

부산시 남구 문현동 산사태 지역의 지질 및 점토광물에 대한 연구

A Study on Geology and Clay Minerals of the Landslide Area in the Munhyun-dong, Nam-gu, Pusan

황진연*¹

Hwang, Jin-Yeon

김선경*²

Kim, Sung-Kyoung

김춘식*³

Kim, Choon-Sik

Abstract

In this study the occurrence and mineralogical characteristics of clay minerals from the Munhyun-dong landslide area in Pusan city were examined by XRD, SEM, and chemical analyses. Several types of clay minerals such as halloysite, vermiculite, mica/vermiculite interstratified mineral, vermiculite/smectite interstratified mineral, kaolinite and illite are found abundantly in the area. The occurrence of clay minerals suggest that they have been formed by weathering of andesite which is the bedrock of the area. It is believed that halloysite was formed in the early stage of weathering, and vermiculite, mica/vermiculite interstratified mineral and mica/vermiculite interstratified mineral were formed in the middle stage, and finally, kaolinite was formed. The clay minerals occurring in the central part of the landsliding area and within the slip surface are dominated by expandable minerals such as halloysite, vermiculite and vermiculite/smectite interstratified mineral. These clay minerals expand by absorbing water and effectively decrease the shear resistance of the rock mass, and therefore, they could be an important factor for the landslide. The analyses of geology and mineralogical characteristics of the area suggest that the landslide was caused by combination of various factors including steep slope, heavy rainfall, abundant joints, alteration of the rocks, and occurrence of expandable clay minerals. The result of this study suggests that the investigation for the prevention of possible landslide must include the examination of clay mineralogy as well as the site geology.

*1 정회원, 부산대학교 자연과학대학 지질학과 교수

*2 한국건설기술연구원 연구조원

*3 부산대학교 자연과학대학 지질학과 강사

요 지

부산시 남구 문현동 산사태 지역에 산출하는 점토광물에 대해 X-선회절분석, 주사전자현미경 관찰 및 화학분석 등의 조사를 행하여 산출상태 및 광물학적 특성을 검토하였다. 그 결과, 본 지역에는 할로이사이트, 버미클라이트, 운모/버미클라이트 혼합층광물, 버미클라이트/스멕타이트 혼합층광물, 카오리나이트, 일라이트 등의 여러 점토광물이 다량 산출되는 것으로 나타났다. 산출상태로 보아 이들 점토광물은 기반암인 안산암의 풍화변질에 의해 형성된 것으로 나타났다. 즉, 안산암의 초기 풍화단계에서 할로이사이트가 형성되고, 그 후의 중간단계에서 버미클라이트, 운모/버미클라이트 혼합층광물 및 버미클라이트/스멕타이트 혼합층광물이 형성되었으며, 최종의 풍화단계에서 카오리나이트가 주로 형성된 것으로 사료된다. 특히 산사태 발생지역의 중심부와 미끄러진 바다면의 점토에서 할로이사이트, 버미클라이트, 버미클라이트/스멕타이트 혼합층광물 등의 팽윤성 점토광물이 다량 산출되었다. 따라서 이들 점토광물은 물을 흡수하여 팽창하게 되며, 이에 따라 사면의 전단저항을 급격히 약화시킬 수 있기 때문에 산사태 발생의 중요한 원인을 제공한 것으로 생각된다. 지질 및 구성광물 등의 검토 결과, 이 지역의 산사태는 급한 경사면, 집중호우, 절리의 발달, 암석의 변질작용, 그리고 팽윤성 점토광물 등의 요인이 복합적으로 작용되어 발생된 것으로 사료된다. 따라서 산사태의 조사 및 방지대책에 있어서 지질과 함께 점토광물에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

Keywords : Landslide, Clay mineral, Weathering

1. 서 론

우리나라는 여름철 7월부터 9월 사이에 집중호우 및 태풍 등으로 많은 자연재해가 발생하고 있는데 큰 재해 중의 하나가 산사태이다. 한번 산사태가 일어나면 많은 인명 및 물질적 피해를 입게 되고, 또한 산을 완전히 복구하기 어렵기 때문에 또 다시 2차적인 재해의 원인이 될 수도 있다. 이러한 산사태로 인한 자연재해를 예방하고 사후대책을 철저히 세우기 위해서는 산사태에 대한 근본적인 발생원인과 발생기구의 규명이 필요하다.

일반적으로 산사태의 원인으로서는 자연적 요인과 인위적 요인이 있으며, 대부분의 재해는 자연적인 요인에 기인된다. 자연적인 요인으로서는 지질 및 지형에 대한 내인적 요인과 강우, 강설, 융설, 지진, 화산 등의 외인적 요인으로 나눌 수 있다. 그리고 인위적 요인으로서는 철도 및 도로 건설에 따른 사면의 절취 및 성토, 터

널 및 댐 등의 구조물 축조, 벌채, 폭파등이 포함된다(山田 외, 1977; 藤原, 1979). 실제로 우리나라에서 발생하는 외인적 요인으로서는 강수에 의한 것이 가장 많다. 그러나 이러한 외인적 요인은 기상에 관련되는 것으로 산사태에 있어 지반공학적인 예방 및 대책을 강구하는데 한계가 있다. 따라서 공학적으로 평가되어야 될 요인으로서는 지질 및 지형에 의한 내인적 요인이 가장 중요하다. 이 중에서 지형은 주로 사면의 경사도가 크게 영향을 미치며, 그에 대한 조사 및 검토는 비교적 단순하다. 그러므로 실제로 산사태에 가장 크게 좌우되는 요인은 사면을 구성하는 암석과 토양의 성질을 나타내는 지질이라 할 수 있다. 지질은 지역에 따라 매우 다양한 특성을 나타내며, 그 특성으로는 기반암의 종류, 암석의 변질정도, 생성년대, 지질구조 등의 많은 요소들이 포함된다. 이러한 지질의 다양한 특성 때문에 특정의 지질에서 산사태가 발생하는 경우가 많다. 아주 일반적

인 예를 들면 제3기층, 화산지역, 파쇄대, 변질대 등의 지역에서 산사태가 발생하기 쉽다. 그리고 단층, 습곡, 암맥의 관입, 절리, 층리 등의 지질구조에 따라 산사태의 양상이 규제되어 나타난다. 따라서 산사태의 조사, 예방, 대책에 있어 지질에 대한 검토가 필수적이다. 그러나 우리나라에서는 이러한 지질학적 검토가 제대로 잘 이루어지지 않고 통상적으로 지형만을 고려한 일률적 조치를 취하여 재발생 등의 피해를 가져오고 있다. 지표에 나타나는 암석들은 그 종류가 매우 다양하고 그 구성광물도 다양각색이며, 이들은 물과의 반응에 의해 여러 광물질로 변질되고 있다. 특히 이러한 변질된 물질 중에는 아주 미립의 점토광물이 많이 포함되며, 이들의 광물종 및 분포상태에 따라 사면의 성질이 크게 달라지게 된다.

산사태가 발생하는 지역에서는 특징적인 산사태 점토가 수반되고 있어 이러한 점토물질이 산사태와 관계가 깊은 것으로 일반적으로 알려져 있다. 따라서 산사태의 근본원인에 관한 연구에 있어서는 이러한 점토와 그 점토광물에 대한 검토가 매우 중요하다. 국외에서는 산사태지역에서 산출하는 팽윤성 녹니석(*swelling chlorite*), 스멕타이트(*smectite*) 그리고 카오린/버미큘라이트 혼합층광물(*kaolin/vermiculite interstratified mineral*)과 같은 특징적인 점토광물에 대한 광물학적 연구도 많이 행하여졌다(Shuzuz: 1984, 1986; Shuzuz & Shimoda, 1987; Shuzuz & Nakamura, 1986; Egashira, 1992a, 1992b; Yoneda et al., 1995). 그러나 우리나라에서는 산사태와 점토광물과의 관계에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다(황진연 외, 1995).

본 조사지역인 부산시 남구 문현동 일원에는 1985년 7월, 1987년 8월, 1991년 8월 등 여러차례에 걸쳐서 대소규모의 산사태가 발생된 바 있고 이로 인하여 많은 피해를 입은 것으로 알려져 있다. 특히 이 지역은 부산 지역에서 산사태 발생 빈도가 높고 가장 피해가 컸던 곳이다. 이 곳의 산사태에 대해서 임학적인 측면

의 연구(강위평, 우보명, 1985) 등이 있으나 지질학적 및 광물학적 연구는 수행되지 않았다. 그러므로 문현동에 위치한 산사태 발생지점을 대상으로 하여 지질학적 검토와 함께 이곳에서 산출하는 점토광물의 종류 및 특성을 자세히 파악하고, 변질에 따른 이들 점토광물의 생성과정을 규명하고, 나아가 산사태의 발생원인과 점토광물과의 관계를 규명하는 것을 목적으로 연구하였다. 그리고 이 연구는 산사태를 포함한 사면안정의 조사 및 평가에 있어 지질과 사면을 구성하는 물질에 대한 검토의 중요성을 부각시키고, 지반공학적으로 응용할 수 있는 방법을 강구하는데 필요한 자료를 제공하는 것도 목적으로 하였다. 앞으로 보다 정밀한 구조물의 건설 및 정확한 재해예방 등의 기술을 개발하기 위해서는 지반에 대한 자세한 물질적 측면의 검토가 필수적이 될 것이 예상된다.

2. 연구방법

본 산사태 지역과 그 주변지역에 대해 지질 조사와 더불어 경질 압석, 풍화암, 토양, 점토 등의 많은 시료를 각지점에서 채취하였다. 채취한 시료에 대해서는 모두 X-선회절분석을 행하여 구성광물을 조사하였다. 미립의 점토분이 많은 시료에 대해서는 충분히 분쇄시킨 후 수중침강법에 의하여 2 μ m 이하의 점토성분을 분리하여 정방위 시편을 만들어 X-선회절분석을 행하여 점토광물을 조사하였다. 일부 대표적 시료에 대해서는 전자현미경 관찰 및 화학 분석을 행하였다.

X-선회절분석은 Rigaku사제 Geigerflex2301을 사용하여 CuK α 선으로 Ni-필터를 이용하였다. 측정조건은 전압 30kV, 전류15mA, Scan speed 2°/min, 시정수 1sec, Slit 1°-0.3mm-1°로 하였다.

변질물 중의 구성광물 및 조직을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 주사전자현미경은 JEOL사제 JSM-5400을 30kV로 사용하

였다. 주성분의 화학분석은 X-선형광분석기(XRF)에 의하여 실시하였다.

3. 일반지질

본 연구지역을 포함하는 광역적인 지질에 대한 조사는 장태우 외(1983)에 의한 1:50000 부산·가덕도폭으로 보고된 바 있다(그림 1). 그리고 이 지역의 환경지질 및 암석에 관한 연구(김종렬, 황진연, 1991; 윤성효, 김진섭, 1991)도 수행된 바 있다. 이 지역 일대의 지질은 중생대 백악기에 해당되는 화산암류, 퇴적암류, 관입암인 심성암류, 그리고 제4기의 충적층으로 구성되어 있다(그림 1). 화산암류는 본 지역에서 가장 많은 부분을 점하고 있으며 주로 안산암질 화산각력암과 안산암으로 구성된다. 안산암질 화산각력암층은 본 지역의 서남부에 주로 분포하며 래필리 응회암과 화산각력암으로 구성된다. 안산암은 황령산을 중심으로한 중앙부 지역에 넓게 분포하며, 육안상으

로 암회색 내지 암녹색의 치밀한 비현정질 조직을 나타내나 국지적으로 사장석과 휘석의 반정들을 포함하는 반상조직을 나타내기도 한다. 급변 연구대상인 문현동의 산사태 지역의 기반암은 주로 암회색의 치밀한 안산암으로 구성된다. 이 암석의 화학성분은 SiO_2 가 약 57%(표 2)를 나타내어 안산암의 범위에 해당된다. 퇴적암류는 주로 응회질사암과 이암의 호층으로 구성되며, 접촉변성작용을 받아 호온펠스화되어 있다. 심성암류로는 반려암과 각섬석화강섬록암이 있다.

4. 산사태의 양상

부산시 남구 문현동 일대에는 여러 차례의 산사태가 발생하여 옹벽설치, 수로 개설, 사면

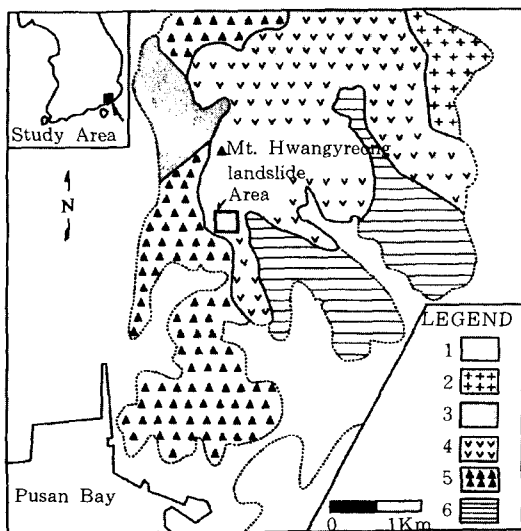


그림 1. 부산시 남구 문현동 산사태지역 주변의 지질도와, 본 연구지역의 위치도.
1: 충적층, 2: 각섬석 화강섬록암, 3: 반려암, 4: 안산암, 5: 안산암질 화산각력암, 6: 응회질 퇴적암(호온펠스)

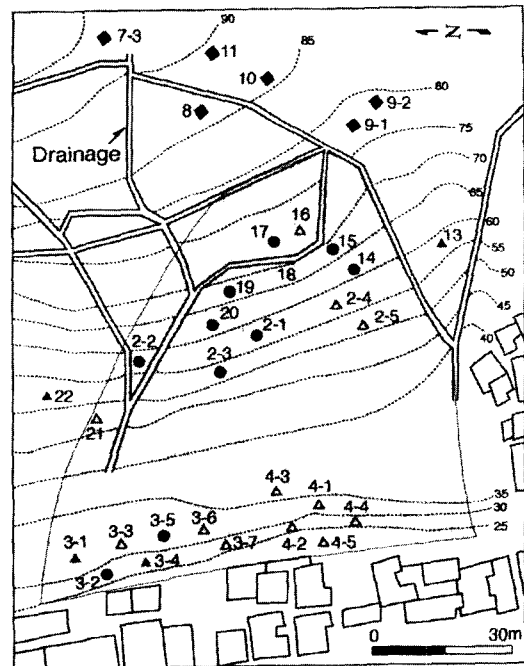


그림 2. 산사태 발생지역의 지형, 시료의 채취지점, 그리고 암석 및 변질물의 구성광물조합을 나타낸 그림. 중앙의 약간 검은 부분은 산사태의 붕괴범위를 나타냄.
▲: A 광물조합, △: B 광물조합,
●: C 광물조합, ◆: D 광물조합.

절개 등의 복구공사를 해 놓은 상태이다. 그 중에서 규모가 크고 산사태의 발생흔적이 비교적 잘 남아 그 붕괴구조가 잘 인지되는 곳을 택하여 연구대상으로 하였다(그림 2). 이 곳은 1985년 7월 5일 산사태의 발생으로 하부에 조성된 주택들이 파괴되고 이에 따라 인명 피해도 일어났다. 산사태 발생의 상단부에서 피해 주택지인 하단부까지의 붕괴길이가 약 80m이고, 산사태 발생의 양측면부 사이의 붕괴 범위는 하부에서 약 70m에 이른다. 양측면부는 경암의 암반이 노출되어 있어 그 범위가 뚜렷이 구분된다. 이 암반은 치밀한 안산암으로 이루어져 있고, 절리가 발달되어 그 절리면이 측면부를 규제하고 있다. 붕락된 중심부는 다소 완만한 경사를 이루고 있어 소규모의 발이 조성되어 있다. 이 곳 주변의 경사는 약 30-40° 정도로 매우 가파른 지형을 나타낸다. 이 산사태 발생지 이외의 주변 산사면에는 많은 수목이 자라고 있으며 얇은 토양층이 분포하고 있다. 이 지역의 사면은 거의 모두 경질의 암반으로 구성되어 있다. 이들 암반들은 많은 절리가 발달되어 있고 그 절리면을 따라 변질작용에 의해 점토화된 부분들이 잘 관찰된다. 따라서 이곳에는 기반암인 경암과 함께 풍화암, 점토, 토양 등의 다양한 물질이 복합적으로 나타난다. 산사태 형태의 중상부의 양측면부에서는 미끄럼면의 바닥에 해당되는 곳에 담회색의 점토가 다량 관찰되었다. 산사태의 중앙부에서도 대부분 붕적토에 해당되는 점토질 물질로 구성되어 있다. 이 지역에는 2차적인 산사태를 방지하기 위하여 수로가 여러곳에 많이 설치되어 있다(그림 2).

이 지역에 나타나는 기반암인 안산암내에 발달하는 많은 절리면에 대하여 주향 및 경사를 측정하였다. 이들의 주향 및 경사는 N36~46° E, 82~84° SW와 N58~64° W, 68~69° NE으로 주향은 북서-남동방향과 북동-남서방향의 두 방향이 주로 우세하며, 경사는 주로 높은 경사각을 보인다. 산사태 지점의 절리면에는 점토화로 변질된 부분이 많이 나타난다.

이 지점에서 약간 떨어진 경질의 암반노두에서는 절리면을 따라 백색 및 담록색을 띠는 세맥들이 충전되어 있으며 이들 물질은 대부분 스틸바이트(stilbite)와 녹염석으로 구성된다.

5. 암석 및 변질물의 구성광물과 화학성분

5.1 구성광물

전술한 바와 같이 이 지역에는 기반암이 치밀한 안산암인 한 종류의 암석으로 구성되어 있으며, 이 암석의 변질작용에 의해 형성된 연암, 풍화암, 점토, 토양 등이 다양하게 산출되고 있다. 따라서 이 지역에 나타나는 경암, 연암, 풍화암, 점토, 토양 등에 대하여 X-선회절 분석을 통하여 그 구성광물성분을 조사하였다. 그 결과 구성광물성분에 따라 크게 4가지의 광물조합으로 분류되었으며, 이들 각 시료별 구성광물의 성분을 표 1에 나타냈다.

A Type은 풍화를 거의 받지 않은 경질암에 해당되는 것으로 주로 암회색 치밀한 안산암으로 석영, 장석, 각섬석, 운모를 주성분으로 하는 조합이다. 이러한 경질의 암석 중에서는 부분적으로 암녹색을 띠는 부분이 나타나는데 이러한 부분에는 녹니석 및 녹염석이 수반된다. 경질암 이외에 연암, 풍화암, 점토, 토양 등은 모두 B, C, D type의 광물조합에 해당된다. 여기서 B Type은 점토광물인 12Å 광물이 특징적으로 나타나는 것이며, C Type은 14Å 광물이 특징적이며, D Type은 장석이 포함되지 않고 고령석광물이 다량 함유하는 광물조합이다. 12Å 광물과 14Å 광물은 점토광물로서 자세한 광물종과 특성에 대해서는 후술한다. 점토광물은 그 식별이 간단하지 않고 광물학적 특성이 매우 변화성이 많기 때문에 이와같이 특징적인 X-선회절선을 기준으로 일단 광물종을 구분하였다.

본 산사태지역에 있어 이들 4가지 광물조합의 분포상태를 그림 2에 나타냈다. 그림과 같이 A-type은 산사태 발생지역의 양쪽 외측부

에 주로 분포하고 있는데 이는 암반의 노두가 육안으로 잘 관찰되는 부분에 해당된다. B 및 C type은 산사태의 중심부와 그 하부인 붕락된 지역에 집중적으로 분포하고 있다. 그리고 D type은 산사태 발생지역보다 고도가 높은 지역의 토양층에 분포하는 경향을 나타낸다.

5.2 화학성분

X-선 회절분석에 의해 분류된 4개의 광물조

합(표 1)에 해당하는 대표적인 시료에 대해 주성분의 화학분석을 행하였다(표 2). 모든 시료에서 Al_2O_3 의 함량은 14~23%정도이며 SiO_2 가 48~61%의 함량범위를 나타내었다. 그외에 Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O 및 K_2O 등의 함량은 대체적으로 적게 나타난다. 풍화작용이 가장 많이 진행된 토양에 해당되는 D type의 시료에서는 Al_2O_3 의 함량이 가장 많이 나타나는데 이는 풍화작용에 따라 카오린광물이 다량 형성

표1. 문현동 산사태지역에 나타나는 여러 가지 변질된 암석, 점토 및 토양에 대한 구성광물성분

	Sample	Occu	Qtz	Fd	Am	Chl	Mi	Epi	Kao	12 Å	14 Å	Hm
A	1	hard	+	+++	++		++					
	13	hard	++	+++	+		+					
	22	hard	++	+++	+	+	+					
	5	hard	+	++				++				
B	2-4	soft	++	++	+		+		+	+	++	
	2-5	soft	+	++	+		+		++	+	+	
	16	soft	+	++	+		+		++	+	+	
	21	soft	+	++	+		+		++	+	+	
	4-1	soft	++	++			+		+	+	+	
	3-3	clay	+	+++	+		+		+	++	+	
	3-6	soft	+	+++	+		+		+	+	++	
4-2	clay	+	+++	+		+		+	+	+		
C	2-1	clay	++	++			+		+		+++	
	2-3	clay	+	++			+		++		+++	
	3-2	clay	+	++	+				+		+++	
	20	soil	+	++	+		+		+		++	
	14	clay	+	+	+				++		+	
	2-2	clay	++	++	+		+		+		+	
	17	clay	+	+					++		+	
	3-5	clay	+	+					+		+	+
D	9-1	soil	+						++		+	+
	7-3	soil	+	+					+++		+	+
	10	soil	+	+					+++		++	+
	11	soil	+						+++		++	+
	8	soil	+	+					+++		+	+

주) Qtz:Quartz, Fd:Feldspar, Am:Amphibole, Chl:Chlorite, Mi:Mica and illite, Epi:Epidote, Kao:Kaolin mineral, 14 Å:12 Å-mineral, Hm:Hematite, Occu:Occurrence, hard: hard rock, soft rock, +++:Abundant, ++:Moderate, +Rare.

표 2. 광물조합별로 대표되는 암석 및 변질물에 대한 화학성분

	A	B	C	D
SiO ₂	57.52	51.53	51.43	48.09
TiO ₂	0.77	0.64	0.87	1.25
Al ₂ O ₃	17.99	14.75	18.43	23.57
Fe ₂ O ₃	6.71	5.81	7.36	11.09
MnO	0.10	0.12	0.12	0.10
MgO	3.79	2.68	6.31	0.93
CaO	6.92	5.06	4.70	0.54
Na ₂ O	3.18	2.48	3.64	0.08
K ₂ O	1.44	1.48	1.75	1.28
P ₂ O ₅	0.20	0.15	0.20	0.06
H ₂ O	1.36	5.09	5.10	11.61
CO ₂	0.03	0.19	0.18	0.74
Total	99.74	99.23	100.10	99.34

주) A, B, C and D indicate the types of mineral assemblages

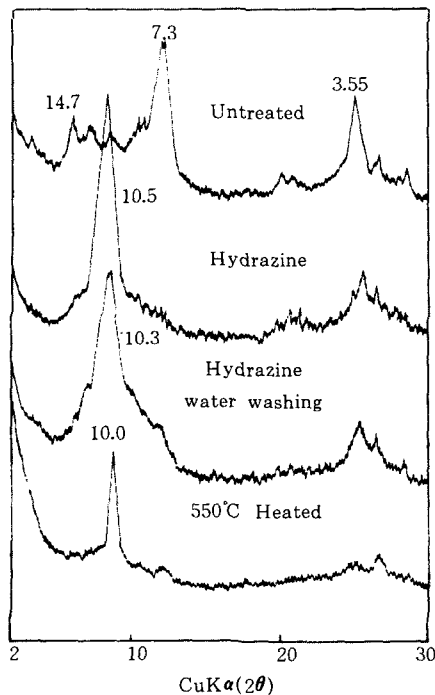


그림 3. 카올린광물을 함유하는 한 점토시료에 대해 각종 처리를 행한 후 X-선회절분석을 한 회절선.

되기 때문으로 생각된다. 그리고 이에 따라 MgO, CaO, Na₂O 및 K₂O 등의 성분이 감소하고, H₂O와 CO₂의 성분은 증가하는 것으로 일반적인 풍화작용에 의한 성분의 변화를 잘 나타낸다. A, B, C, D 조합의 순으로 CaO, MgO, Na₂O 및 K₂O 등의 성분이 대체로 감소하고, H₂O와 CO₂은 증가하는 경향을 보인다. Na₂O와 CaO함량의 감소는 변질작용이 진행됨에 따른 장석의 분해에 의한 것으로 생각된다. K₂O의 함량은 큰 변화가 없는데 이는 K가 일라이트(illite) 중에 고정되기 때문으로 생각된다. 일부 원소에 있어 함량의 변화가 다소 불규칙적으로 나타나는데, 이는 이 곳의 변질작용이 국부적이고 비교적 빠른 속도로 진행되었기 때문으로 생각된다.

6. 점토광물의 식별 및 광물학적 특성

6.1 고령석광물

고령석광물은 산사태지역 뿐만아니라 그 주변의 거의 모든 토양에서 나타나는 점토광물이다. 고령석광물 중의 카올리나이트(kaolinite)와 할로사이트(halloysite)를 식별하기 위해서 Range et al. (1969)에 의한 방법으로 하이드라진(hydrazine) 처리를 한 후 (001)면의 X-선회절선을 조사하였다. 하이드라진 처리는 65°C에서 7일간 반응시킨 후 하이드라진-카올리나이트 복합체가 형성되도록 한 후의 X-선회절선을 조사하고, 그 후 물로 세척하여 재차 분석하였다. (Range et al., 1969)에 의하면 할로사이트는 하이드라진 처리에 의해 복합체를 형성하여 7Å 회절선이 10Å 회절선으로 이동한 후 물로 세척하여도 10Å 회절선으로 남아 있는 것으로 알려졌다. 그림 3은 고령석광물을 다량 함유하는 한 시료(14번)의 X-선회절선을 나타낸 것이다. 이는 무처리시에 폭넓은 회절선을 나타내며 하이드라진 처리 후에는 10.5Å의 큰 회절선을 나타내고 이를 물로 세척한 후에도 10.3Å 회절선으로 남아있다. 또

550°C 가열처리에서는 7 Å 회절선이 완전히 소멸된다. 이러한 결과로 보아 이 시료의 7 Å 고령석광물은 할로이사이트임을 알 수 있다. D Type의 광물조합에 해당되는 적갈색 토양의 시료에 대해서도 이상과 같은 처리를 해 본 결과, 전술한 시료와는 달리 하이드라진 처리에 7 Å 회절선이 10.5 Å 회절선으로 이동하며, 물로 세척하면 7.7 Å 회절선을 다시 나타내었다. 따라서 이 고령석광물은 카오리나이트인 것으로 나타났다.

6.2 12 Å 점토광물

전술한 바와 같이 본 연구지역에는 12 Å의 회절선을 나타내는 광물이 상당량 포함된다. 이것은 풍화를 약간 받은 풍화암에서 다량 산

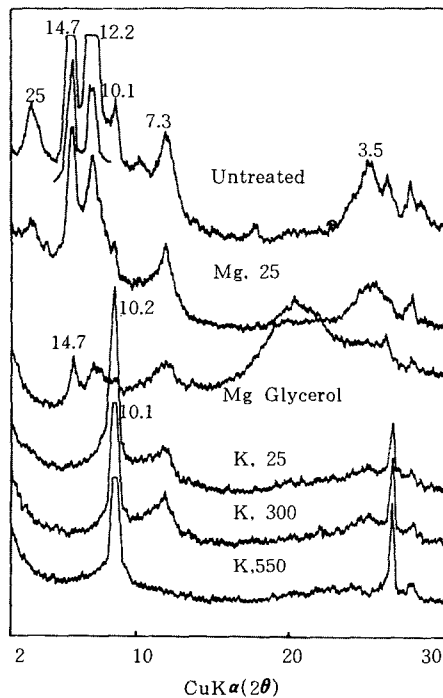


그림 4. 12 Å-광물을 포함하는 한 점토시료에 대해 각종 처리를 행한 후 X-선회절분석을 한 회절선. Mg. 25; Mg로 포화 시킨 후의 상온에서 측정, Mg Glycerol; Mg 포화 후 글리세롤 처리, K. 300; K 포화 후 300°C 가열 처리, K. 500; K 포화 후 500°C 가열 처리.

출되는 경향을 나타내고 있다. 그림 4는 12 Å 광물을 많이 포함한 한 시료를 여러가지 처리한 후의 X-선회절선이다. 이들 회절선은 Mg 포화 후에도 거의 이동하지 않고, Mg포화 후 글리세롤(glycerol) 처리에 거의 변화를 보이지 않는다. 가열처리에서 고온으로 갈수록 저면간격의 수축을 보이며, 550°C 가열처리에서 10 Å의 회절선을 나타냈다. 이 시료는 무처리에서 12.2 Å 회절선과 함께 이것의 약 2배가 되는 25 Å의 장주기반사를 나타낸다. 이러한 결과는 운모와 버미큘라이트의 중간적 성질을 나타내는 것으로 이 광물은 운모/버미큘라이트 규칙성 혼합층광물로 생각된다. 12 Å의 X-선회절선이 나타나는 시료를 입도별로 분리해서 X-선회절분석을 해보면 5~10 μm 정도의 입자가 큰 곳에서 12 Å 회절선의 강도가 크게 나타나며 0.5 μm 이하의 작은 입도에서는 거의 나타나지 않는다. 이것으로 보아 12 Å 광물의 입자는 매우 큰 것임을 알 수 있다.

이 시료에서는 12 Å 광물과 함께 14 Å, 10 Å, 7 Å 등의 많은 회절선이 나타나고 있다. 이 시료의 광물종의 식별 및 혼합층의 함량비를 검토하기 위하여 최근에 개발된 점토광물의 X-선회절선 해석에 관한 NEWMOD 프로그램(Reynold & Reynold, 1996)을 이용하였다. 그림 5에는 산사태 중심부의 한 점토시료(3-⑥ 시료)의 X-선회절선과 NEWMOD 프로그램에 의해 이 시료와 가장 유사하게 시뮬레이션한 X-선회절선을 나타냈다. 그림과 같이 두 회절선이 잘 일치하는 것으로 보아 이 시료에는 12 Å의 회절선을 나타내는 광물은 운모/버미큘라이트 혼합층광물이며 그 함량이 약 35%이며, 14 Å의 회절선을 나타내는 것은 버미큘라이트이며 그 함량이 약 20%이고, 그리고 일라이트가 15%정도의 함량을 나타내는 것을 알 수 있다. 이 시료의 운모/버미큘라이트 혼합층광물은 운모층 성분이 60%, 버미큘라이트층 성분이 40%정도인 것으로 나타났다.

6.3 14 Å 점토광물

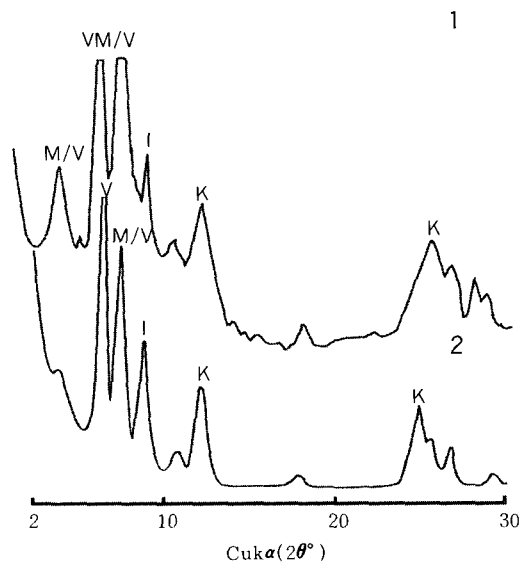


그림 5. 한 점토시료의 X-선회절선(1)과 NEWMOD 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 X-선회절선(2)의 비교.
M/V; 운모/버미큘라이트 혼합층광물,
V; 버미큘라이트, I; 일라이트, K; 카오린광물.

본 지역 대부분의 점토 중에서는 14Å 광물이 나타난다. 이들 광물의 자세한 식별을 위해 1N MgCl₂에 의한 Mg포화처리와 Mg포화 후 글리세롤 처리를 했고, 또 1N KCl에 의한 K포화 후에 300°C와 550°C의 가열처리도 하였다. 여기에서 대부분의 시료들은 Mg포화 후에도 회절선이 거의 변하지 않았고 K포화 후에는 10Å 쪽으로 이동하는 결과를 보였다. 가열처리에서는 14Å 회절선이 높은 온도로 가열할수록 조금씩 수축하고 있으며 550°C 가열처리에서는 약 10Å의 회절선을 나타냈다. 이러한 결과로 보아 이들 광물들은 버미큘라이트에 해당하는 것으로 생각된다.

14Å의 회절선을 나타내는 몇몇 시료 중에는 Mg포화 후 글리세롤 처리에서 16Å으로 약간 팽윤하는 성질을 나타냈다. 또 무처리에서 14.7Å의 회절선을 나타내어 버미큘라이트보다 약간 층간격이 크게 나타난다. 이들 시료

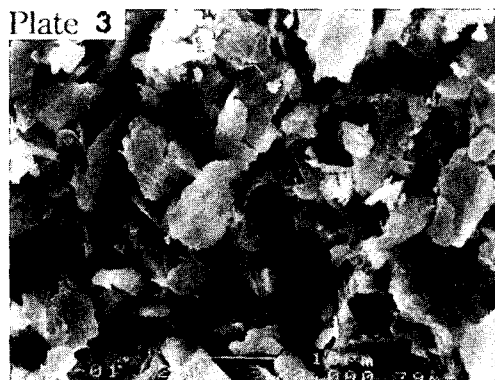


그림 6. 변질되지 않은 안산암과 풍화변질된 안산암에 대한 주사전자현미경의 사진.

- Plate 1: 변질되지 않은 경질의 안산암으로 광물의 깨끗한 벽개면과 깨진 표면이 잘 관찰됨.
- Plate 2: 약간 변질을 받은 풍화암으로 긴 튜브상의 할로이사이트가 생성되는 것이 관찰됨.
- Plate 3: 아주 풍화가 많이 진행되어 무른 상태의 암석으로 주로 얇은 판상의 점토광물들로 구성되어 있음.

는 550°C 가열처리 후에는 약 10 Å으로 수축된다.

이런 결과로 보아 이 광물은 버미큘라이트와 스멕타이트의 중간적 성질을 나타내는 버미큘라이트/스멕타이트 혼합층광물로 사료된다. 이 광물은 미끄러진 바닥면의 점토에 비교적 많이 포함된다. 이상과 같이 이 곳에서의 14 Å 광물은 버미큘라이트와 함께 버미큘라이트/스멕타이트혼합층광물이 포함된다.

6.4 기타 특성과 전자현미경 관찰

변질암석의 광물조직과 결정형태를 주사전자현미경으로 관찰하였다(그림 6). 변질되지 않은 경질암과 약간 변질된 연암 및 점토에 대해서 전자현미경으로 관찰하여 비교해 보았다. 미변질암에서는 장석의 벽개가 깨끗하게 잘 나타나고 광물입자가 치밀하게 짜여져 나타났다(그림 6-1). 약간 변질을 받은 암석에서는 긴 튜브상의 형태를 가진 할로이사이트가 장석의 표면에 성장하는 것이 잘 관찰된다(그림 6-2). 이 할로이사이트의 튜브 길이는 보통 1~3 μm 정도이며, 그 직경은 0.1~0.2 μm 정도이다. 따라서 기반암인 안산암의 초기 변질에 의해 할로이사이트가 먼저 형성되는 것으로 생각된다. 풍화가 많이 진행된 점토에는 판상의 점토광물입자가 느슨하게 결합된 형태가 관찰된다(그림 6-3). 이들 판상의 결정들은 1 μm 이하의 작은 것에서부터 10 μm 정도에 이르는 매우 큰 것들 까지 다양하다.

이 시료에는 판상의 점토광물인 일라이트, 버미큘라이트 및 운모/버미큘라이트 혼합층광물이 포함되고 있다. 이 시료에 대해 여러 단계의 입도로 분리하여 X-선회절분석을 한 결과, 입도가 큰 시료에서 운모/버미큘라이트혼합층광물의 회절선이 상대적으로 크게 증가하는 경향이 나타났다. 따라서 여기서 큰 판상의 입자는 운모/버미큘라이트혼합층광물인 것으로 사료된다.

7. 점토광물의 형성과 산사태의 발생원인에 대한 고찰

본 문헌동 산사태 지역에서 나타나는 신선한 경암, 변질암, 점토 및 토양 등에 대해 산상 및 광물성분을 검토하였다. 그 결과 변질이 진행되지 않은 암석에서는 석영, 장석, 각섬석, 운모 등이 주성분을 이루고 있으며, 그 외에 변질된 암석 및 토양에서는 고령석광물, 일라이트, 버미큘라이트, 운모/버미큘라이트 혼합층광물, 버미큘라이트/스멕타이트 혼합층광물 등의 점토광물이 다량 함유되는 것으로 나타났다. 이러한 구성광물의 성분에 따라 크게 4가지의 광물조합으로 구분되었다. 이들 광물조합에서 B와 C조합은 산사태가 일어났던 지역에 집중적으로 나타나는 경향을 보였다. 이러한 광물조합과 그 산상, 그리고 전술한 화학성분의 변화성 등으로 볼 때 A조합에서 D조합으로 갈수록 풍화에 의한 변질의 정도가 증가되는 것으로 생각된다. 이와같은 광물의 산출상태 및 특성을 근거로 하여 여기에 나타나는 광물의 형성과정을 검토해 보았다. 검토결과를 그림 7에 모식적으로 나타냈다. 미변질 경질암석에 포함되어 있는 석영은 변질암 및 토양에서도 거의 비슷한 함량을 함유하고 있어 변질에 따른 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나 사장석, 각섬석 및 운모의 광물은 변질이 많이 진행된 시료일수록 그 함량이 감소되어 나타나 변질에 따라 차츰 분해되고 대신에 점토광물이 형성되는 것으로 나타났다. 전술한 전자현미경 관찰 결과와 같이 고령석광물인 할로이사이트가 풍화의 초기단계에 가장 먼저 사장석의 분해에 따라서 점진적으로 형성된 것으로 보인다. X-선회절분석 결과 B와 C조합에 나타나는 고령석광물은 주로 할로이사이트가 많았고 일부 카오리나이트와 공존하여 나타나는 경우도 있다. 그리고 풍화가 많이 진행된 D조합의 시료에서는 카오리나이트의 함량이 많이 나타났다. 이 곳의 풍화작용에 의한 최종 산물로는 카오리나이트인 것으로 사료된다. 이

러한 풍화작용에 의한 카오리나이트의 형성은 일반적으로 잘 알려져 있다(Stoch & Sikora, 1976; Harris et al., 1985; Rebertus et al., 1986). 미변질 안산암에도 운모가 상당량 나타나며 약간 변질된 암석에서 12Å의 회절선을 나타내며 결정입자가 비교적 큰 운모/버미클라이트 혼합층광물이 상당량 산출하는 것으로 보아 주로 운모가 운모/버미클라이트 혼합층광물로 변질된 것으로 생각된다. 이 광물은 기존의 연구(Gilkes & Suddhiprakarn: 1979, Banfield & Eggleton: 1988)와 같이 버미클라이트를 거쳐 카오리나이트로 변질되는 것으로 나타났다. 그리고 대부분의 시료에 소량의 일라이트가 포함되는데 이들 일라이트는 일부의 운모와 장석에서 유래된 것으로 생각된다. 일부 시료에서 나타나는 버미클라이트/스멕타이트 혼합층광물은 운모/버미클라이트 혼합층광물이 수분의 공급이 많은 곳에서 일시적으로 생성된 것으로 보이며, 이는 버미클라이트로 변하는 과정의 중간 생성물로 생각된다. 이상과 같이 광물조합의 산상과 광물학적 특성에 따라 풍화작용에 의한 기반암의 변질과정을 나타내었다. 경암내에 황녹색을 띠는 부분에는 녹니석과 녹염석이 나타나는데 이들은 암석이 지표에 노출되기 전의 열수변질작용에 의한 것으로 생각된다. 이상과 같이 본 산사태지역에 나타나는 광물들의 생성과정이 대체적으로 파악되었다. 그러나 자세한 광물형성의 메카니즘에 대해서는 더 검토가 필요하다.

우리나라의 산사태는 7월부터 9월 사이에 84%의 발생빈도를 나타내고 산사태의 대부분이 토양성질에 따라 발생되며 사면의 경사각은 30°~35° 사이에서 산사태가 가장 많이 발생하는 것으로 알려져 있다(최 경, 1986). 본 지역의 산사태도 7월부터 8월사이의 폭우시에 발생하였으며, 본 지역의 사면 경사는 30°~40° 정도로 매우 급한 지형이다. 따라서 일반적인 산사태 발생조건에 일치한다. 특히 기반암인 안산암은 절리가 많이 발달되어 있으며 그 절리면을 따라 점토질의 변질이 잘 나타난다. 따

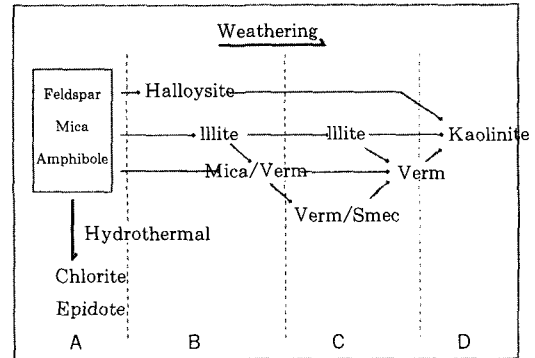


그림 7. 광물의 산출상태 및 특성 등의 검토를 근거로 하여 본 지역의 기반암인 안산암이 풍화변질을 받아 여러 가지 점토광물로 변하는 과정을 모식적으로 나타낸 그림.

라서 이러한 절리를 따라 물이 이동하기 쉬우므로 선택적인 변질작용이 일어나 많은 점토광물이 형성되게 되고 그 약한 부분이 더욱 확대되어 결국에는 이러한 절리면에 규제되어 산사태가 일어나게 된 것으로 사료된다. 산사태의 측면부를 규제하는 지질조건에는 단층, 절리, 관입암 및 층리면에 의한 규제가 있다. 본 산사태 붕괴구역의 양측면에는 절리면에 평행한 암반절벽이 발달되어 있어 이들 규제조건 중에서 두 방향으로 발달된 절리면에 의해 산사태가 규제된 것으로 사료된다.

본 지역의 중심부와 미끄러진 바닥면에 나타나는 점토에서 할로이사이트, 버미클라이트, 버미클라이트/스멕타이트 혼합층광물 등의 팽윤성 점토광물이 다량 포함된다. 이러한 팽윤성 점토광물은 수분의 흡수에 의해 쉽게 체적이 팽창하게 되므로 이러한 광물을 다량 포함하는 사면은 불안정하게 되어 결국 변형이 일어나기 쉬워진다. 일반적으로 팽윤성 점토광물인 스멕타이트가 카오리나이트 및 일라이트 등에 비해서 내부마찰각이 아주 작은 것으로 알려져 있다(Gibson, 1949). 따라서 본 지역의 산사태점토에 나타나는 점토광물은 카오리나이트 및 일라이트 보다는 전술한 팽윤성 광물이 많으므로 전단저항을 더 감소시키는 역할을

한 것으로 생각된다. 그리고 이러한 점토광물들은 절리면을 따라 다량 함유되어 있는데, 이러한 절리면에 물이 침투할 경우 이 점토부분의 간극수압은 더욱 증가하게 됨과 동시에 유효법선응력을 감소시켜 산사태 발생의 촉진제가 되었을 것으로 생각된다. 일반적으로 생각해 볼 때 균질한 점토질의 암반 보다는 오히려 경질 암석과 점토층이 혼합된 곳이 더 불안정한 사면이 될 것으로 보인다. 왜냐하면 경질 암석과 점토층이 혼합된 곳에서는 우선 점토층 속으로 물의 침투가 쉽게 일어나고, 따라서 그 점토층의 전단저항이 먼저 급격히 저하되게 되는데 이 때 상부의 경질암은 비중이 높은 암괴로서 무거워서 중력에 더욱 불안정하게 되기 때문으로 생각된다. 따라서 본 지역은 경질 암석과 함께 부분적으로 변질된 점토층을 포함하고 있기 때문에 더욱 산사태 발생에 유리하였을 것으로 생각된다.

경북 달성군 농곡면 일원에서 발생한 산사태 점토에도 버미큘라이트와 스멕타이트가 다량 함유되어 있는 것(황진연 외, 1995)으로 알려져 이러한 팽윤성 점토광물의 존재가 산사태의 발생에 매우 큰 영향을 끼친 것으로 생각된다. 또한 본 지역의 경사는 매우 급하며, 집중호우시에 산사태가 일어났기 때문에, 본 지역의 산사태는 암석의 풍화변질에 의한 팽윤성 점토광물의 형성과 절리의 발달과 같은 여러 지질학적 근본 요인과 함께, 급경사 지형 및 집중호우 등에 의한 복합적인 원인에 의해 발생한 것으로 생각된다. 따라서 산사태의 조사 및 사후 대책에 있어서 지질과 함께 점토광물에 대한 검토가 포함되어야 될 것으로 생각된다.

8. 결 론

1) 부산시 남구 문현동 산사태 지역의 기반암은 안산암으로 구성되어 있으며, 절리가 잘 발달되어 있고, 절리면을 따라서 점토화되는 변질양상이 나타난다. 특히 산사태 발생구역에서 점토가 다량 산출된다.

2) 본 산사태 지역에는 버미큘라이트, 운모/버미큘라이트 혼합층광물, 버미큘라이트/스멕타이트 혼합층광물, 일라이트, 고령석광물(할로이사이트, 카오리나이트) 등의 다양한 점토광물들이 다량 산출된다.

3) 이 곳에서 안산암의 풍화작용에 의한 변질과정은 초기단계에 할로이사이트가 형성되고 그 뒤 버미큘라이트, 운모/버미큘라이트 혼합층광물, 버미큘라이트/스멕타이트 혼합층광물, 일라이트가 형성되고 최종단계에서 카오리나이트가 형성된 것으로 사료된다.

4) 특히 산사태 발생지역의 중심부와 미끄러진 바닥면의 점토에서 팽윤성 점토광물인 할로이사이트, 버미큘라이트, 버미큘라이트/스멕타이트 혼합층광물 등이 다량 산출되었다. 따라서 이러한 점토광물은 내부마찰각이 작으며, 물을 흡수하여 체적이 팽창하게 되고 간극수압을 유발시켜 전단저항이 급격히 감소될 수 있기 때문에 산사태 발생의 근본원인을 제공한 것으로 생각된다.

5) 본 지역의 산사태는 급한 경사면, 많은 절리의 발달, 암석의 부분적 변질, 집중호우, 변질물에 포함된 팽윤성 점토광물의 요인이 복합적으로 작용되어 발생한 것으로 사료된다. 따라서 산사태의 조사 및 사후 대책에 있어서 지질과 함께 점토광물에 대한 검토도 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 과학재단의 산학협력연구비(과제번호: 97-2-05-01-01-2)의 일부 지원에 의해 연구되었으며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

1. 강위평, 우보명(1985), " '85년 7월 부산 문현동 산사태재해에 관한 연구", 한국임학회지, 70, pp.77-83.
2. 김종열, 황진연(1991), "부산시 황령산 일원의

- 환경-지질공학적 예비연구”, 부산대학교 자연 과학 논문집, 51, pp.61-70.
3. 윤성효, 김진섭(1991), “부산 전포동 구상반려 암에 대한 암석학적 지화학적 연구”, 부산대 자연과학 논문집, 52, pp.155-173.
 4. 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우(1983), “부산·가덕도폭 (1:50000)”, 한국 동력 자원 연구소, pp.2-17.
 5. 최 경(1986), “한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구”, 강원대학교 대학원 박사 학위 논문.
 6. 황진연, 김종열, 김재영(1995), “경상북도 달성군 논공면 일원에서 발생한 산사태의 원인”, *지질공학회지*, 5(3), pp.249-258.
 7. 藤原明敏(1979), “地すへりと 解析と 防止對策”, *理工株式會社*, pp.45-59.
 8. 山田剛二, 渡正亮, 小橋澄治(1977), “地すへりと 斜面崩壞の 實態と對策”, *山海堂*, pp.14-24.
 9. Banfield, J. F. and Eggleton, R. A.(1988), “Transmission electron microscope study of biotite weathering”, *Clays & Clay Minerals*, 36, pp.47-60.
 10. Egashira, K.(1992a), “An Interstratified kaolin/vermiculite-like mineral found in the clayslate layer of the Tochinoki Landslide, Kochi”, *Clay Science*, 8, pp.231-239.
 11. Egashira, K.(1992b), “Swelling chlorite as a possible alteration product of serpentinization, relating to the formation of a slip - surface in the Tochiniki landslide”, *Clay Science*, 8, pp.221-232.
 12. Gibson, R. E.(1949), Experimental determination of the true cohesion & true angle of internal friction in clays, *Geotechnique*, 1, pp.189-204.
 13. Gilkes, R. J. and Suddhiprakarn, A.(1979), “Biotite in deeply weathered granite. I. Morphologic, minerlogical, and chemical properties. II. The oriented growth of secondary minerals”, *Clays & Clay Minerals*, 27, pp.349-367.
 14. Harris, W. G., Zelazny, J. C., Baker, J. C., and Martens, D. C.(1985), “Biotite kaolinitization in Virginia Piedmont soils : I. Extent, profile trends, and grain morphological effects”, *J. Soil Sci. Soc. Amer.*, 49, pp.1290-1297.
 15. Range, K. J., Range, A. and Weiss, A.(1969), “Fire clay type kaolinite fire clay mineral? Experimental classification of kaolinite-halloysite minerals”, *Proc. Intern. Clays Conf., Tokyo, Israrel Universities Press, Jerusalem*, pp.3-13.
 16. Rebertus, R. A., Weed, S. B., and Buol, S. W.(1986), “Transformation of biotite to kaolinite during saprolite-soil weathering”, *J. Soil Sci. Soc. Amer.*, 50, pp.810-819.
 17. Reynold, R.C. and Reynold III, R.C.(1996), “NEWMOD for WINDOW. The calculation of one dimensional X-ray diffraction patterns of mixed-layered clay minerals”, *8 Brook Road, Hanover New Hampshire*, pp. 1-25.
 18. Shuzuz, H. & Nakamura, F.(1986), “For the occurrence and origin of clay layers near sliding plane in Tertiary landslide”, *J. Japan Landslide Soc.*, 23(1), pp.20-25.
 19. Shuzuz, H. & Simoda, S.(1987), “Clay minerals of landslide clays in the Kunimi area, Toyama prefecture”, *Clay Science*, 27(4), pp.211-220.
 20. Shuzuz, H.(1984), “On the relationship between smectite and clinoptilolite in some Landslides”, *J. Japan Landslide Soc.*, 21(3), pp.17-23.
 21. Shuzuz, H.(1986), “On the relationship between degree of alteration and landslides”, *J. Japan Landslide Soc.*, 22(4), pp.26-30.
 22. Stoch, L. and Sikora, W.(1976), “Transformation of micas in the process of kaolinitization of granites and gneisses”, *Clays & Clay Minerals*, 24, pp.156-162.
 23. Yoneda, T., Okawara, M. and Tada, M.(1995), “Vermiculitization of chlorite in the Myoukurasawa Landslide area, Iwate Prefecture, Japan”, *Clay Science*, 35(1), pp.24-33.

(접수일자 1998. 11. 3)