수 있고, 사면의 경사가 갑자기 완만하게 변화하기 때문에 나타날 수 있다. KR73-18의 경우 42.5m지점과 60.5m지점



(a)



(b)

Fig. 4. Relationship between slope angle and width of debris flow. (a) Width variation against to the slope angle. (b) Distribution of average width against to the slope angle.

의 퇴적물 단면적이 인근 지점과 큰 차이를 보이는데, 42.5m 지점은 산사태의 방향이 N30E에서 N70E로 급격히 변화하면서 사태물질이 하부로 계속 이동되지 못하고 이 부근에 많이 퇴적된 것으로 생각된다. 즉, 방향의 변화가 큰 관계로 사태물질 이동속도가 급격히 줄어든 것이 원인이 될 수 있다. 60.5m 지점은 상부의 경사가 15도인데 반해 이 지점을 경계로 5도로 급격히 줄어드는 곳이다. 경사의 감소는 위에서 설명한 것과 마찬가지로 사태물질 이동속도의 저하를 일으키고, 이로 인해 상대적으로 많은 양의 사태물질이 경사가 완만해지는 지점에 많이 퇴적된다. 이러한 양상은 다른 산사태에서도 유사하게 나타난다.

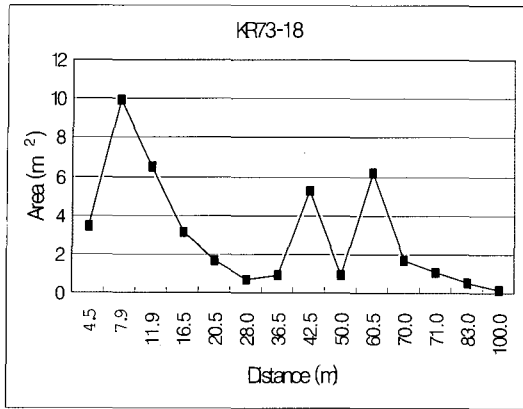


Fig. 5. Area of debris flow (KR73-18) on each distance of measurement point from the head part.

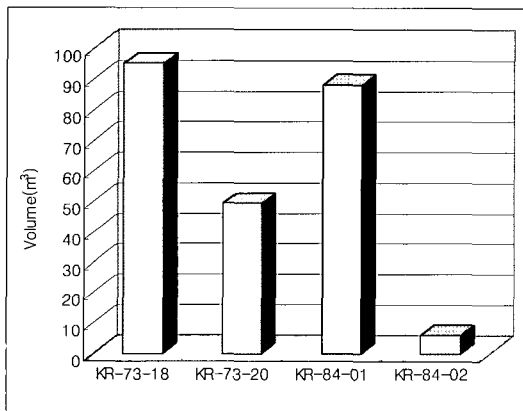


Fig. 6. Volume distribution of debris flow at Gangneung area.

각 지점별로 구한 단면적을 이용하여 사태물질 전체의 체적을 계산하였다(Fig. 6). 사태물질의 체적은 산사태 하부로 이동되는 사태물질의 양을 결정하는 것으로서 확산범위를 결정하는 중요한 요소이다. 연구지역에서 구한 산사태별 사태물질의 체적은 6.1m<sup>3</sup>~95.2m<sup>3</sup>의 범위에 이른다. 이처럼 사태물질 체적이 작은 이유는 전술한 바와 같이 사태물질 확산범위를 확실하게 구분할 수 있는 산사태만을 대상으로 하였고, 태풍 '루사'때 발생한 산사태 중 이차적으로 산사태가 다시 발생한 것만 대상으로 하였기 때문이다. 산사태 체적은 위에서 설명한 기하요소들 중 폭과 밀

접한 관계가 있는 것으로 판단된다. KR73-18의 길이는 다른 산사태에 비해 50m이상 길지만, 산사태 체적은 다른 산사태 특히, KR84-01에 비해 불과 7.1m<sup>3</sup> 밖에 크지 않다. KR73-20의 경우 산사태 길이는 KR84-01과 유사하지만 폭이 좁기 때문에 KR84-01보다 체적이 더 작다.

### 화강암 분포지(거창지역)

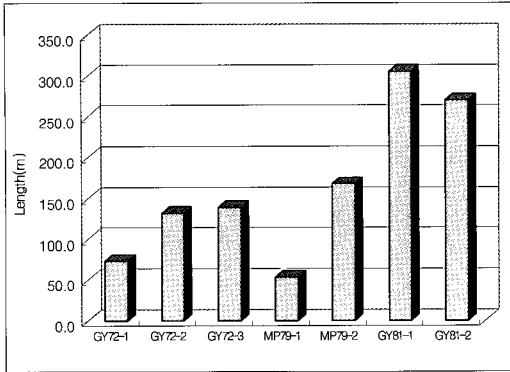
#### 지질특성

이 지역은 2003년 9월 12일~13일에 걸쳐 우리나라에 상륙한 태풍 '매미'의 영향으로 거창군 가북면 일대에 집중적으로 산사태가 발생하였다. 거창지역은 소백산맥의 영향을 받아 험준한 지형을 이루고 있어서 경사가 급하며 사면이 길게 형성되어 있다. 조사지역의 지질은 흑운모 편마암과 흑운모 대상편마암으로 구성된 선캠브리아기의 변성암류를 기반으로 하여 이를 관입한 중생대의 화성암류로 이루어져 있다.

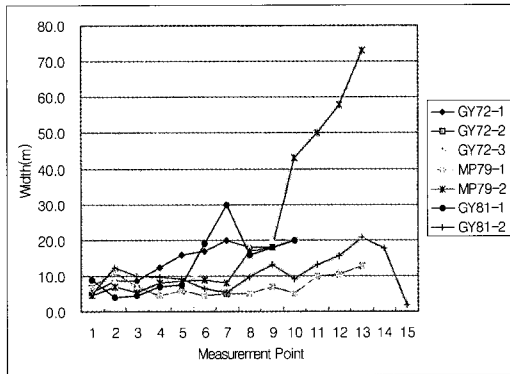
이 지역의 산사태는 편마암 지대에서도 다소 발생했으나 집중적인 발생은 화강암 분포지에 해당된다. 산사태가 발생한 지점은 대부분 능선에서 가까운 고지대로서 0.5m 내외의 얇은 슬라이드 형태를 보이고 있다. 이는 이 지역의 풍화상태가 고른 분포를 보여 산사태가 기반암 상부의 얇은 풍화토층에서만 발생된 것으로 볼 수 있다. 산사태가 발생한 상부의 단애(scarpe)에서 관찰한 바에 의하면 약 0.5m 정도의 나무 뿌리 깊이로 파괴면이 형성되어 있다. 또한, 이 지역의 산사태는 마천지역과는 달리 붕적층을 거의 찾아볼 수 없음도 특징이다. 즉, 이 지역의 풍화심도는 대체로 매우 얇게 발달되어 상대적으로 지표물질의 집적물인 붕적층의 발달이 미약한 것으로 판단하였다.

#### 산사태 기하양상 및 거동특성

거창지역에서는 태풍 '매미'시에 발생한 산사태 중 사태물질 확산범위 산정을 위한 기본조건에 부합하는 7개의 산사태를 선정하여 기하양상과 사태물질 거동특성을 조사하였다. 산사태 발생지점이 해발 600~700m 지점에 위치하므로 사태물질 확산거리를 포함한 산사태의 총연장은 54~305m 범위에 다양하게 분포하는데(Fig. 7 a) 마천지역에 비교하면 상대적으로 작은 규모이다. 산사태의 폭은 개별 산사태별로 측



(a)



(b)

Fig. 7. Length of debris flow(a) and variation of their widths on each measurement point(b).

정지점마다 다양하게 분포하는데 최소 4m에서부터 최대 73m에 이른다. GY81-1 산사태를 제외하고는 단일 산사태 내에서도 폭 변화는 마천지역에 비해 심하지 않음이 특징이다(Fig. 7 b).

조사대상 산사태의 사면은 각 지점마다 경사가 다양하게 변화하는데, 최대 경사는 45도이고 대부분 30도 미만의 분포를 보인다. 단일 산사태에서 사면길이에 대한 사면경사변화도(X)는 대체로 0.40~0.60의 범위에 분포하는데(Fig. 8), 이는 경사각, 동일 경사를 가지는 구간의 사면길이, 산사태 총길이의 상호관계에 의해 복합적으로 결정된다.

사면의 경사와 산사태 폭의 관계는 강릉지역의 경우와 같이 저각도 경사에서 폭이 넓어지는 경향이 뚜렷하다(Fig. 9 a). 특히, 30도 이하의 경사 구간들은 30

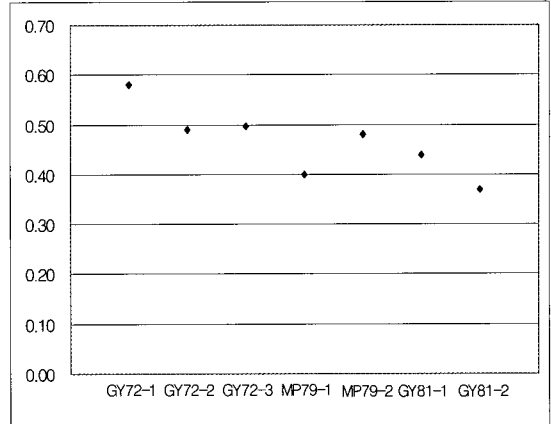
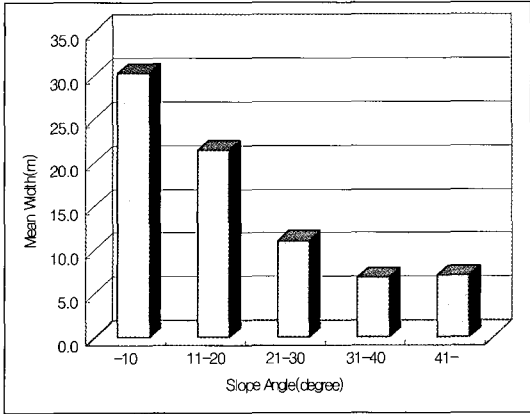


Fig. 8. Grades of slope angle changes at Geochang area.

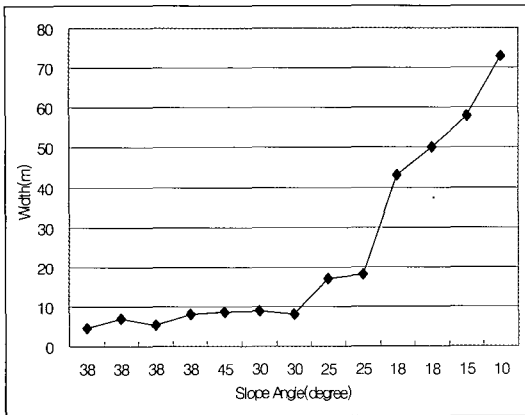
도를 초과하는 구간보다 산사태 폭의 차이가 큰 것으로 관찰되었다. 경사 변화구간별로 산사태 폭을 구분해서 살펴보면 이와 같은 현상은 더욱 현저히 나타난다. 예를 들어, MP79-2의 경우를 보면 25도에서 18도로 경사가 완만해지는 구간에서 산사태 폭이 18m에서 43m로 크게 증가하고, 경사가 10도로 다시 변하는 구간은 73m로 더욱 큰 증가추세를 나타낸다(Fig. 9 b). 이와 같은 양상은 이 지역 풍화특성이 봉적층의 분포가 매우 얇고, 후술할 마천지역처럼 대규모 핵석이 분포하지 않기 때문에 사태물질의 거동이 사면의 경사 등 지형의 영향에 더 크게 좌우되는 것이다.

산사태 침식부와 퇴적부의 단면적은 다른 연구지역과 마찬가지로 일정한 변화양상을 보이지 않고 지점마다 차이가 있다. 그러나, 이 지역 산사태의 단면적 변화양상은 산사태 종점부분에서도 상당한 넓이의 면적을 나타낸다(Fig. 10). 다른 연구지역에서는 종점부근에서 산사태 단면적이 매우 작아지고 따라서 체적도 시작부 또는 중간부에 비해 작은 양상이다. 그렇지만, 거창지역에서는 산사태 종점부 인근에는 대부분 농경지가 존재하여 수 개의 소단이 발달하고 있다. 이로 인해 사태물질이 원거리를 이동함으로써 자체의 이동속도가 점차 감소되어 퇴적되는 것이 아니라, 소단의 발달영향을 더 크게 받아 비교적 급격히 사태물질의 이동이 종료되었다. 이로 인해 종점부에서도 상당한 퇴적물 단면적을 가진다(Fig. 10 b).

지점별로 구한 단면적을 이용하여 사태물질 전체의



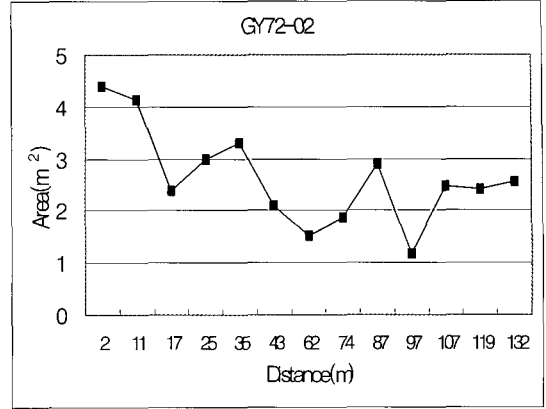
(a)



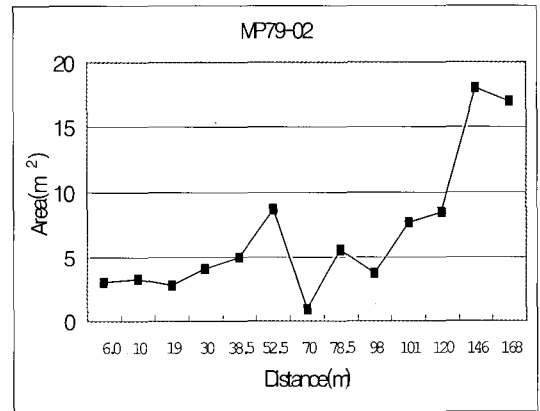
(b)

Fig. 9. Relationship between slope angle and width of debris flow. (a) Mean width of debris flow against to the slope angle. (b) Distribution of width on each measurement point on MP79-2 debris flow.

체적을 계산하였다(Fig. 11). 연구지역에서 구한 산사태별 사태물질의 체적은  $50.6\text{m}^3 \sim 1,320.5\text{m}^3$ 의 범위에 이르러 마천지역과는 상당한 체적차이가 있다. 이는 이 지역에 붕적층이 매우 얇게 발달하고 핵석이 거의 존재하지 않는 관계로 마천지역과 같은 엄청난 양의 사태물질 체적을 갖지 않기 때문이다. 가장 많은 체적을 갖는 MP79-2의 경우는 단면적 분포에서 보듯이 산사태 전반에 걸쳐 깊은 침식 및 퇴적 면적을 가지므로 큰 산사태 체적을 나타낸다.



(a)



(b)

Fig. 10. Area distribution of debris flow on each measurement point. (a) GY72-2 (Terraces are started from 107m). (b)MP79-2 (Terraces are started from 102m).

반려암 분포지(마천지역)

지질특성

이 지역에서는 2002년 8월 31일~9월 1일 사이에 태풍 '루사'의 영향으로 지리산 어리목 지역에서 최대 1일 강수량 856mm를 기록하는 등 지리산 일대에 많은 강우를 내려 곳곳에 산사태가 발생하여 가옥피해 및 인명 손실 등 큰 손실을 가져왔다. 이 지역은 흑운모와 각섬석을 다량 함유한 염기성 반려암이 넓게 분포하



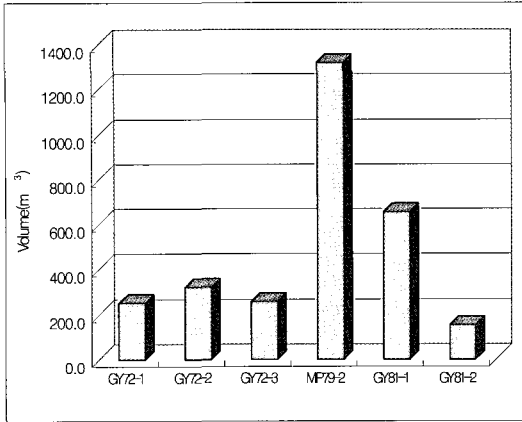


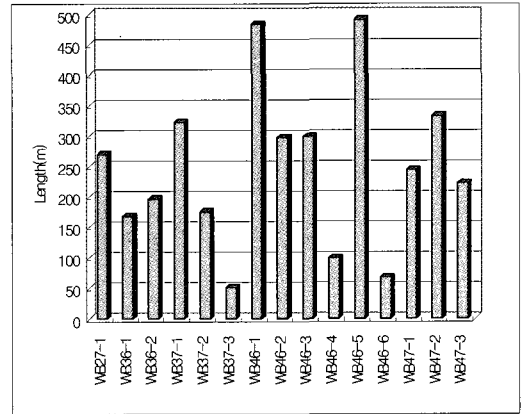
Fig. 11. Volume distribution of debris flow at Geochang area.

는데, 해발 600m를 기준으로 상부구간에는 선캠브리아기 편마암이 발달하고 있으며, 하부구간에서는 열기성 반력암이 발달한다.

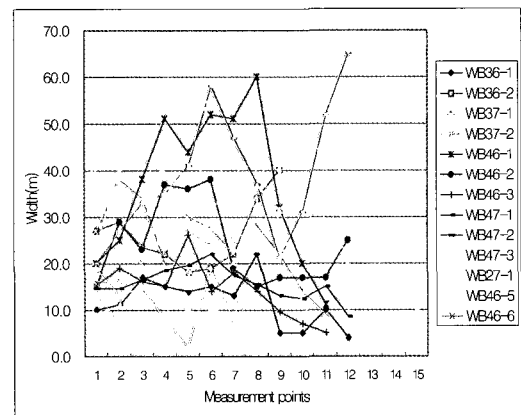
특이한 점은 반력암과 접촉하고 있는 선캠브리아기 편마암 지역보다 반력암 분포지역에 산사태가 집중되어 있을 뿐 아니라, 과거에 발생하였던 산사태의 흔적이 여러 곳에서 관찰된다. 반력암 분포 지역에서는 차별풍화의 산물인 핵석이 매우 잘 발달하고 있음이 관찰된다. 핵석 발달로 인해 이 지역에서의 풍화심도는 매우 불규칙한 현상을 보이며 최대 풍화토의 심도는 10m 이상으로 관찰되고 있어 다른 연구지역의 풍화심도에 비하여 월등히 깊게 발달되어 있다. 또한 핵석을 포함하는 풍화대가 과거부터 지속적으로 붕괴되어 사면 중·하부에 깊은 붕적층을 형성하고 있는 것도 특징 중의 하나이다.

산사태 기하양상 및 거동특성

마천지역에서도 동일한 방법으로 총 15개의 산사태를 선정하여 기하양상을 정밀하게 측정하였다. 사태물질 확산거리를 포함한 산사태의 총연장은 67.5m~483m 범위에 분포하여 강릉지역 산사태와 큰 차이를 보인다(Fig. 12 a). 이는 연구지역 산사태가 해발 444m~624m 정도에서 발생하여 높은 지형고도와 함께 사면길이가 긴 지형을 따라 흘러내렸기 때문이다. 산사태의 폭은 개별 산사태별로 측정지점마다 다양하게 분포하는데 최소 2m에서부터 최대 65m에 이



(a)



(b)

Fig. 12. Length of debris flow(a) and variation of their widths on each measurement point(b).

르고, 단일 산사태 내에서도 폭의 변화가 심하게 나타난다(Fig. 12 b).

조사대상 산사태가 발생한 사면의 경사도 각 지점마다 다양하게 변화하지만, 최대 36도이며 대부분 30도 미만의 분포를 보인다. 단일 산사태에서 사면길이에 대한 경사변화도(X)는 대체로 0.30~0.60의 범위에 분포한다(Fig. 13).

사면경사와 산사태 폭의 관계를 살펴보면 강릉지역에서와 같은 완만한 경사 구간이 급경사 구간보다 산사태 폭이 반드시 넓은 것이 아님을 알 수 있다(Fig. 14). 이는 여러 가지 원인에 기인하지만, 그 중 단일 산사태 내에서 사태물질의 구성이 지형특성과 관련하여

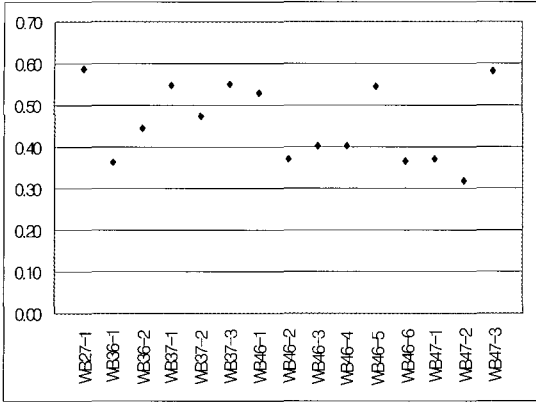


Fig. 13. Grades of slope angle changes at Macheon area.

산사태 폭에 영향을 주는 것으로 생각된다. 이 지역 사태물질은 다양한 크기의 입자로 구성되어 있으며 특히 다수의 핵석이 존재한다. 이와 같은 구성의 사태물질 이동은 비교적 등립질로 구성된 사태물질의 경우보다 불규칙적으로 이동되므로(諏訪와 奥西, 1990), 상대적으로 등립 물질로 구성된 강릉지역과는 달리 사면경사와 폭의 관계가 선형적이지 않는 것으로 생각된다.

산사태 침식부와 퇴적부의 단면적은 일정한 변화양상을 보이지 않고 지점마다 차이가 있는데, 이 지역에서 불규칙한 단면적의 분포는 사태물질의 입자크기가 다양하게 분포하기 때문이다. 즉, 사태물질의 입자가 조립의 거력(boulder)에서부터 세립질 물질까지 다양하게 분포하는 상황에서 거력이 분포하던 곳은 주변 지역보다 단면적이 크게 나타나고 세립질 풍화토로 구성된 지역은 상대적으로 작은 단면적으로 측정되기 때문이다. WB47-2의 경우 산사태 시작부는 평균 3m×2m 크기의 대규모 핵석이 분포하고 있고 그 인근 23m 지점은 최대 3.6m 깊이로 침식되어 있다(Fig.15). 이로 인해 23m 부분의 단면적은 52.35m<sup>2</sup>로 크게 증가하였다.

각 지점별로 구한 단면적을 이용하여 사태물질 전체의 체적을 계산하였다(Fig. 16). 연구지역에서 구한 산사태별 사태물질의 체적은 301.5m<sup>3</sup>~5,822.9m<sup>3</sup>까지 광범위하다. 강릉지역의 산사태 체적과 비교하면 약 50~60배 정도의 체적 차이가 있다. 이는 마천지역이

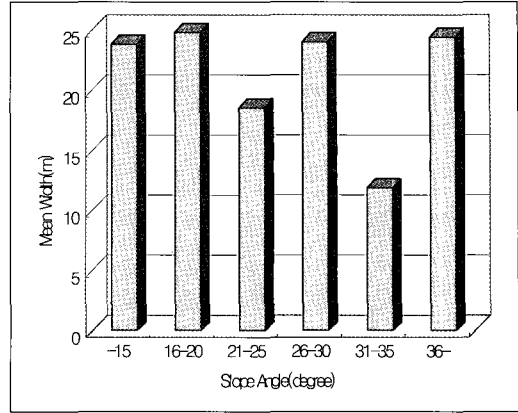


Fig. 14. Relationship between slope angle and mean width of debris flow.

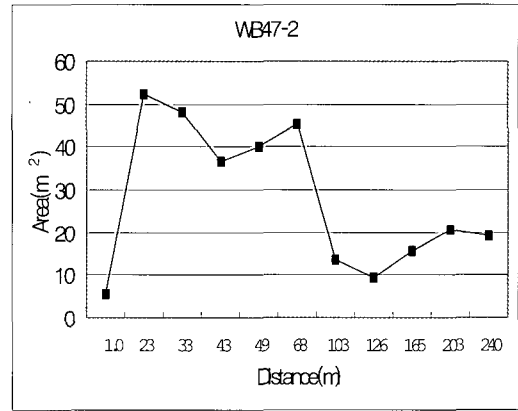


Fig. 15. Area distribution of debris flow (WB47-2) on each measurement point.

높은 고도와 연장이 긴 산사면으로 구성되어 있기 때문이고, 그 외에 단면적 부분에서 설명한대로 거력을 포함하는 풍화토층으로 구성되어 있기 때문이다. 특히, WB47-2의 경우는 같은 지역의 다른 산사태에 비해 약 7배 이상의 큰 체적을 나타낸다.

### 지질별 사태물질 토질특성 비교

산사태가 발생된 지역의 지질조건을 고려하여 각 지역 사태물질의 토질특성을 비교하였다.

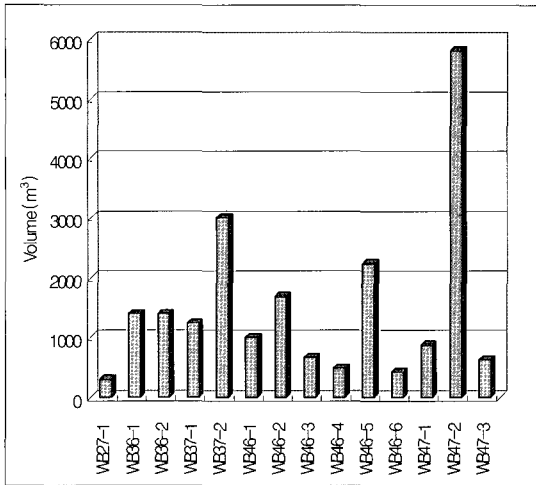


Fig. 16. Volume distribution of debris flow at Macheon area.

#### 동립질 화강암 분포지(강릉지역)

조사대상 4개 산사태에서 토층의 물리적 및 공학적 특성을 파악하기 위하여 총 21개소(원지반토 9개소 및 퇴적토 12개소)에서 토층시료를 채취하였다. 이 지역 토층시료는 화강암 풍화토로서 거의 균등한 입도의 모래로 이루어져 있다. 산사태 지점 원지반 토층시료의 주요 특징들을 살펴보면 비중은 2.56~2.59의 범위이고 평균 2.58로서 모암인 화강암의 비중과 유사하며, 이는 일반적인 모래의 비중과 거의 같다(Fig. 17 a). 간극비는 0.70~0.96의 범위로서 평균은 0.84이며(Fig. 17 b), 건조밀도는 최소 1.32g/cm³부터 최대 1.51g/cm³의 범위이고 평균은 1.40g/cm³이다(Fig. 17 c). 액성한계의 경우 4개의 시료 중에서 3개가 모두 비소성(Non-Plasticity)으로 이론적 모래의 속성치를 반영하고 있으며, 1개 시료(KR84-01)만이 액성한계 24.89%, 소성한계 18.18%, 소성지수 6.69%인 시험치를 갖는다.

입도분석 결과에 의하면 모래의 함유비가 최소 90%이상의 값을 지님으로서 토층시료의 거의 대부분이 모래질로 구성되어 있으며, 세립토는 10% 이내이다. 이를 다시 세분하면, 조립으로 분류될 수 있는 자갈은 평균 2% 내외이고 세립토에 해당하는 실트와 점토의 함유비는 평균 4%정도여서 대부분은 거의 소성이 없는 모래로 구성되어 있다. 입도곡선은 기울기가 완만하고 균등계수 및 곡률계수는 양입도(well grading)의 조건을 충족함으로서 양호한 입도로 구분되며,

통일분류법에 의하면 대부분 SW로 분류된다. 입도가 균질한 모래일수록 입자간의 틈이 많아서 간극비가 클 뿐만 아니라 투수성도 양호하다. 투수시험 결과에 의하면 투수계수가  $3.27 \times 10^{-3} \sim 3.78 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위이고 평균  $1.33 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로서 대표적 모래의 투수계수에 해당하는 시험치를 갖는다(Fig. 17 d).

#### 화강암 분포지(거창지역)

조사대상 6개 산사태에서 토층의 물성 및 공학적 특성을 파악하기 위하여 총 30개소(원지반토 13개소 및 퇴적토 17개소)에서 시료를 채취하였다. 거창지역의 토층시료는 화강암 풍화토로서 모래질이 주를 이루며, 비교적 큰 풍화암편들과 자갈들을 함유하고 있다. 산사태 지역 각 사면들의 원지반 토층시료의 주요 특징들을 살펴보면 비중은 2.60~2.71의 범위이고 평균 2.65로서 모암의 성분에 직접적 연관이 있는 물성이다(Fig. 17 a). 강릉지역에 비해서는 다소 높고 마천지역에 비해서는 낮은 경향성을 보인다. 원지반토의 간극비는 0.70~1.57의 범위로서 평균은 0.93이며(Fig. 17 b), 건조밀도는 최소 1.04g/cm³부터 최대 1.54g/cm³의 범위이고 평균은 1.38g/cm³로서 모두가 강릉지역과 거의 유사한 물성치를 보이는데, 이는 유사한 화강암 풍화토인 점과 상관성이 있는 것으로 판단된다(Fig. 17 c). 액성한계의 경우 퇴적토는 모두가 이론상 모래에 가까운 비소성으로 분류됨으로서 이 지역 또한 유수에 의해 세립이나 미립자들은 상당량이 계곡 등으로 떠내려갔음을 암시하고 있다. 원지반토는 대부분 비소성이고 비소성으로 분석되지 않은 토층시료 또한 비교적 낮은 소성도를 지닌다.

입도분석 결과 0.075mm 이상이어서 모래로 분류되는 입자들의 함유비가 평균 85%이상을 차지하며, MP79-1의 토층시료와 같이 자갈의 함유비가 20% 이상인 경우도 있다. 비교적 양입도인 원지반토에 비해 퇴적토는 빈입도이거나 불균형입도로 분류되는 곳도 있다. 통일분류법에 의하면 원지반은 SW, SW-SC로서 입도가 양호한 모래질인 반면, 퇴적토는 대부분이 SP로 분류되어 입도가 불량함을 알 수 있으며 부분적으로는 거의 균등한 입자크기들로만 퇴적되는 경우가 있다. 원지반토에 대한 투수시험 결과에 의하면 투수계수가  $2.34 \times 10^{-3} \sim 2.32 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 의 범위이고 평균  $7.74 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로서 모래질의 투수계수에 해당하는

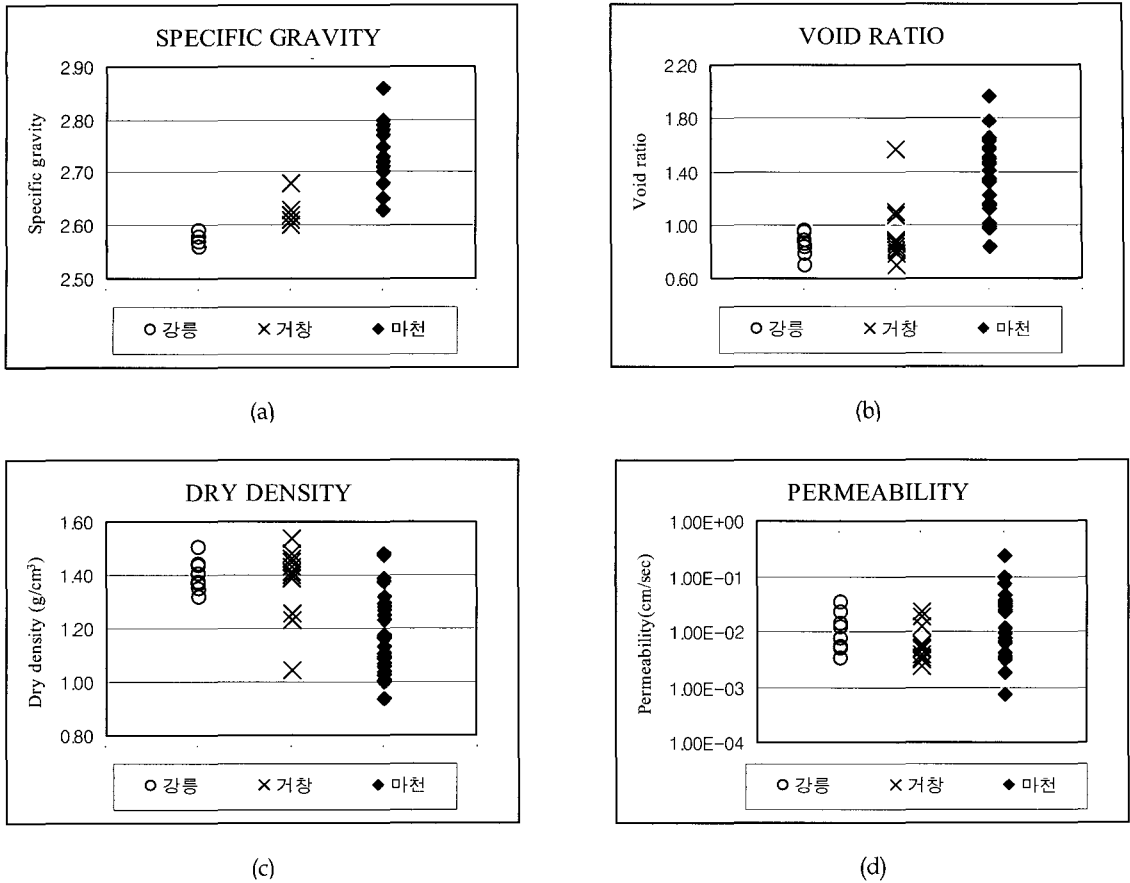


Fig. 17. Soil properties of the debris at three study areas. (a) Specific gravity. (b) Void ratio. (c) Dry density. (d) Permeability coefficient.

시험치를 갖는데, 강릉지역에 비해서는 다소 낮은 투수성을 지닌 토층인 것으로 평가된다(Fig. 17 d).

**반려암 분포지(마천지역)**

조사대상 15개 산사태의 토층 물성 및 공학적 특성을 파악하기 위하여 총 56개소(원지반토 34개소 및 퇴적토 22개소)에서 시료를 채취하였다. 산사태 지역 각 사면들의 원지반 토층시료의 주요 특징들을 살펴보면 비중은 2.61~2.86의 범위이고 2.72로서 모암인 반려암의 비중에 거의 근접하고 일반적인 토층의 비중에 비해서는 높은 결과 치이다(Fig. 17 a). 간극비는 0.77~2.27의 범위로서 평균은 1.33인데, 이는 강릉지역 평균치인 0.84에 비해 높은 편이다(Fig. 17 b). 또한, 건

조밀도는 최소 0.80g/cm<sup>3</sup>에서 최대 1.52g/cm<sup>3</sup>의 범위이고 평균치는 1.20g/cm<sup>3</sup>의 값을 갖는다(Fig. 17 c). 액성한계의 경우 일부 퇴적토는 비소성을 보이며, 입도분석 결과 원지반토의 대부분은 모래 이상의 입자크기가 90% 이상을 차지한 반면, 하부의 퇴적토에선 굵은 암편이나 큰 자갈 등의 함량이 80% 이상을 차지하는 매우 조립질의 분포특성을 보인다. 원지반토의 세립 함유비는 평균 7% 내외이나, 퇴적토는 퇴적이 시작된 상부에서는 주로 굵은 자갈들이 많이 섞여 있으며, 하부로 내려갈수록 점점 작은 입경들의 함유비가 높아짐으로써 유수에 의한 퇴적양상을 잘 보여주고 있다.

원지반의 토층시료는 입도분포가 대부분 양호한 상태이고 퇴적토는 큰 암석덩어리와 자갈들이 함유되어

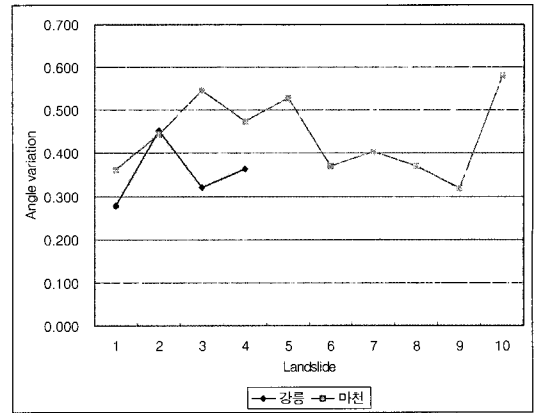
있기 때문에 입도분포가 불량(poor grading)하거나 불균형한 입도(gap grading)를 가지는 경우들이 많다. 그에 따라 통일분류법에 의한 흙의 분류에 의하면 원지반토는 SW, SW-SC가 주를 이룬 반면, 퇴적토는 거의 GP이거나 SP로 분류되는데, 이는 앞에서도 거력이나 굵은 자갈들의 분포와 함께 유수에 의해 떠내려가 퇴적되는 과정에서 같은 위치에 비슷한 크기의 입경들이 퇴적되었기 때문인 것으로 해석된다. 원지반토에 대한 투수시험 결과 투수계수가  $7.16 \times 10^{-4} \sim 2.43 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 의 범위로서 부분적으로 투수성이 상당히 낮은 토층이 분포하기도 하나 평균치는  $3.59 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로서 투수성이 대체로 양호한 토층지반으로 분류된다(Fig. 17 d).

### 토 의

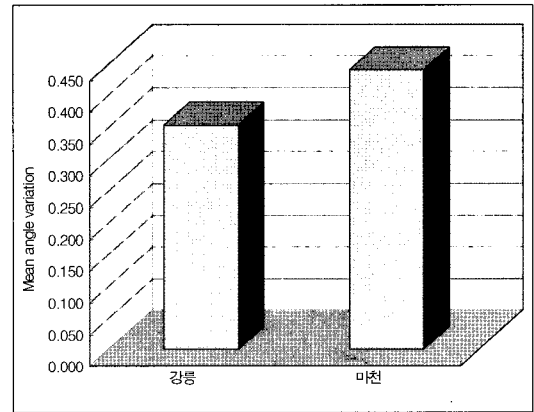
산사태 현장조사 및 토질시험 결과와 사태물질 이동거리 측정결과를 비교해 보면 다음과 같이 요약해 볼 수 있다. 사태물질의 확산범위는 전술한 바와 같이 무엇보다도 강우강도 또는 강우량과 관련 있다. 즉, 동일한 지질 및 지형특성 하에서도 강우조건에 따라 사태물질의 점성이 달라지므로 사태물질의 확산범위가 달라진다. 그러나, 현실적으로 국내에서 산사태 발생지점별로 강우량을 측정할 수 있을 만큼 강우 측정지점의 밀도가 높지 않다. 그러므로, 이 연구에서는 강우량 요인은 일단 제외하고 지질특성에 따른 사태물질 확산범위를 고려한다.

산사태 발생지역의 지형과 지층 구성물질의 특성에 차이가 큰 강릉지역과 마천지역을 비교할 때, 경사변화도의 경우 마천지역이 강릉지역보다 경사변화도가 더 크게 나타난다(Fig. 18). 즉, 사면의 길이와 경사변화의 관계에서 경사변화도가 더 큰 사면에서 사태물질의 확산범위가 더 길게 나타난다. 그 이유는 경사변화가 많을 경우 사태물질의 확산속도와 에너지가 변화하기 때문에 일정한 경사를 따라 사태물질이 흘러 내리는 것보다 더 큰 확산범위를 나타낼 수 있다(Suwa, 1993).

일반적으로 토석류의 이동 및 퇴적은 입자크기와 관련 있는 것으로 알려져 있다. 이를 감안하여 지역별 입자크기와 확산범위를 파악해 보면 Fig. 19와 같이 실내시험에 의한 입자크기는 약간의 차이만을 가질 뿐



(a)



(b)

Fig. 18. (a) Distribution of angle variation of slope at Macheon (box) and Gangneung (circle). (b) Mean angle variation of slope at the two areas.

이다. 강릉지역의 사태물질은 대부분 등립의 모래질로 구성되어 있는 반면, 마천지역의 경우는 입자크기의 분포범위가 넓고 강릉지역보다는 자갈과 실트/점토 비율이 높게 구성되어 있다. 그러나 마천지역의 경우 현장에는 실내시험을 위한 시료채취가 불가능한 거력 및 자갈이 산사태 체적의 약 20~30%정도를 차지하므로, 실제 두지역의 입자크기 분포양상은 더 큰 차이를 가진다. 전술한 바와 같이 입자크기의 분포가 다양한 경우 상대적으로 등립질의 물질로 구성된 경우보다 사태물질의 거동이 더 불규칙적으로 일어나고, 이에 따라 사태물질 이동에너지의 변화가 심해져 확

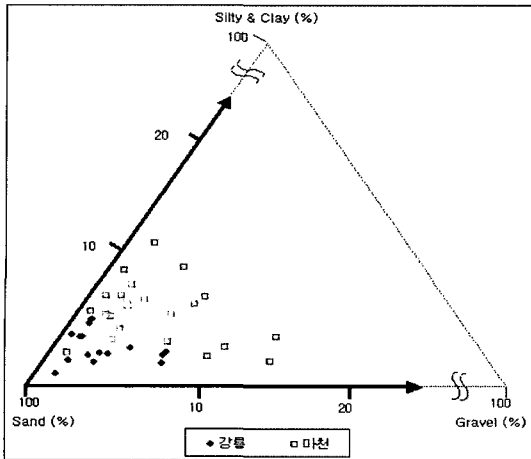


Fig. 19. Grain size distribution of debris at Gangneung and Macheon area.

산범위가 더 커지거나 불규칙적인 양상을 보이게 된다(諏訪 외, 1990; Major, 1997). 이러한 점을 고려하면, 강릉지역과 마천지역의 사태물질 확산범위 차이가 입자 크기 및 분포특성에도 기인함을 알 수 있다.

풍화심도의 수평적 분포상태는 산사태의 규모를 결정하는 주요 요소이다. 연구지역 중 강릉 및 거창지역은 지질 및 풍화특성상 유사한 지역으로 분류할 수 있다. 이들 지역의 구성 암석은 중립질 화강암으로 대부분 심도 1m 내외의 비교적 일정한 수평적 풍화심도를 형성하고 있다. 따라서 이들 지역에서는 모두 심도 1m 미만의 산사태가 발생되었고 사태물질도 대부분 모래입자 크기로 균등하게 구성되어 있다. 단, 강릉의 경우 산불의 영향으로 매우 약화된 지표부분만이 파괴되어 산사태물질이 거의 100%가 모래입도 이하의 물질로 구성되었고, 거창지역은 기반암 상부의 완전 풍화암이 부분적으로 파괴되어 부분적으로 암편들이 포함된 점이 다를 뿐이다.

반면, 마천지역의 경우 산사태가 집중된 반려암 분포지역에 차별풍화의 산물인 핵석이 잘 발달하고 있음이 관찰되는데, 이런 현상 때문에 풍화심도가 매우 불규칙하고 최대 10m 정도의 깊은 풍화심도를 보이는 원인으로 판단된다. 사태물질도 자갈과 거력을 다량 포함하고 세립질 물질도 모래보다 작은 점토 및 실트질 입자들로 구성되어 있어 전술한 두 지역과는 확연한 차이를 보인다.

사태물질의 규모는 지질특성에 의해 결정되는 것으

로 해석된다. 지질특성이 유사한 강릉과 거창의 경우 평균 산사태 규모가 각각  $60\text{m}^3$ 와  $493\text{m}^3$ 인데 반하여 마천은  $1,500\text{m}^3$ 이다. 이 값을 토대로 각 지역의 사면의 길이를 감안한다 하더라도 개별 산사태를 비교할 때 마천은 강릉과 거창에 비하여 4~5배 규모로 거대함을 알 수 있다. 이는 산사태의 규모는 기반암의 풍화특성에 의하여 좌우됨을 시사하는 것으로 기반암의 풍화특성을 규명하면 산사태 규모를 추정할 수 있다.

## 결론

토석류 산사태로 인한 사태물질의 이동거리 예측을 위해 강원도 강릉, 경남 거창 및 마천지역에서 26개의 산사태를 선정하였다. 산사태 발생지점의 지질과 지형조사를 통하여 암석의 종류, 풍화 및 지형특성 등을 분석하였고 사태물질의 입도분포에 따른 이동과 지형특성과의 관계를 추적하였다. 지형특성 중 사면의 경사변화는 사태물질 이동거리에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 이는 경사 변화가 많을 경우 사태물질의 확산속도와 에너지가 변화하기 때문에 일정한 경사를 따라 사태물질이 흘러내리는 것보다 더 큰 이동거리를 보이는 것으로 해석하였다.

사태물질의 이동거리는 사태물질의 규모와 입도에 큰 영향을 받는 것으로 파악되었다. 특히 사태물질 규모는 지질특성에 확연히 구별되는데, 사태물질 이동거리가 길게 나타난 반려암 지역의 경우 화강암 지역에 비해 4~5배 크다. 이는 사태물질의 입도와도 연관이 있는 것으로서, 중립질의 화강암이 분포하는 지역보다 대규모 핵석이 발달하고 풍화심도가 불규칙적인 반려암 지역이 사태물질 규모 및 이동거리가 훨씬 크게 나타난다.

## 참고문헌

- 김원영, 채병곤, 조용찬, 김경수, 이춘오, 송영석, 2004, 산사태 위험도 산정시스템 및 피해저감기술개발, 국무총리, KR-04(연차)-13-3.
- 서용석, 채병곤, 김원영, 송영석, 2005, 인공신경망을 이용한 사태물질 이동거리 산정, 지질공학, 제15권, 제2호, 145-154.
- Hutchinson, J., 1988, Morphological and geotechnical

- parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology, *Landslide Proc. 5th. Int. Symp. on Landslides*, 1, 3-35.
- Johnson, A. and Rodine, J., 1984, Debris flows. In *Slope Instability* (Eds D. Brunsten and D. Prior), 257-361.
- Johnson, A. M. & Rahn, P., 1970, Mobilization of debris flows, *Z. Geomorphology N.F, Suppl.-Bd*, 9, 168-186.
- Major, J. J., 1997, Depositional processes in large-scale debris flow experiments, *The Jour. of Geology*, 105, 345-366.
- Rapp, A., 1986, Slope processes in high latitude mountains, *Progress in Physical Geol.*, 10, 53-67.
- Suwa, H., Okunishi, K., Sakai, M., 1993, Motion, debris size and scale of debris flows in a valley on Mount Yakeda, Japan, in *Sediment Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control*, 239-248.
- 千木良雅弘, 1997, 風化と崩壊, 近未来社, 名古屋, 49-87.
- 諏訪 浩, 澤田豊明, 新井宗之, 高橋 保, 水山高久, 1997, 粘性土石流の發生, 流動, 堆積のメカニズムと対策, 京都大學防災研究所年報, 第40号, IDNDR特別号, 159-166.
- 諏訪 浩, 奥西 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(B-1), 191-212.
- 김원영  
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3345  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: kwy@kigam.re.kr
- 이춘오  
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3131  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: lco@kigam.re.kr
- 김경수  
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3054  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: kks@kigam.re.kr
- 조용찬  
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3059  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: choych@kigam.re.kr
- 송영석  
한국지질자원연구원 지질환경재해연구부  
305-350, 대전시 유성구 가정동 30  
Tel: 042-868-3035  
Fax: 042-861-9723  
E-mail: yssong@kigam.re.kr

투 고 일	2005년 2월 14일
심 사 일	2005년 2월 15일
심사완료일	2005년 6월 13일

---

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