

산사태지역 토층의 미세조직과 지화학적 특성의 중요성

김경수¹⁾ · 추창오^{*2)} · 부성안³⁾ · 정교철⁴⁾

¹⁾한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

²⁾경북대학교 지질학과

³⁾농업기반공사 농어촌연구원

⁴⁾안동대학교 지구환경과학과

Importance of Microtextural and Geochemical Characterizations of Soils on Landslide Sites

Kyeong-Su Kim¹⁾ · Chang-Oh Choo^{*2)} · Seong-An Booh³⁾ · Gyo-Cheol Jeong⁴⁾

¹⁾Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²⁾Dept. of Geology, Kyungpook National University

³⁾Groundwater research lab., Rural Research Institute, KARICO

⁴⁾Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

본 연구의 목적은 산사태가 발생된 편마암, 화강암 및 퇴적암지역 자연사면의 토층을 대상으로 이들의 미세조직, 입도분포, 광물조성 및 지화학분석을 실시하여, 산사태 발생에 영향을 줄 수 있는 토층물질의 특성을 고찰하는데 있다. 이를 위하여 편마암류인 장흥지역, 화강암류인 상주지역, 제3기 퇴적암류인 포항지역의 산사태현장 및 그와 대비되는 곳의 토층으로부터 채취한 흙을 대상으로 레이저입도분석, X-선회절분석(XRD), 주사전자현미경(SE-SEM) 및 에너지분산스펙트럼(EDS)을 이용하여 분석하였다.

편마암류와 화강암류지역은 산사태발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 점토광물의 함량이 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 양상은 화강암지역에서 특히 두드러지는 경향성을 보였다. 따라서 편마암류와 화강암류지역은 점토광물의 함유비율이 산사태에 유의한 영향인자로 간주될 수 있다. 점토광물로는 일라이트(illite)가 가장 풍부하고 녹니석과 카올리나이트(kaolinite) 순으로 구성비가 높고, 몬토릴로나이트(montmorillonite)도 부분적으로 함유된다. 제3기 퇴적암지역은 편마암류와 화강암류지역에 비해서 점토광물의 함량이 전반적으로 높고 팽창성 점토광물인 몬토릴로나이트의 함유비율이 특히 높다. 따라서 이들이 집중호우시 토층의 지지력에 크게 영향을 미침으로써 상대적으로 적은 강우조건에서도 다른 지역보다 산사태가 더 쉽게 발생된다. 그리고 산사태발생지역과 미발생지역간 광물조성의 차별성이 특징적으로 관찰되지 않아 산사태가 광물조성의 차이에 큰 영향을 받기보다는 국지적인 지형조건이나 흙의 공학적 특성 등에 주로 지배를 받을 것으로 예측된다. 자연사면의 산사태를 연구할 때 기존의 토질 및 지질공학적 특성평가 외에도 토층의 풍화특성과 구성광물의 종류, 점토광물의 함량, 흙입자의 미세조직과 같은 다양한 지화학적 정보가 추가된다면 산사태 발생원인을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 산사태, 흙, 미세조직, 입도분포, 점토광물, 지화학적 정보

The purposes of this study are to evaluate and discuss the importance of geochemical properties of soil materials

* Corresponding author: chooco@knu.ac.kr

that play an important role in the occurrence of the landslide, using analyses of microtexture, particle size distribution, XRD, and FE-SEM equipped with energy dispersive spectrum on soils collected from landslide slopes of gneiss, granite and sedimentary rock areas. Soils from gneiss and granite areas where landslides took place have much clay content relative to those from non landslide areas, particularly pronounced in the granite area. Therefore the clay content is considered a sensitive factor on landslide. Clay minerals contained in soils are illite, chlorite, kaolinite and montmorillonite. Especially the content of clay minerals in soils from the Tertiary sedimentary rocks is highest, with abundant montmorillonite as expandable species. It is believed that this area was much vulnerable to landslide comparable to other areas because of its high content of montmorillonite, even though there might be weak precipitation. Since no conspicuous differentiation in mineralogy between the landslide area and non landslide area can be made, the occurrence of landslide may be influenced not by mineralogy, but by local geography and mechanical properties of soils. Geochemical information on weathering properties, mineralogy, and microtexture of soils is helpful to better understand the causes and patterns of landslide, together with engineering geological analyses.

Key words : landslide, soils, microtexture, particle size distribution, clay mineral, geochemical information

서 론

자연사면의 산사태에서 지형조건, 사면의 기하학적 형태, 집중호우의 양상 등이 기본적인 평가요소이지만 그에 못지않게 토층의 분포상태도 산사태 발생가능성 및 규모와 밀접하게 관련된다. 특히, 사면의 경사는 수직 방향 뿐만 아니라 수평적으로도 물 흐름의 방향을 변화시키기 때문에 토층물질을 수용액이나 부유물의 상태로 고지대로부터 저지대로 운반시키는데 중요한 역할을 하며, 결과적으로 사면의 상부에서는 토층이 결핍되고 그 하부에서 보다 더 풍부해진다. 이와 같은 작용을 통하여 점토물질은 토층단면의 상부층에서부터 중간층으로 점차 이동하게 된다. 그러므로 풍화작용과 변질과정에 의해 형성된 점토는 산사태에 의한 사면활동(mass movement)이 아니더라도 흩으로 변화되는 과정에서 일정한 장소에 머물러 있지 않고 수백미터에 달하는 먼 거리까지를 이동하게 된다. 그동안 산사태에 관한 연구는 주로 사면의 안정성, 지질과 지형분석, 또는 사태물질의 지질 공학적 특성분석에 의하여 수행되어져 왔다(이사오 외, 1997; 김원영 외, 1998; 김경수 외, 2000; 김경수 외, 2004; 심태섭 외, 2004; 채병곤 외, 2004; 김경수 외, 2005a, 2005b; 채병곤 외, 2005).

토층의 심도와 구성물질은 산사태발생의 취약성 뿐만 아니라 산사태발생시 사태물질의 이동에 영향을 미치게 되며, 특히 점토질의 함량과 광물특성이 산사태규모를 결정하게 된다. 즉, 토층을 이루는 광물의 종류와 구성비, 흩의 미세조직, 점토광물의 종류와 함량, 지화학적 특성이 중요하다. 점토광물들은 그 구조가 판상이고 팽활성과 함수율이 높을 뿐 아니라, 토층의 투수율에 대

한 영향이 크므로 산사태발생 초기에 매우 중요한 역할을 하게 된다. 특히 팽윤성 점토광물인 스멕타이트, 버미큘라이트, 할로이사이트, 녹니석, 카올리나이트/버미큘라이트, 일라이트-스멕타이트와 같은 혼합층상 광물의 존재여부와 함량비는 다른 광물에 비하여 그 기여도가 훨씬 크다.

본 연구의 목적은 산사태발생지역인 편마암, 화강암 및 퇴적암지역의 토층을 대상으로 이들의 미세조직, 입도분포, 광물조성 및 화학분석을 실시하여 산사태발생에 영향을 미칠 수 있는 토층물질의 특성을 고찰하는데 있다.

시험방법

입도측정(particle size analysis)

본 연구에서는 토층의 쇄설성 입자를 포함한 원래상태의 흩입자를 대상으로 레이저입도측정기를 이용하여 미세립질의 입자를 측정하였다. 레이저입도측정기는 입자의 크기에 따라 레이저빔의 산란각을 측정함으로써 0.02~2000 μm 범위의 입자를 연속적으로 측정할 수 있다. 이는 체분석에서 사용되는 중량비와는 달리 체적비를 계산함으로써 세립질인 경우 입자의 실제크기와 입도분포를 매우 정밀하게 측정할 수 있다. 본 시험에서는 영국 Malvern사의 Mastersizer 2000을 이용하여 적당량의 흩시료를 1,000ml 비이커의 물에 충분히 분산시킨 상태에서 측정하였다. 토층시료는 채취당시나 처리과정 중에 쉽게 건조되므로 입자가 서로 엉겨 붙거나 측정작업시 수중에서 자연적으로 응집되는 현상을 방지하기 위하여

초음파를 10분동안 가한 상태에서 부유물의 입도분포를 측정하였다. 또한, 총 5회에 걸쳐 동일한 시료를 측정함으로써 입도분포의 오차를 최대한 줄였다. 본 연구에서는 입도분석의 일관성을 유지하기 위하여 최종단계 측정치인 5회차의 자료를 사용하였다.

X-선회절분석(XRD)

건조한 풍화토시료에 대하여 X-선회절분석을 실시하였다. 토층의 전체시료(bulk sample)의 경우 상온에서 건조시켜 비방향성시료(randomly oriented sample)를 제작하였다. X-선분말회절법은 지난 수십년간 광물 및 기타 결정질물질의 감정이나 특성연구에 가장 중요한 도구로 이용되어져 왔다. 그러나 정밀한 결정구조 연구에는 사용되지 못하였는데, 이는 회절선의 중첩현상과 정확한 회절강도를 구하기가 어려웠기 때문이다. 최근에 컴퓨터로 조정되는 자동화회절기는 스텝-스캔(step-scan)방식으로 X-선회절강도를 수치화 할 수 있게 되었으며, 리트벨트법(rietveld refinement method)이 도입됨으로써 회절선의 중첩현상을 피할 수 있게 되어 통상의 X-선분말법(X-ray powder diffraction method)으로도 구조해석과 상세한 결정학적 연구가 가능하게 되었다.

본 연구에서의 X-선회절분석은 한국지질자원연구원의 고분해능 X-선회절기(high resolution X-ray diffractometer)인 Philips X'pert MPD 기종을 사용하였다. 시료의 전처리과정에서 발생할 수 있는 편향성(preferred orientation) 효과를 최소로 하기 위해 X-선 주사시에 시료홀더를 분당 60회의 속도로 회전시켜 재현성을 향상시키고, 조사분포의 오차를 최소화하여 시료의 방향성에 따른 회절강도가 균일하게 되도록 하였다. X-선회절은 40kV, 25mA 조건에서 흑연 모노크로메타에 의한 $\text{CuK}\alpha$ 단일파장($\lambda 1=1.54056\text{\AA}$, $\lambda 2=1.54443$, $\lambda 1:\lambda 2=2:1$)을 사용하여 스텝-스캔방식으로 회절값을 기록하였다. 주사간격은 $0.05(2\theta)$ 이고, $3-65(2\theta)$ 구간에서 총 6,200개의 회절자료 포인트를 얻었다.

분석이 완료된 X-선회절결과는 SIROQUANT software를 이용하여 토층에 함유되어 있는 각 광물의 함량을 정량분석하였다. 이는 리트벨트법을 적용시켜 각 회절도형을 계산함으로써 여러 광물들의 결정학적 정보뿐만 아니라 함량을 정량적으로 계산할 수 있다.

주사전자현미경(SEM) 및 에너지분산스펙트럼 분석(EDS)

주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)과 에너지분산스펙트럼(energy dispersive spectrum, EDS)을 이용하여 토층시료에 대한 구성광물의 형태, 입도 및 조직을 관찰하고 지화학성분을 분석하였다. 토층시료는 습기가 높은 상태이므로 전자현미경 분석이 용이하도록 먼저 상온에서 충분히 건조시킨 100메쉬(mesh) 이하의 시료를 이용하였다. 토층시료의 경우 높은 함량의 점토질로 구성되어 있어 해상도의 저하를 가져오기 쉬운데, 이를 해소하기 위해 한국기초과학지원연구원 전자현미경실에서 진공상태로 흡입자의 표면을 백금(platinum)으로 코팅하여 시편을 제작하였다.

본 연구에서는 기존의 SEM에 비하여 해상도가 탁월한 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, HITACHI model S-4200)을 사용하였다. 관찰시의 가속전압과 전류는 각각 20kV, 10nA 조건이었고 배율은 최대 15,000배까지 확대하였으며, 주로 100~5,000배율의 범위에서 조직 및 특성을 관찰하였다. 본 기종 외에 JEOL JSM-6300과 이에 장착된 에너지분산스펙트럼을 이용하여 토층의 지화학성분을 분석하였다.

토층의 입도특성

본 연구에서는 흡입자의 조직, 구성, 광물학적 및 지화학적 특성 등을 세밀하게 관찰하기 위해 토층시료에 대한 입도분석을 실시하였다. 분석시료들은 편마암류 분포지인 장흥지역 10개(산사태발생지역과 미발생지역 각 5개), 화강암류 분포지인 상주지역 15개(산사태발생지역 10개 및 미발생지역 5개) 및 제3기퇴적암류 분포지인 포항지역 10개(산사태발생지역과 미발생지역 각 5개)로서 총 35개이다. Fig. 1은 분석시기에 따른 입도분포의 변동을 제시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료특성에 따라서 약간의 차이는 있지만, 전반적으로는 거의 정규분포이거나 약간 더 세립자쪽으로 분포곡선이 미약하게 이동됨을 알 수 있다. 이는 측정회수가 증가됨에 따라 초음파에 노출된 시간이 길어져 흡입자가 더 분리되기 때문이다. 그러나 그 정도는 매우 미약하여 시료의 전반에 걸쳐 변이가 크게 나타나지 않았기 때문에 입도측정이 비교적 정확하다고 볼 수 있다. 또한, Table 1은 레이저분석기를 이용한 흡입자의 입도분포 측정자료를 정리한 것이다.

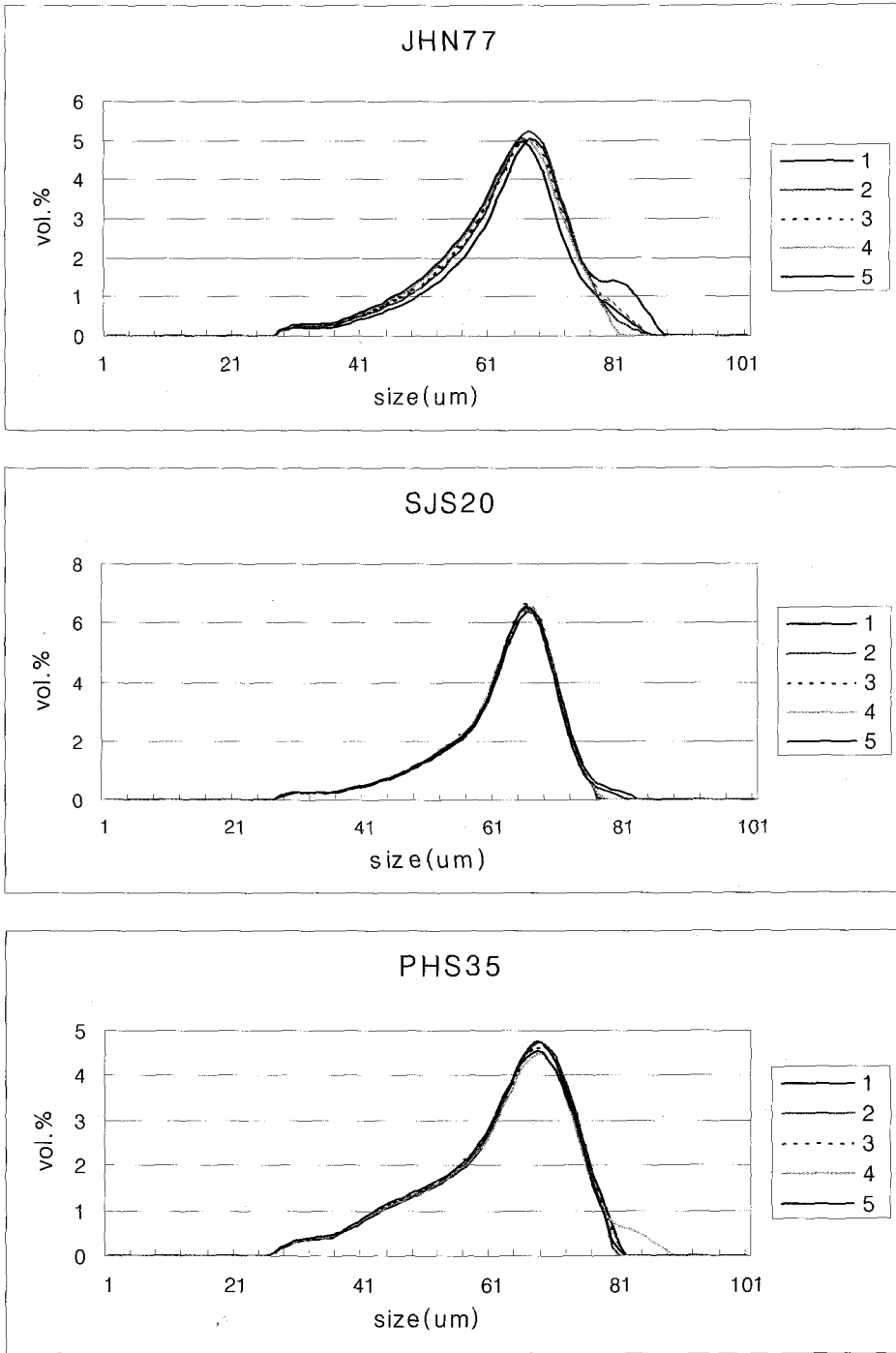


Fig. 1. Particle size distribution of soils. JHN, Jangheung area; SJS, Sangju area; PHS, Pohang area, respectively.

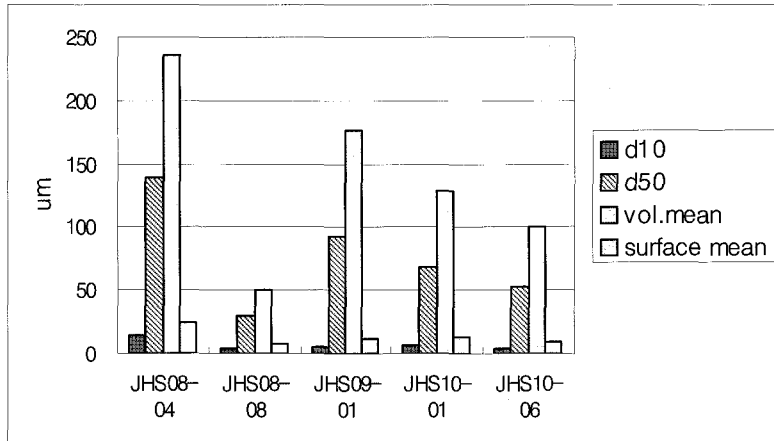
Table 1. Particle size distribution of bulk soils measured by the laser size analyzer. JH, Jangheung area; SJ, Sangju area; PH, Pohang area.

samples	d10 (μm)	d50 (μm)	d90 (μm)	vol.weighted mean(μm)	surface weighted mean(μm)	specific surface area(m^2/g)
JHS08-04	13.664	139.725	615.798	236.081	24.365	0.246
JHS08-08	3.246	29.290	126.636	50.391	7.711	0.778
JHS09-01	4.718	93.144	468.377	176.257	11.336	0.529
JHS10-01	6.370	67.746	355.103	128.814	13.190	0.455
JHS10-06	3.761	52.846	274.372	100.739	9.064	0.662
JHN72	7.124	54.323	244.858	103.173	13.255	0.453
JHN73	5.539	57.033	244.668	104.592	11.056	0.543
JHN74	3.933	26.401	79.398	37.690	8.215	0.730
JHN76	7.618	125.508	956.724	326.175	15.905	0.377
JHN77	6.467	59.245	234.012	102.228	12.722	0.472
SJS02	2.630	20.329	101.249	40.937	6.510	0.922
SJS05	2.103	16.785	91.694	35.049	5.463	1.100
SJS10	2.056	17.914	108.861	41.206	5.436	1.100
SJS16	2.807	24.999	138.596	52.916	7.068	0.849
SJS20	8.027	63.131	166.398	80.025	14.385	0.417
SJN33	8.752	69.583	223.172	101.010	15.531	0.386
SJN40	8.364	60.705	237.752	98.976	14.926	0.402
SJN52	13.509	84.258	227.424	106.997	19.804	0.303
SJN55	5.326	50.420	168.087	72.961	10.410	0.576
SJN56	5.538	52.025	169.454	73.862	11.281	0.532
PHS15	1.855	20.443	157.242	87.688	5.388	1.110
PHS28	1.184	10.108	186.244	54.221	3.551	1.690
PHS31	6.918	88.160	367.109	147.760	14.336	0.419
PHS33	3.525	57.661	301.312	112.930	8.974	0.669
PHS35	4.577	66.765	254.256	102.372	10.578	0.567
PHN01	1.993	19.246	120.523	48.593	5.487	1.090
PHN08	2.651	32.121	182.744	71.481	6.932	0.866
PHN09	1.049	43.978	324.034	111.584	3.729	1.610
PHN18	3.694	62.812	211.614	88.525	8.952	0.670
PHN23	5.040	69.823	222.148	97.386	10.640	0.564

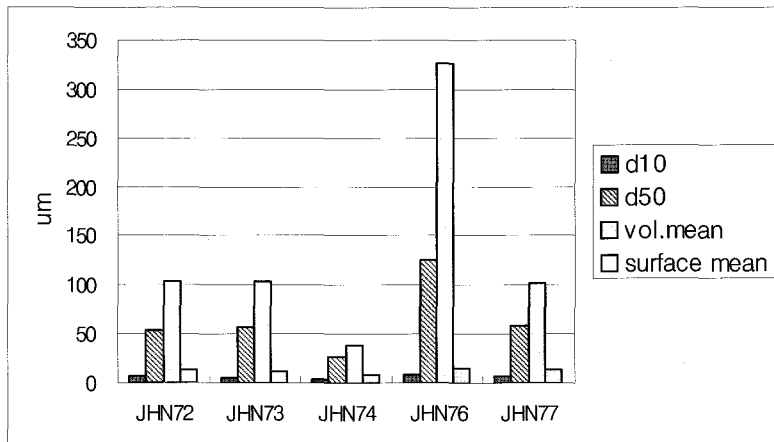
편마암류지역

장흥지역의 지질은 광역적으로 볼 때, 흑운모편마암과 일부 석영편암 및 화강암 등 3종으로 대별되는데, 본 연구에서는 이 중 흑운모편마암과 석영편암 등 편마암류만을 대상지역으로 국한하였다. 이들 편마암류는 광물학적으로 구성성분이 다르기 때문에 지역에 따라 암상의 차이가 있다. Fig. 2는 편마암류지역의 흙시료에 대한 입도분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 세립질 10%구간의 경우 3.3~13.7 μm , 중간 50%구간은 26.4~139.7 μm , 그리고 조립질 10%구간은 79.4~815.8 μm 의 범위를 보인다. 조립질의 시료일수록 세립질, 중립질 및 조립질구간의 입자도 마찬가지로 타 시료에 비해

크게 나타나는데, 이는 풍화에 의한 흙으로의 변화작용이 비교적 일관성을 보이는 것으로 볼 수 있다. 즉, 기반암이 풍화작용에 의해 극단적으로 세립질과 조립질로만 양분되지 않고 아주 서서히 흙으로 변화되어 가고 있음을 의미한다. 한편, 비표면적은 0.246~0.778 m^2/g 로 다양한 범위를 보였는데, 이 중 가장 세립질에 속하는 JHS08-08 및 JHN74에서 세립질 10%와 중간 50%구간이 0.73~0.78 m^2/g 로서 가장 높게 나타났고, 가장 조립질에 해당되는 JHS08-04에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 따라서 지화학적으로 볼 때, 세립질인 JHS08-08과 JHN74에서 물-암석반응이 가장 빠르게 진행되고 조립질인 JHS08-04에서는 이차광물의 형성이 상대적으로 느리게 진행될 것으로 판단된다.



(a)



(b)

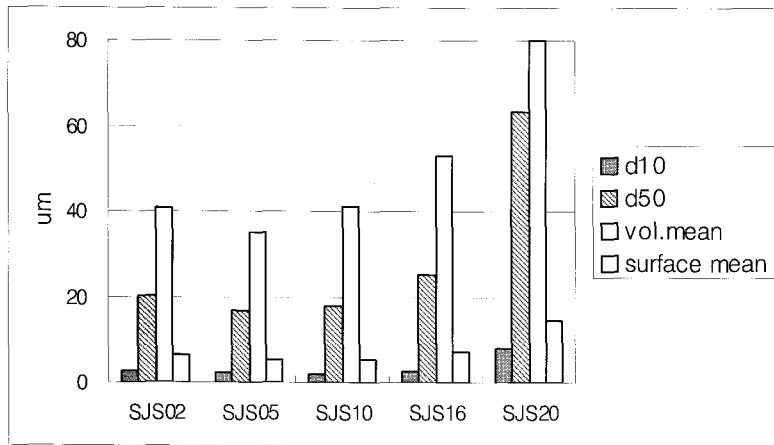
Fig. 2. Size distribution histograms of soils sampled from gneiss area. (a), Landslide sites. (b), Non slide sites.

화강암류지역

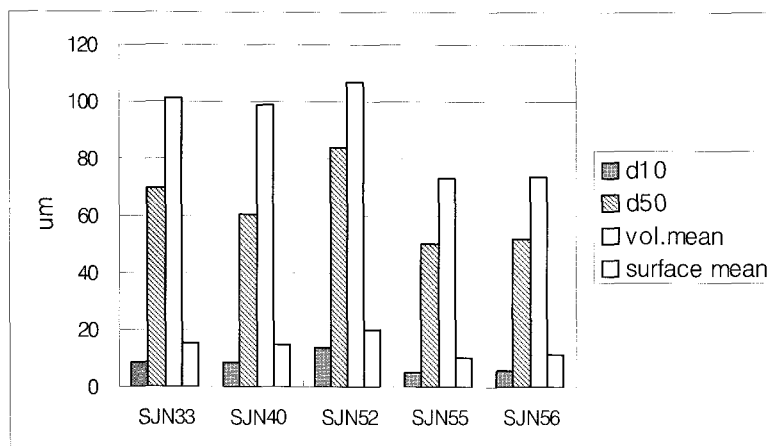
상주지역의 지질은 광역적으로 볼 때, 화강암이 넓게 분포하고 있으며 일부 변성암류와 퇴적암류가 분포하고 있으나 대상지역을 화강암지역으로 국한하였다. 상주 지역의 화강암류는 주라기의 보은화강암 및 흑운모각섬석화강암 등으로 광물학적 성분비와 입도조성이 다양하게 나타난다. 이 지역의 고지대는 석영반암이 분포하는데, 이들은 조성광물이 대체로 풍화에 강하여 주로 암반으로 존재하기 때문에 산사태가 거의 발생하지 않은 반면, 대체로 낮은 지형조건과 노두가 덜 분포된 화강암지

역에서 산사태가 많이 발생되었다.

Fig. 3은 화강암류지역의 흙시료에 대한 입도분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태가 발생된 지역의 흙시료는 세립질 10%구간의 경우 2.1~8.0 μm , 중간 50%구간이 16.8~63.1 μm 및 조립질 10%구간은 71.7~166.4 μm 의 범위를 나타낸다. 비표면적은 0.417~1.10 m^2/g 로서 다양한 범위를 보였는데, 타 흙시료에 비해서 상대적으로 입자가 매우 크고 비표면적이 작은 SJS20 흙시료 한개를 제외하면 그 범위는 더욱 좁아진다. 즉, SJS20을 제외할 경우는 세립질 10%구간의 경우 2.1~2.6 μm , 중간 50%구간이 16.8~25.0 μm 및 조립질 10%구간은 71.7~138.6 μm 이고, 비표면적은



(a)



(b)

Fig. 3. Size distribution histograms of soils sampled from granite area. (a), Landslide sites. (b), Non slide sites.

0.849~1.10 $\mu\text{m}^2/\text{g}$ 로서 매우 크다. 한편, 미발생지역의 흙시료에서 세립질 10%구간의 경우 5.3~13.6 μm , 중간 50%구간 50.4~84.3 μm 및 조립질 10%구간은 168.1~237.8 μm 의 범위로서 산사태발생지역의 흙보다 더 조립질로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 이들의 비표면적은 0.303~0.576 m^2/g 의 범위이다. 이러한 결과로부터 산사태발생지역과 미발생지역간 흙시료의 입도 특성을 비교해 볼 때, 산사태지역은 흙입자가 더 세립질이고 비표면적이 상당히 큰 양상을 보였으며, 특히 SJS02, SJS05 및 SJS10의 흙시료가 더 세립질인 것으로 나타났다. 본 연구지역 중에서 화강암류지역의 산사태발생지역 토층시료의 입도가 가장 세립질이고 비표

면적이 가장 큰 특징을 나타내는 것으로 볼 때, 이들 흙시료의 입도분포와 공학적 특성들은 상관성이 있는 것으로 생각된다.

제3기퇴적암류지역

포항지역의 지질은 이암이나 셰일 등 주로 제3기퇴적암류로서 암상은 광물학적인 구성성분과 입도조성이 다소 다르게 나타난다. 그리고 이 지역의 토층은 풍화에 취약할 뿐만 아니라 잘 발달된 층리로 인해 수분이 유입되면 잘게 부서짐으로써 산사태에 취약할 수 있다.

Fig. 4는 제3기퇴적암류지역의 흙시료에 대한 입도

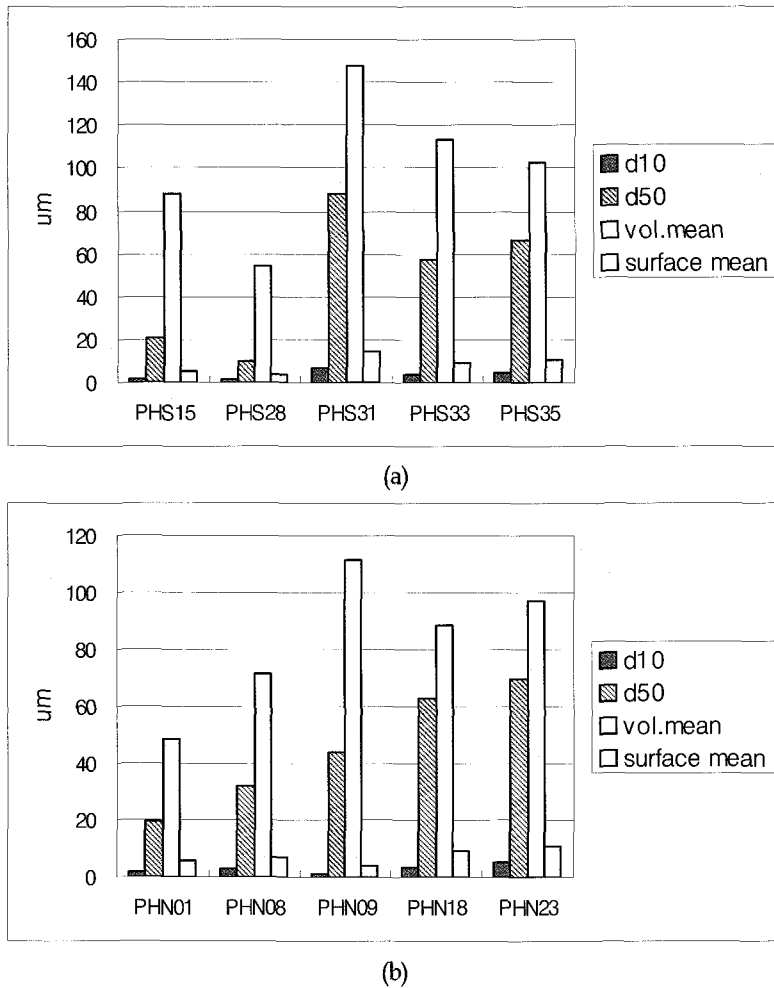


Fig. 4. Size distribution histograms of soils sampled from Tertiary sediments area. (a), Landslide sites. (b), Non slide sites.

분석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 산사태발생지역과 미발생지역간 뚜렷한 입도차이는 관찰되지 않는데, 전반적으로 입도분포의 범위가 넓고 비표면적 또한 큰 것이 특징적이다. 산사태발생지역의 흙시료는 세립질 10%구간의 경우 1.2~6.9 μm , 중간 50% 구간이 10.1~88.2 μm 및 조립질 10%구간은 157.2~367.1 μm 이고, 이들의 비표면적은 0.419~1.690 m^2/g 의 범위를 보였다. 한편, 미발생지역은 세립질 10%구간의 경우 1.0~5.0 μm , 중간 50%구간이 19.2~69.8 μm 이고 조립질 10%구간은 120.5~324.0 μm 범위이고, 이들의 비표면적은 0.564~1.610 m^2/g 의 범위인 것으로 나타났다. 한편, 산사태 발생지역의 흙시료가 미발생지역에 비해 전반적으로 더 조립질인 경향성을 보였으며, 비표면적은 세립질의 함량이 높고 체적가중치에 의한 평균치가 작을 수록 크다. 시료별로는 분포범위가 다소 크게 나타나 PHS28의 경우는 전체 시료 중에서 d50% 이하의 입자의 크기가 10 μm 로서 세립질의 함량과 비표면적이 가장 큰 반면, 표면가중치에 의한 크기는 3.55 μm 로서 가장 작다. 이러한 현상은 무엇보다 지질의 성인과 관련된 결과로 생각된다.

토층의 구성광물과 함량분석

편마암류지역

편마암류지역의 흙시료에 대해 XRD를 실시하여 구성광물들을 정량분석한 결과는 Table 2에서 보는 바와 같다. 산사태발생지역은 미발생지역에 비해서 점토광물의 함량이 전반적으로 높은 것으로 나타났다. JHN73의 경우 석영과 장석의 함량이 높고 흑운모가 11wt.%인 것은 이 흙이 심하게 풍화되지 않았음을 보여주는 결과이다. 즉, 함철광물인 흑운모는 풍화작용시 쉽게 분해되어 녹니석이나 버미클라이트로 변질되는데, 여전히 흑운모가 존재한다는 것은 풍화초기 단계이거나 풍화작용이 매우 미약한 환경임을 지시하는 결과이다. 그리고 모든 시료에서 점토광물인 일라이트가 가장 풍부하고 녹니석과 카올리나이트가 그 다음의 순으로 함유비율이 높은 것으로 나타났다.

화강암류지역

화강암류지역의 흙시료에 대해 XRD를 실시하여 구성광물들을 정량분석한 결과는 Table 3에서 보는 바와 같다. 일부 시료에서는 석영, 장석 및 점토광물의 함량만을 뿐 광물조성에는 큰 변화가 없는 경우도 있다. 이는

Table 2. Quantitative XRD analysis of mineral constituents in soils sampled from gneiss area.

Minerals	Landslides (%)				Non slides (%)	
	JHS08-04	JHS08-08	JHS10-01	JHS10-06	JHN73	JHN76
Quartz	50.7	52.3	54.7	55	57.5	47.9
Albite	9.1	5.2	10.5		1.2	19
Biotite					11.4	
Chlorite	8	12	10.8	2.7	8.1	1.4
Kaolinite	7.7	3.3		21.5	0.6	10.3
Illite	16	14.5	19.7	14.4	12.7	19.1
Smectite						
Vermiculite						
Orthoclase			4.2	4.6	8.5	2.3
Hematite				1.8		
Hornblende						
Microcline	8.4	12.7				
Clay content	31.7	29.8	30.5	38.6	21.4	30.8

Table 3. Quantitative XRD analysis of mineral constituents in soils sampled from granite area.

Minerals	Landslides (%)					Non slides (%)			
	SJN02	SJS05	SJS10	SJS16	SJS20	SJN33	SJN52	SJN55	SJN56
Quartz	49.5	59.2	46.2	55.8	26.6	23.4	68.4	55.9	47.7
Albite	17.1	9.1	12.2	9.9	24.5	14.9	10.4	16.3	24.4
Biotite									2.4
Chlorite	4.6	7.1	21.9	11.2	9.2		6.2	11.1	3
Kaolinite	6.7	3.7	6.9	4	9.5	5.4	2.6		4.6
Illite	8.9	12.9	11	10.9	15.6	6.8	8.6	4.2	
Smectite									
Vermiculite						25.5			
Orthoclase						11	2.2	10.3	17.1
Hematite							1.6	1.4	0.8
Hornblende						13		0.8	
Microcline	13.2	8.1	1.8	8.2	14.6				
Clay content	20.2	23.7	39.8	26.1	34.3	37.7	17.4	15.3	7.6

기반암의 특성이 비슷하기 때문에 토층에서 특별히 다른 광물이 형성되지 않았으며, 단지 풍화단계나 생성환경의 차이이거나 기본적인 광물조합이 비슷하기 때문이다. 그리고 화강암류지역에서는 점토광물의 함량으로써 산사태발생지역과 미발생지역이 확연히 구분되어진다. 그 예로서 SJN33의 경우 버미큘라이트 함량이 높고, 일라이트나 카올리나이트와 같은 점토광물의 총 함량이 높아 실제로는 함수율이 상당히 높은 점토질로 형성되어 있다고 볼 수 있다. 그러나 풍화에 비교적 취약한 각섬석이 13% 정도 함유된 것으로 보아 풍화작용이 상당한 단계에는 도달되지는 않은 것으로 판단된다.

제3기퇴적암류지역

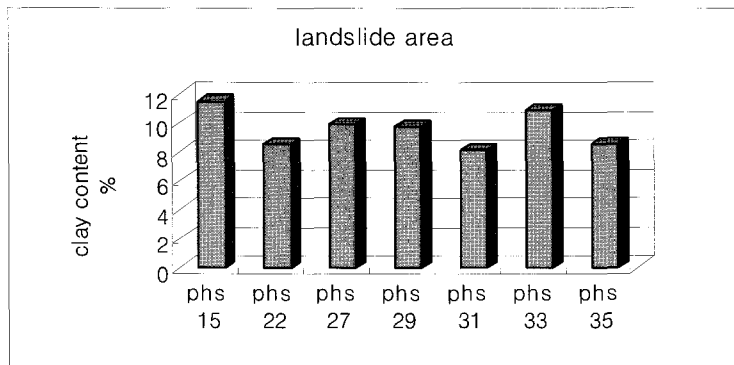
제3기퇴적암류지역의 흙시료에 대해 XRD를 실시하여 구성광물들을 정량분석한 결과는 Table 4에 나타낸 바와 같다. 그리고 Fig. 5는 산사태발생지역과 미발생지역의 대표적 시료에 함유된 점토광물의 함량을 나타낸 것이다. 제3기퇴적암류지역은 점토광물 중에서 스멕타이트광물인 몬모릴로나이트가 특히 많이 함유되어 있으며, 편마암류와 화강암류에 비해 다른 점토광물의 함량 또한 전체적으로 높은 것으로 분석되었다. 수분을 많이

함유함으로써 함수광물에 속하는 스펙타이트광물은 편마암류와 화강암류지역에서는 전혀 관찰되지 않고 제3기퇴적암류지역에서만 다량 함유된 것으로 나타났다. 이는 지질조건과 풍화정도 등 토층환경이 다른 지질들과 다르기 때문이 아니라 주로 이암이나 셰일 등으로 구성된 모암의 성인에 기인되는 결과로 해석된다. 한편, 포항지역과 같이 이암과 셰일이 분포된 토층의 경우 암질은 주로 점토광물과 탄산염, 황철석으로 구성되는데, 이들 지역에서는 광물의 변화양상으로부터 풍화작용에 의한 모암조직의 변화를 어느 정도 인지할 수 있다.

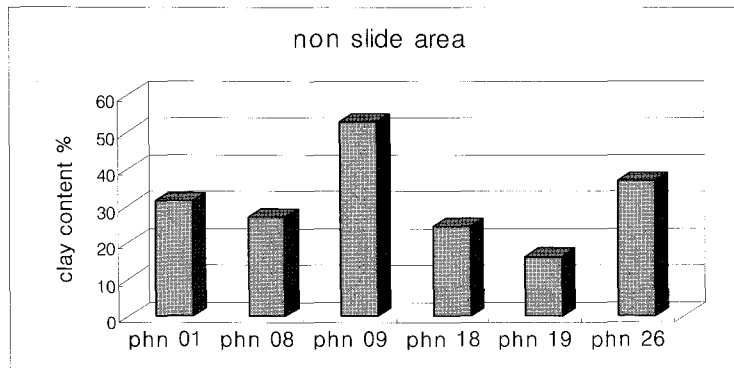
제3기퇴적암류지역의 경우 산사태발생지역과 미발생지역간에 광물조합의 차별성은 특징적으로 관찰되지는 않는데, 이는 풍화과정에서 형성된 이차광물의 조합과 밀접하게 관계되지 않음을 의미하는 결과로 볼 수 있다. XRD에 의한 토층시료의 광물분석결과 두드러진 특성을 보이지는 않으나 전반적으로 산사태 발생여부는 토층의 조성광물에 영향을 받음으로써 광물의 종류 및 구성비율 등과 상관성을 가지며, 경우나 지형조건 및 토질 특성에도 지배를 받는다.

Table 4. Quantitative XRD analysis of mineral constituents in soils sampled from tertiary sedimentary rock area.

Minerals	Slides (%)							Non slides (%)					
	PHS15	PHS22	PHS27	PHS29	PHS31	PHS33	PHS35	PHN01	PHN08	PHN09	PHN18	PHN19	PHN26
Quartz	60.8	53.2	48.8	41.6	47.5	40.4	40.7	47.7	45.6	33.6	58.2	79.9	37.9
Albite	5.5		11.4	3.4	17.7	14.2	14.3	15	15.4	8.0		3.8	14.9
Biotite		7.4									11.2		
Chlorite	3.7							24.3			1.5		
Kaolinite	3.7	2.2	6.6	3.5						5.5	2.6	7.7	4.4
Illite	14.9	15.6	10.6	11.4	7.7	9.3	10	7.3	9.1	10.5	13	8.6	11.2
Smectite		13.1	12.8	30.3	19	25.1	26.5		18.1	36.9	7.5		21.2
Microcline	11.5	8.5	9.9	9.8	8.1	10.9	8.5	5.8	11.8	5.5	6		10.5
Clay content	22.3	30.9	30.0	45.2	26.7	34.5	36.5	31.6	27.2	52.9	24.6	16.3	36.8



(a)



(b)

Fig. 5. Histograms of clay content in soils from the sedimentary rocks. (a), Landslide sites. (b), Non slide sites.

토층의 미세조직 및 화학조성

지질별로 토층시료의 미세조직과 화학조성을 분석하고 이들과 산사태와의 관련성을 살펴보기 위해 주사전자현미경(FE-SEM)에 의한 관찰과 함께 에너지분산분광분석(EDS)을 실시하였다. 시료는 각 지역별로 산사태 발생지역과 미발생지역을 구분하여 대표적 시료를 선정하고 각 시료별로 흙입자의 미세구조와 화학조성을 분석하였다. 이는 일반적인 입도분포를 이용한 연구(예, Casagli et al., 2003)에 비해서 흙입자의 조직과 형태를 직접 관찰하기 때문에 보다 효율적이다.

편마암류지역

Fig. 6은 산사태발생지역인 JHS08-4 시료의 SEM사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 100배위 미만의 관찰대상 시편에서는 200 μm 미만의 흙입자들이 주를 이루고 있다. 100배율 하에서 입자의 형태는 아원형(subrounded)이 가장 우세하고 그 다음으로는 아각상(subangular)이 쉽게 관찰된다. 흙입자는 다양한 크기로 구성되어 있으며, 입자의 표면은 거칠고 이차광물들이 형성되어 있다. 그리고 1,000배율 이상에서는 엽상의 점토광물들이 발달되어 있음이 관찰된다. 점토광물들은 대부분 10 μm 미만으로서 여러 판상들이 겹쳐진 형태가 특징적으로 관찰된다. 한편, Fig. 6(d)에서처럼 엽상의 입자인 경우는 EDS 분석결과 O 42.72, Mg 2.38, Al 14.46, Si 24.16, K 2.09 및 Fe 13.93 atomic %로 나타남으로써 변질을 받은 상태의 흑운모로 간주된다. 이 결정은 벽개가 벌어지고 확장

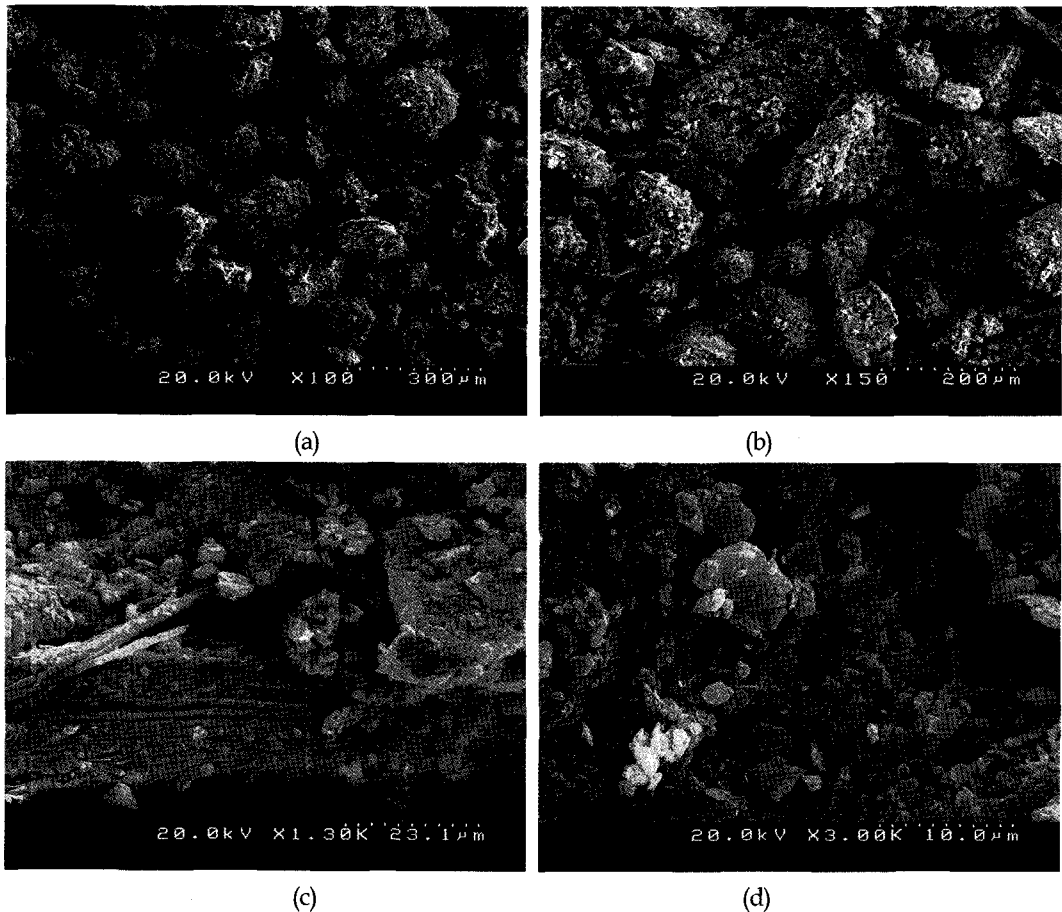


Fig. 6. SEM photomicrographs of JHS08-4 soil sampled from the landslide site in gneiss area. (a), $\times 100$ magnification. (b), $\times 150$ magnification. (c), $\times 1,300$ magnification. (d), $\times 100$ magnification.

되는 변질작용이 진행되고 있으며, 그 주변부에서는 새로운 점토광물들이 생성되고 있는 것으로 보인다. 또한, 산사태지역의 다른 시편들에서는 납작원형(oblite shape)과 입자들의 표면에 여러 종류의 이차 점토광물이 형성되어 있는 경우도 관찰된다. 특히, 고배율에서는 광물들이 풍화작용에 의해 심하게 변질되어 골격만 유지된 상태를 볼 수 있고, 길쭉한 미생물에 의해서도 변질작용을 받고 있음을 알 수 있다.

화강암류지역

Fig. 7은 산사태발생지역인 SJS20 시료의 SEM사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 흙입자들의 형태는 표면이 거칠고 아각상이 가장 흔하며, 크기는 200 μm 미만이 주를

이루고 있다. 그리고 고배율로 확대해 보면 흙입자들은 수 μm 크기의 판상형 점토광물의 집합체로 구성됨을 알 수 있다. 이들 입자들에 대한 EDS 분석결과 화학조성은 O 14.14, Na 1.74, Al 20.33, Si 44.24, K 1.14 및 Fe 17.84 atomic %를 보였다. 일부 정장석의 경우는 O 28.86, Al 11.72, Si 44.64 및 K 14.77 atomic %로서 화학조성에 의하면 비교적 신선한 상태를 유지하고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 화강암지역 산사태발생지역의 시료들에서는 Fe가 비교적 높은 함량으로 포함되어 있는데, 이들은 기존의 염기성 광물로부터 유래된 것으로 보인다.

제3기퇴적암류지역

Fig. 8은 산사태발생지역인 PHS28 시료의 SEM사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 흙입자는 아각상의 납작

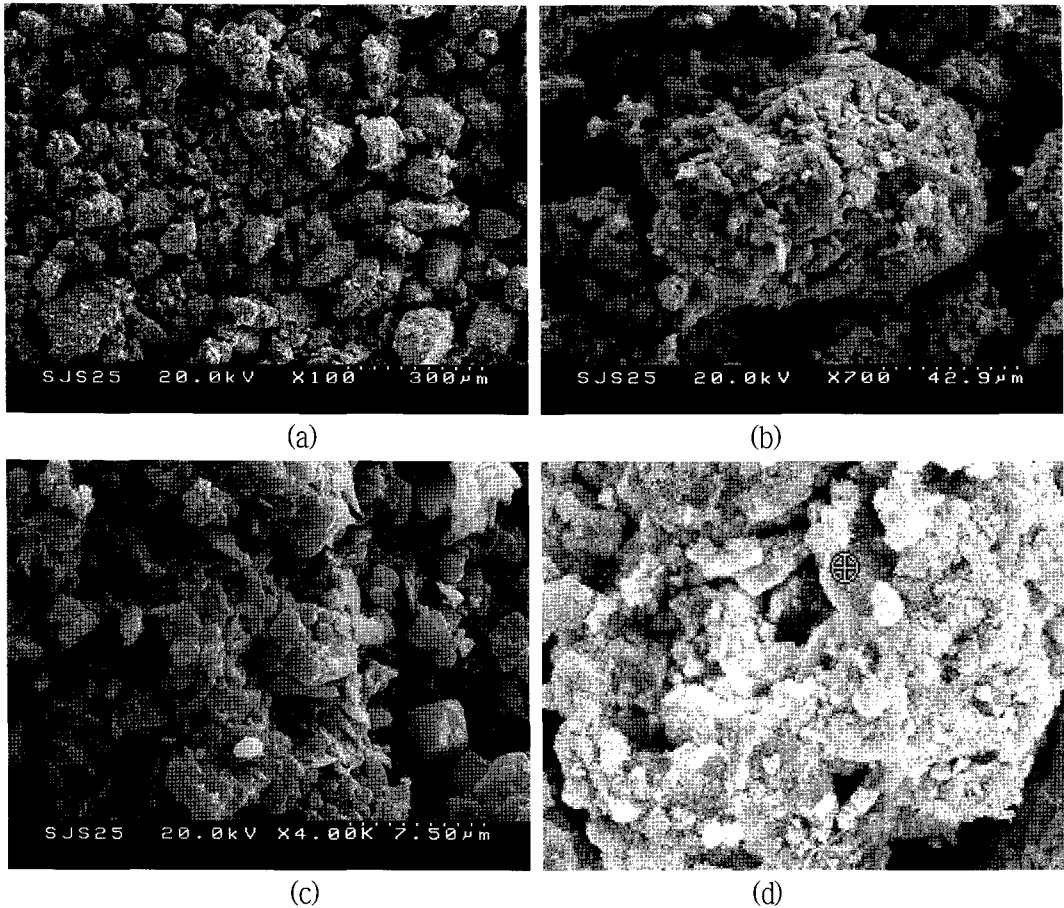


Fig. 7. SEM photomicrographs of SJS20 soil sampled from the landslide site in granite area. (a), $\times 100$ magnification. (b), $\times 700$ magnification. (c), $\times 4,000$ magnification. (d), Spot denotes an analyzed point $\times 2,000$ magnification.

한 형태가 주를 이룬다. 이는 이 지역의 지질이 주로 세립질의 쇄설성퇴적암인 셰일이나 이암으로 구성되어 있어 층리의 발달이 양호하고 주로 점토광물들로 구성되어 있기 때문이다. 흙입자의 크기는 다양한 편이나 300 μm 미만이 주를 이루고 있다. 그리고 더 고배율로 확대하여 보면, 구성광물은 거의 판상의 몬토릴로나이트나 일라이트 및 카올리나이트임을 알 수 있다. 또한, EDS 분석결과 O 28.03, Al 6.49, Si 49.60, K 2.80 및 Fe 13.08 atomic %, O 40.09, Al 7.75, Si 46.63, K 2.12 및 Fe 3.41 atomic %, 그리고 O 61.68, Na 1.61, Mg 1.92, Al 20.79, K 3.00 및 Fe 11.00 atomic %로서 매우 다양하게 나타난다.

지질에 따른 산사태지역의 풍화특성

흙의 비표면적은 세립질의 함량이 높고 체적가중치에 의한 평균치가 작을수록 크게 나타난다. 그리고 조립질로 구성된 토층일수록 세립질, 중립질 및 조립질구간의 입자들 역시 타 시료에 비해서 더 크게 나타나는데, 이는 풍화에 의해서 흙으로 변화되는 과정이 비교적 일관성을 보이는 것으로 볼 수 있다. 즉, 기반암이 세립질과 조립질로만 극단적으로 양분되지 않고 점진적으로 풍화가 진행되고 있음을 의미한다. 또한, 산사태발생지역의 토층이 보다 세립질이고 비표면적이 큰 특징을 보이는 것은 물리적 및 공학적 특성 이외에 다른 여러 요소들이 복합적으로 작용되고 있음을 지시하는 결과이다.

편마암류지역의 경우 산사태발생지역의 토층은 미발생지역에 비해서 점토광물의 함량이 더 높은 것으로 나타났다. 점토광물로는 일라이트가 가장 풍부하고 녹니

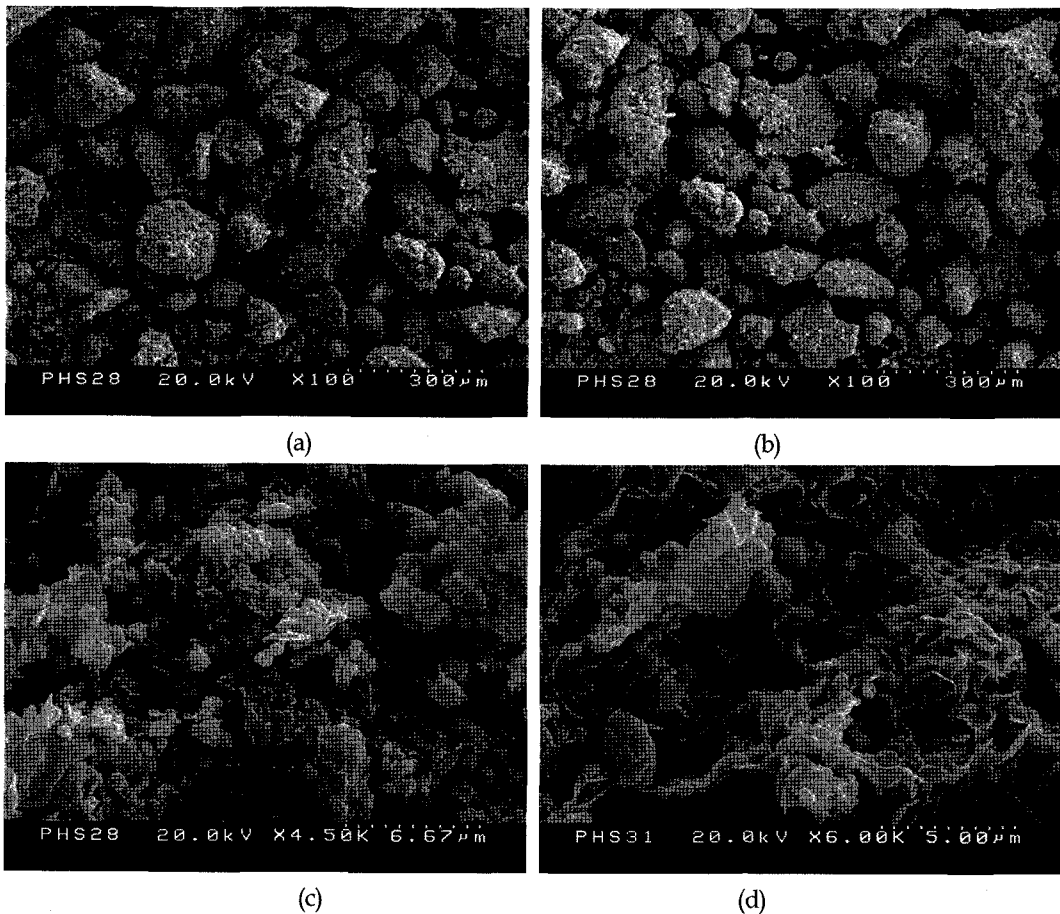


Fig. 8. SEM photomicrographs of PHS28 soil sampled from the landslide site in tertiary sediments area. (a), $\times 100$ magnification. (b), $\times 100$ magnification. (c), $\times 4,500$ magnification. (d), $\times 6,000$ magnification.

석 또는 카올리나이트가 그 다음으로 높은 함유비율을 보였다. 미발생지역 토층의 미세구조는 점토질광물과 석영으로 비교적 치밀하게 엉겨 붙어있으며, 개별 입자들의 크기는 10 μm 미만이 주를 이룬다. 흡입자의 형태는 아원형이 가장 우세하고 다음으로는 아각상이 흔하게 관찰된다. 그리고 그 크기는 다양하게 구성되어 있으며 입자들의 표면은 거칠게 보이는데, 여기에 엽상의 점토 광물들이 같이 형성되어 있는 양상을 보이고 있다.

화강암류지역에서는 점토광물의 함량만으로도 산사태 발생지역과 미발생지역이 확연히 구분되어지는데, 버미큘라이트 함량이 높고 일라이트와 카올리나이트 같은 점토광물의 총량이 높으면 상당히 높은 함수율의 환경에 놓여 있다고 볼 수 있다. 점토광물의 함량은 산사태 발생지역의 토층이 미발생지역에 비해 월등하게 높은 것으로 분석되어 점토광물이 산사태발생에 유의한 영향인자로 간주된다. 일부 시료에서는 석영, 장석 및 점토광물의 함량만 다를 뿐 광물조성에는 큰 변화가 없는 경우도 있으나, 전반적으로 미발생지역의 토층이 산사태 발생지역에 비해 석영과 장석의 함량은 더 높고 풍화가 덜 진행되었다. 또한, 결정의 표면은 많은 용해동공과 부식 홈이 발달되어 있다. 부식홈은 C-축의 방향으로 좁고 길게 신장된 렌즈상으로 발달해 있으며, 초기에 형성된 작은 홈들은 점차 확장되어 서로 연결되면서 횡적으로도 성장하는 양상을 보인다. 신장된 용해동공과 부식홈들이 발달하고 있으나, 결정축에 수직인 방향으로의 커다란 틈새의 발달이 일어나지 않은 것으로 보아 아직 풍화 정도가 심한 수준은 아닌 것으로 평가된다.

제3기퇴적암지역 토층의 경우 점토광물 중에서도 몬모릴로나이트가 특히 많이 함유되어 있으며, 다른 두 지질인 편마암류와 화강암류지역에 비해 전체적인 점토광물의 함량 또한 비교적 높은 것으로 나타났다. 함수광물인 스멕타이트는 다른 두 지질에서는 관찰되지 않았으며 제3기퇴적암지역에서만 풍부하게 나타남이 특징적이다. 이는 풍화정도나 지형조건과 같은 사면환경이 타 지질과 달라서가 아니라, 이암이나 셰일이 주를 이루는 제3기퇴적암류의 모암특성에 기인되는 것으로 해석된다. 이 지역의 경우 산사태발생지역과 미발생지역간의 광물조성은 특징적으로 구별되지는 않는다. 따라서 산사태는 광물조성의 차이에 큰 영향을 받기보다는 주로 지형조건이나 토층의 공학적 특성 등에 지배를 받을 것으로 예측된다.

한편, 자연사면에서의 산사태 연구시 기존의 토질 및 지질공학적 특성평가(Lumb, 1975; Brunnsden, 1985; 김원영 외, 1998, 2000) 외에도 토층의 풍화특성과 구성 광물들의 종류와 구성비, 점토광물의 함량, 흡입자의 미세

조직과 같은 지화학적 정보가 추가된다면 산사태발생의 원인을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구에서는 지질조건을 달리하는 3개지역 즉, 편마암류인 장흥지역, 화강암류인 상주지역, 그리고 제3기 퇴적암류인 포항지역의 토층을 대상으로 미세조직, 입도분포 및 지화학분석 등을 실시하고 지질조건에 따른 광물조성 및 풍화특성을 파악하였다. 그리고 이들 구성 광물 및 지화학적 특성들과 산사태간의 관련성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 자연사면에서 토층의 심도와 구성물질은 산사태가 발생할 때 사태물질의 이동에 영향을 미치는 점토물질의 함량 및 특성들이 산사태규모를 결정하게 되며, 광물들의 종류와 구성비, 점토광물의 종류와 함량, 미세조직 및 지화학적 특성 등이 중요하다. 그리고 점토광물들은 판상구조로 평활성과 함수율이 높기 때문에 토층의 함수율에 영향을 크게 미치므로 산사태의 발생초기에 매우 중요하게 작용되며, 특히 팽윤성 점토광물들이 중요한 역할을 하게 된다.

2) 편마암류인 장흥지역에서의 점토광물로는 일라이트의 함유비율이 가장 높고, 아원형의 입자형태가 가장 우세하며 그 크기는 다양하다. 그리고 산사태발생지역의 광물결정은 벽개의 확장과 변질작용으로 주변에 새로운 점토광물들이 생성되었거나 심하게 변질되어 골격만 유지된 상태로서 미발생지역보다 심하게 변질되거나 풍화되었다.

3) 화강암류인 상주지역은 미발생지역의 토층이 풍화가 덜 진행되고 점토광물의 함량비가 낮은 반면, 산사태 발생지역은 높은 풍화도와 함께 점토광물의 함량 또한 월등하게 높은 것으로 분석됨으로써 토층의 풍화도 및 점토광물 함유량이 산사태발생에 유의한 영향요인으로 작용한 것으로 볼 수 있다.

4) 제3기퇴적암지역은 타 지역에 비해서 점토광물의 함량이 더 높고 몬모릴로나이트의 함유비율이 특히 높은 것으로 나타났다. 따라서 이들이 집중호우시 토층의 지지력에 크게 영향을 미침으로써 다른 지역들에 비해 상대적으로 적은 강우조건에서도 쉽게 산사태가 발생할 수 있다. 산사태발생지역과 미발생지역간 광물조성의 차별성이 뚜렷이 관찰되지는 않음으로써 산사태가 광물조성의 차이에 큰 영향을 받기보다는 주로 국지적인 지형조건이나 흙의 공학적 특성 등에 지배를 받을 것으로 예측된다.

5) 자연사면에서의 산사태를 연구함에 있어 기존의

공학적 특성평가 외에도 토층의 풍화특성과 구성광물들의 종류와 구성비, 점토광물의 함량, 흙 입자의 미세조직 및 지화학적 정보를 추가적으로 병행한다면 산사태의 발생원인을 보다 정확하게 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 '산사태위험도 산정시스템 및 피해저감기술 개발' 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 -충청북도 보은지역-, 대한지질공학회지, 10, 2, 163-174.
- 김경수, 이문세, 조용찬, 채병곤, 이춘오, 2004, 지질에 따른 토층사면의 토질공학적 특성 -부산 황령산 지역-, 지질공학, 14, 4, 487-498.
- 김경수, 조용찬, 송영석, 이춘오, 채병곤, 이문세, 2005a, 부산 백양산일대 자연사면의 지질조건에 따른 토질공학적 특성, 한국지질자원연구원 논문집, 9, 2, 3-19.
- 김경수, 김원영, 채병곤, 송영석, 조용찬, 2005b, 강우에 의해 발생한 자연사면 산사태의 지질공학적 분석 -용인·안성지역을 대상으로-, 지질공학, 15, 2, 105-121.
- 김원영, 이사로, 김경수, 채병곤, 1998, 지형 특성에 따른 산사태의 유형 및 취약성 -연천-철원지역을 대상으로-, 대한지질공학회지, 8, 2, 115-130.
- 김원영, 채병곤, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09, 642p.
- 심태섭, 김선학, 기원서, 주승완, 2004, 강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구, 지질공학, 14, 4, 349-360.
- 이사로, 박하나, 민경덕, 1997, GIS를 이용한 1987년 7월 부여 서부지역의 집중호우로 인한 산사태 분석 및 산사태 취약성도 작성 연구, 대한자원환경지질학회 제30차 학술발표회 요약집.
- 채병곤, 김원영, 나종화, 조용찬, 김경수, 이춘오, 2004, 제3기 퇴적암 및 화산암 분포지의 산사태 예측모델, 지질공학회지, 14, 4, 443-450.
- 채병곤, 김원영, 이춘오, 김경수, 조용찬, 송영석, 2005, 지질조건에 따른 사태물질 이동특성 고찰, 지질공학, 15, 2, 185-199.
- Brunsdon, D., 1985, Landslide types, mechanisms, recognition, identification. Proceedings of landslides in the South Wales, 18-29.
- Casagli, N., Ermini, L. and Rosati, G., 2003, Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: sampling and processing methods, Engineering Geology, 69, 83-97.
- Lumb, P., 1975, Slope Failures in Hong Kong, Quarterly Journal of Engineering Geology, London, 8, 31-65.

투 고 일	2005년 11월 11일
심 사 일	2005년 11월 12일
심사완료일	2005년 12월 16일

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

추창오
경북대학교 지질학과
702-701 대구광역시 북구 산격동 1170
Tel: 053-850-8090
E-mail: chooco@knu.ac.kr

부성안
농업기반공사 농어촌연구원 수리시험연구실 지하수 연구팀
426-170, 경기도 안산시 사동 1031-7
Tel : 031-400-1850
E-mail: booh2700@karico.co.kr

정교철
안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-823-1627
E-mail: jeong@andong.ac.kr