울릉도 조면암질 유리의 변질에 의한 할로이사이트의 생성

Halloysite Formation by the Alteration of Trachytic Glass in Ulleung Island

정 기 영(Gi Young Jeong)*

안동대학교 지구환경과학과
(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 울릉도의 조면암질 용회암의 저온변질작용으로 할로이사이트가 생성되었다. 할로이사이트는 자연 상태에서 수화된 상태로 발견되었으며, 양파구조의 구상 또는 가장자리가 휘어진 판상 입자로 산출된다. 할로이사이트는 Si의 함량이 고령토 광물의 이상값보다 높아서 약간의 비정질이 혼재한 것으로 해석되었다. 또한 할로이사이트의 높은 Fe 함량은 판상 할로이사이트 생성의 원인이다. 조면암질 유리가 변질되면서 용탈된 원소들이 주로 화산유리의 입간 공극에 할로이사이트로 침전되었으며, 유리를 교대한 Si가 풍부한 반구상 비정질 집합체도 부분적으로 구상할로이사이트로 변질된 것으로 보인다. 할로이사이트는 조면암질 화산활동이 활발했던 울릉도에서 화산재의 주요 변질물 중의 하나이다.

주요어 : 할로이사이트, 비정질, 화산유리, 조면암질 용회암, 울릉도

ABSTRACT : Hydrated halloysite was formed by the low temperature alteration of trachytic tuff in onion-like spherical or curly platy forms. The Si content was higher than that of ideal kaolin minerals, indicating the possible presence of amorphous materials. The high Fe content is responsible for the platy morphology of halloysite. The leached ions precipitated as halloysite filling the interparticle pores, while trachytic glass was replaced by Si-rich amorphous materials in an hemispherical form, which was further evolved into spherical halloysite. Halloysite is one of the major alteration products of the volcanic ash in Ulleung Island underwent intense trachytic volcanism.

Key words : Halloysite, amorphous, volcanic glass, trachytic tuff, Ulleung Island

서 론

우리나라 암석 내 사장석의 가장 흔한 풍화 광물은 캐올리나이트와 할로이사이트로서 고령토 광물군에 속하는 점토광물이다. 특히 사장석이 대부분인 하동-산청-합천 지역의 회장암 지대에는 풍화기원의 고령토 광상이 분포하고 있다(Jeong, 1992; Jeong and Kim, 1993; 정기영과 김수진, 1994). 고

령토 광물의 기본 구조는 Si-O 사면체판(tetrahedral sheet)과 Al-OH(O) 팔면체판(octahedral sheet)이 1:1의 비율로 결합되어 단위 층(layer)을 이루고 있으며, 적층 방식에 따라 캐올리나이트, 나크라이트, 디카이트, 할로이사이트 등의 다형이 형성된다. 이 중에서 디카이트와 나크라이트는 열수나 숙성환경에서 생성되며 풍화환경에서는 생성되지 않는다. 할로이사이트는 층과 층 사이에 물이 존재하고, 관(tube), 판(plate), 구(sphere) 등의 다양한 형태로 산출되어, 중간수가 없고 판상으로만 산출되는 다른

*교신저자: jearth@andong.ac.kr

Fig. 1. Occurrence of halloysite in the Ulleung Island. (a) Location of outcrop investigated in this study. (b) Trachytic tuff. (c), (d) Yellowish white alteration products of trachytic ash.

고령토 광물과 구분된다. 할로이사이트의 층간수는 습도에 민감하여 상온에서도 비가역적으로 탈수된다.

그 동안 국내 사장석 풍화에 관한 연구에 의하면 할로이사이트는 대부분 판 모양으로 산출된다(정기영과 김수진, 1991; 정기영과 김영호, 1996; 정기영과 이병윤, 1998; 이석훈과 김수진, 2000; 황진연 외, 2000; Jeong and Cheong, 2005). 그러나 일본 등 태평양 연안의 화산활동이 활발한 지역에서는 화산재의 변질작용으로 생성된 구상 할로이사이트가 흔히 보고되어 있다(Sudo, 1978; Nagasawa, 1978). 우리나라에서 제4기 화산재 퇴적층은 제주도와 울릉도에 분포하는데, 제주도의 현무암질 화산재의 변질 광물은 주로 스펙타이트로 보고되었다(정기영과 손영관, 2009; 정기영, 2010). 이번 연구에서 울릉도의 조면암질 응회암의 화산유리들이 변질되어 구상 및 판상 할로이사이트가 생성되었음이 발견되어 보고한다.

연구 방법

본 연구에서 분석된 시료들은 2008년 8월 13일에 채취하였다(그림 1a). 노두는 울릉군의 통구미와 사동 사이 해안도로의 가두봉 등대 부근 도로절개지의 암회색 조면암질 응회암 노두로서 지층의 경사가 매우 크다(그림 1b). 응회암에는 수 cm 정도의 암갈색 암편들이 함유되어 있고, 암편들 사이는 화산재 변질물인 연황색 점토변질물들로 충전되어 있다(그림 1c-d). 점토 변질물은 손톱으로 쉽게 해체될 정도로 약하다. 수직적인 변질 정도의 변화나 변질 전선(alteration front) 등을 확인하지는 못하였다. 이는 응회암층이 용암류나 다른 성질의 화산쇄설층들과 복잡하게 교호하고 있어서, 모암 자체가 수직적으로 불균질하기 때문이다.

시편은 약하게 파쇄한 후, 연황색 점토를 핀셋으로 분리하여 마노 유발에서 분말화하였다. 분말 시료는 안동대학교의 Rigaku Ultima IV X-선 회절분

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of bulk halloysite samples. Basal reflections of halloysite at 10.1 Å and 3.39 Å of hydrated halloysite were shifted to 7.3 Å and 3.6 Å, respectively, of dehydrated halloysite after heat treatment.

석기로 전암분말 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 분석 조건은 CuK α X선, 가속전압 40 kV, 전류 30 mA, 슬릿 2/3°~0.1 mm-2/3°, 스텝 0.2°, 주사속도 1°/min, 주사범위 3°-65° (2 θ)이었다. XRD 분석은 원시료와 350°C에서 50분간 가열한 시료에 대하여 각각 실시하였다. 주사전자현미경(SEM) 관찰과 전자현미분석(EPMA)을 위하여, 에폭시 처리한 시료로부터 연마 박편을 제작하였다. 조직 관찰은 안동대학교의 IXRF 에너지분산 X-선 분석(EDS) 장비가 부착된 TESCAN VEGA II LMU 및 JSM 6700F 기종의 SEM을 이용하여 각각 후방산란전자(BSE)상과 이차전자(SE)상 관찰에 이용하였다. EPMA 분석은 서울대학교 기초과학공통기기원의 JEOL JXA 8900R 기종을 이용하여 직경 10 μ m 빔을 이용하여 Si, Al, Fe, Mg, Ti, Na, Ca, K의 함량을 정량하였다. 점토입자의 형태 및 미세구조 관찰을 위하여, 안동대학교의 JEOL 2010 200 kV TEM을 이용하여 분석하였다.

결과 및 토의

X선회절분석

시료 채취 당시(2008년 9월)의 분말 XRD 패턴에서 10.1 Å의 강한 회절선을 볼 수 있으며, 4.43 Å의 비대칭 회절대, 그리고 3.39 및 2.56 Å의 회절선들이 관찰되어 수화 할로이사이트(hydrated halloysite)의 존재를 추정할 수 있었다(Brindley, 1980) (그림 2). 그 외 새니딘(sanidine)과 암염(halite)도 함유되어 있었다. 암염은 노두가 해변에 위치하여 해수의 영향을 받아 생성된 것이다. 시료채취 당시에는 추가 실험을 실시하지 않고, 자연 건조된 상태로 비닐 시료백에 보관되었으며, 2011년 6월에 다시 분말 XRD 분석을 실시한 결과 10.1 Å 회절선의 강도가 조금 감소하였다. 이는 수화 할로이사이트의 부분 탈수에 기인한 것일 수도 있으나, 기기 상태나 시료준비 방법에 의하여 야기될 수 있으므로 부분적인 탈수로 단정할 수는 없다. 대체로 10.1 Å 회절선이 뚜렷이 유지되고 있어서, 자연 상

Fig. 3. Transmission electron microscopy of alteration products. (a), (b) Onion-like internal structure of spherical halloysite. EDS analysis shows the Fe peak. (c) Thick and continuous lattice images of halloysite. (d) Halloysite plate with curled edges. (e) Si-rich amorphous spheres associated with an halloysite sphere (right). (f) Granular aggregates of Si-rich amorphous materials.

태에서 탈수 작용이 매우 느리게 진행됨을 알 수 있다. 수화 할로이사이트의 탈수 작용은 60°C 정도의 저온 열처리에서도 쉽게 탈수가 일어나며, 상온에서도 높은 습도가 유지되지 않으면 서서히 탈수 되고, 탈수된 할로이사이트는 다시 수화되지 않는다(Churchman *et al.*, 1972; Jeong, 1992). 따라서 장기간의 공기 노출에도 탈수가 현저하지 않음은 이 시료의 특성 중의 하나로 보인다. 한편 시료를 350°C에서 50분간 열처리한 결과, 10.1 Å 회절선이 사라지고 탈수 할로이사이트의 첫 번째 저면 회절선인 7.3 Å의 회절선이 나타났으며, 3.38 Å이 사라지고 두 번째 및 세 번째 저면 회절선인 3.60 및 2.34 Å의 회절선들이 나타났다. 따라서 XRD 분석결과를 종합하면 점토변질물은 수화 할로이사이트이다.

입자형태 및 화학조성

TEM 관찰결과, 양파 모양의 내부 구조를 가진

구상 할로이사이트를 관찰할 수 있었다(그림 3a). EDS 분석결과 Si:Al:Fe = 1:0.85:0.07 정도였으며, Al과 Fe의 합이 0.92여서 Si와 정확히 1:1의 비율이 되지 않는다. 그 외 약간의 K(0.01)과 Na(0.02)도 검출되었다. 따라서 분석된 구상 할로이사이트 입자는 순수한 할로이사이트는 아니고, 비정질 물질이 조금 혼재되어 있는 것으로 생각된다. 여러 겹의 할로이사이트 껍질로 구성된 구상 할로이사이트는 중심부에서 외각으로 갈수록 껍질의 두께가 증가하는 경향이 있다(그림 3b). 할로이사이트 껍질은 전체적으로 구형이지만 부분적으로는 여러 개의 판상 구역들로 구성된 다각형이다. 최외각 두꺼운 껍질의 격자상 관찰에서 50여 개의 7 Å 할로이사이트 단위층들이 비교적 연속성 있게 관찰되며, 격자가 연속적으로 부드럽게 휘어지며 판상 구역과 구역을 연결한다(그림 3c). 한편 완전한 구를 이루지는 못하지만, 가장자리가 휘어진 판상 할로이사이트 입자들도 관찰되었다. 이들 판상 할로이사이트의 화학조성도 구상할로이사이트와 유사하

Fig. 4. Scanning electron microscopy of the alteration of trachytic ash. (a) Altered trachytic ash. (b),(c) Inter-particle spaces almost filled with halloysite. The trachytic glass was dissolved creating internal pores (black). Si-rich amorphous hemispheres with an oscillatory zoning replaces glass (arrows). (d) Globular aggregates of platy halloysite. (e) Leached glass at the glass alteration front. (f) Amorphous precipitates with Si-rich colloform structure.

였다(그림 3d).

할로이사이트 외에 Si가 매우 풍부한 비정질도 관찰되었다. 비정질은 극미세 입상 조직을 보이는데, 완전한 구형(그림 3e) 또는 판상 집합체(그림 3f)로 산출된다. 구의 경우 내부에 누대구조의 흔적이 있기는 하나, 구상 할로이사이트처럼 분리된 겹질로 구성되어 있지 않다. 이 입자는 Si:Al=1:0.14이며, 그 외 Mg(0.03), Na(0.07), K(0.02), Fe(0.01)가 소량 함유되어 있었다. 비정질 구에 붙어 있는 할로이사이트 구도 관찰할 수 있었다(그림 3d).

변질조직

박편의 BSE상 관찰에 의하면 세립의 조면암질 화산재는 대부분 변질되어 이차침전물들로 교결되어 있다(그림 4a). 원래의 유리입자간 공극은 할로이사이트로 충전되어 있고, 유리가 단순 용해되면서 원래 유리가 있던 자리에 일부 공극들이 형성되었다(그림 4b). 그리고 Si가 풍부한 비정질이 반구

상 누대구조를 보이며 유리를 교대하며 성장되었다(그림 4b-c). 원시료의 SE상 관찰에서 관찰되는 할로이사이트의 구들은 표면이 판상체들로 피복되어 있다(그림 4d). 판상 할로이사이트는 유리를 교대하기도 하는데, 유리와 할로이사이트 사이에는 용탈유리층으로 보이는 부분이 관찰된다(그림 4e). 그 외 비정질 교질상 조직도 관찰되었다(그림 4f).

EPMA 분석에 의하면 유리는 조면암 조성으로 알칼리 원소인 K와 Na가 풍부한 반면, Ca와 Mg의 함량이 낮다(표 1). 유리의 조성은 새니딘(sanidine)의 조성과의 거의 일치한다. 변질물인 할로이사이트는 Si:(Al+Fe)=1:0.8~0.9 정도로서, TEM EDS 분석결과와 마찬가지로 Al과 Fe의 함이 Si보다 작다.

형태와 Fe 함량

할로이사이트의 높은 Fe 함량이 판상 또는 구상 형태와 관련이 있는 것으로 보인다. 표 1에서 할로이사이트의 구조 내 Fe는 $O_5(OH)_4$ 기준으로 0.18~

Table 1. Electron microprobe analysis of altered trachytic tuff

Analysis No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Oxides	Glass	Glass	Glass	Sd ¹	Sd	Ha ²	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha	Ha
SiO ₂	62.94	60.68	60.99	63.43	63.53	30.48	30.56	31.89	32.43	29.10	25.87	42.77
Al ₂ O ₃	20.73	19.81	21.60	21.49	21.55	16.98	17.18	18.73	19.32	18.54	16.83	29.28
Fe ₂ O ₃	0.51	3.65	3.51	0.35	0.43	5.93	6.12	5.15	5.48	3.44	2.90	5.56
MgO	0.00	0.38	0.54	0.01	0.00	0.88	1.19	0.88	0.73	0.47	0.49	0.84
TiO ₂	0.08	0.45	0.21	0.00	0.14	0.69	0.75	0.55	0.57	0.37	0.34	0.53
K ₂ O	6.32	6.22	4.89	5.10	4.90	0.37	0.35	0.38	0.52	0.39	0.36	0.43
Na ₂ O	6.70	5.61	3.81	6.94	6.99	0.68	0.52	0.72	1.08	0.50	0.60	0.71
CaO	0.87	1.08	1.69	1.97	1.47	0.05	0.08	0.05	0.07	0.04	0.00	0.05
Total	98.14	97.87	97.24	99.28	99.00	56.06	56.75	58.35	60.20	52.86	47.38	80.17
Cations on the basis of 14 anion charge												
Si	2.52	2.47	2.46	2.50	2.51	2.11	2.10	2.11	2.09	2.10	2.09	2.04
Al	0.98	0.95	1.02	1.00	1.00	1.39	1.39	1.46	1.47	1.58	1.60	1.65
Fe ³⁺	0.02	0.11	0.11	0.01	0.01	0.31	0.32	0.26	0.27	0.19	0.18	0.20
Mg	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.09	0.12	0.09	0.07	0.05	0.06	0.06
Ti	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
K	0.32	0.32	0.25	0.26	0.25	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03
Na	0.52	0.44	0.30	0.53	0.53	0.09	0.07	0.09	0.13	0.07	0.09	0.07
Ca	0.04	0.05	0.07	0.08	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(Al+Fe)/Si	0.39	0.43	0.46	0.40	0.40	0.80	0.81	0.81	0.83	0.84	0.85	0.90

¹Sanidine, ²Halloysite

0.32 사이다. 구조 내 Fe는 팔면체층과 사면체층 사이의 크기 불일치를 완화하여 할로이사이트가 판상 형태를 갖게 한다(Bailey, 1993). Noro (1986)의 동일한 변질 응회암 내 다양한 형태 할로이사이트의 EDS 분석에 의하면 판상 할로이사이트는 $O_5(OH)_4$ 기준으로 Fe의 개수가 0.15이고, 짧은 판상 할로이사이트는 0.06이었다. 따라서 울릉도 구상 할로이사이트의 Fe 함량은 할로이사이트가 판상 형태를 갖기에 충분하다.

생성과정

화산유리는 열역학적으로 불안정하여 저온환경에서도 물과 반응하여 매우 쉽게 변질된다. 우리나라에서 화산유리의 초기 변질작용은 제주도의 현무암질 화산쇄설암에 대하여 최근 광물학적으로 연구된 바 있는데, 지하수와 반응에 의한 육상 변질광물로서 스�멕타이트와 불석, 그리고 비정질 물질이

생성되었다(정기영, 2009; 정기영과 손영관, 2009; 정기영, 2010; 정기영 외, 2010). 이 연구에 의하면 순수한 스�멕타이트가 변질 중인 현무암질 화산유리 편 사이의 공극을 충전하였으며, 화산유리 자체는 스�멕타이트와 비정질 물질로 교대되었다. 울릉도의 화산유리 변질작용에서도 주요 변질광물로 스�멕타이트가 생성될 것으로 예상되었으나, 분석결과 할로이사이트가 주요 변질광물이었다. 할로이사이트가 산출된 울릉도 응회암은 주로 조면암질 화산유리로 구성되어 있다. 스�멕타이트의 생성에는 Mg 이온이 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 모물질인 화산유리에서 Mg의 결핍이 스�멕타이트가 생성되지 않은 원인 중의 하나인 것으로 추측된다(Harder, 1972; Siffert, 1978).

할로이사이트가 변질광물이라는 사실을 제외하면, 전반적인 변질과정은 제주도에서 관찰된 현무암질 화산유리의 변질과정과 매우 유사하다. 즉 변질 중인 화산유리의 표면에 Si가 풍부한 얇은 용탈

유리층이 생성되며(그림 4c), 용탈된 원소들이 화산 유리 사이의 공극에 할로이사이트로 침전되었다(그림 4c). 한편 그림 3c에서 동심원상 구조를 갖는 비정질과 할로이사이트 구가 같은 집합체를 형성하고 있음은 이들이 성인적으로 관련되어 있을 가능성을 시사한다. 즉 구상 할로이사이트의 일부는 Si가 풍부한 누대구조의 비정질(그림 4c)이 결정화되어 형성된 것으로 보인다. 제주도의 변질 현무암 유리의 다공성 용탈유리층이 약간의 화학적 변화를 거쳐 진동누대구조의 비정질로 변화하며, 이는 다시 스멕타이트로 결정화하는 현상이 관찰되었다(Jeong and Sohn, 2011). 이상의 변화과정을 확인하기 위한 초박편의 미세 TEM 연구가 향후 시행되어야 한다.

할로이사이트의 생성환경을 유추하기 위해서는 노두에서 변질의 경향성을 파악해야 한다. 그러나 화산쇄설암의 불균질한 암상 때문에 할로이사이트를 생성시킨 변질작용이 토양대의 풍화작용인지 또는 속성작용인지 판단할 근거가 부족하다. 그러나 열수 광물들이 관찰되지 않기 때문에 열수 변질 가능성을 제외하면, 풍화이든 천부 속성변질작용이든 지표수와 응회암의 저온상호작용에 의하여 변질된 것으로 보인다. 본 연구에서 조사한 노두뿐만 아니라 여러 개의 유사한 조면암질 응회암 노두 시료의 XRD 분석에서 할로이사이트가 확인되므로 할로이사이트는 조면암 화산활동이 활발했던 울릉도 화산재 퇴적층의 대표적인 저온 변질광물로 추정된다. 또한 Quantin *et al.* (1988)도 이탈리아에서 조면암질 부식의 풍화작용에 의한 구상 할로이사이트의 생성을 보고한 바 있어서, 조면암질 화산재의 풍화에 의한 할로이사이트의 생성은 일반적인 현상일 것으로 보인다. 현무암질 화산재 변질과 비교하면 변질 조직은 매우 유사하나, 생성되는 광물의 종류와 비정질의 화학 조성에서 차이가 있으며, 이는 변질 모물질인 화산재 화학조성의 차이에 기인한다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 지원(R01-2005-000-10181-0, 제주도와 울릉도의 용암과 화산쇄설암의 퇴적학, 광물학, 지구연대학)을 받아 수행되었다. 원고의 미비점을 지적하여 주신 두 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

이석훈, 김수진 (2000) 유구지역 화강암질 편마암의 풍화작용에 의한 광물조성의 변화. 한국광물학회지, 13,

- 121-137.
 정기영 (2009) 제주도 신양리층에서 산출하는 Motukore-aite와 Quintinite. 한국광물학회지, 22, 307-312.
 정기영 (2010) 제주도 우도 현무암질 화산재의 표성 변질작용. 한국광물학회지, 23, 141-150.
 정기영, 김수진 (1991) 산정할로이사이트의 투과전자현미경 연구. 한국광물학회지, 4, 51-55.
 정기영, 김수진 (1994) 산청지역 고령토의 성인: 광물 및 조직분석 연구. 지질학회지, 30, 262-283.
 정기영, 김영호 (1996) 화강암 풍화과정에서 생성되는 할로이사이트 입자 및 집합체의 형태. 한국광물학회지, 9, 64-70.
 정기영, 손영관 (2009) 제주도 홀로세 하모리층의 현무암질 유리 변질과 고화작용. 지질학회지, 45, 332-344.
 정기영, 이병운 (1998) 팔공산 화강암 내 사장석의 풍화. 지질학회지, 34, 44-57.
 정기영, 손영관, 전용문 (2010) 제주도 화산쇄설암의 불석광물. 한국광물학회지, 23, 39-50.
 황진연, 장명익, 김준식, 조원모, 안병석 (2000) 우리나라 황토(풍화토)의 구성광물 및 화학성분. 한국광물학회지, 13, 147-163.
 Bailey, S.W. (1993) Review of the structural relationships of the kaolin minerals. In: Murray, H., Bundy, W., and Harvey, C. (eds.), *Kaolin Genesis and Utilization*, Special Publication No. 1, The Clay Minerals Society, Boulder, Colorado, 25-42.
 Brindley, G.W. (1980) Order-disorder in clay mineral structures. In: Brindley, G.W. and Brown, G. (eds.), *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification*. The Mineralogical Society, London, UK, 125-196.
 Churchman, G.J., Aldridge, L.P., and Carr, R.M. (1972) Relationship between the hydrated and dehydrated states of an halloysite. *Clays and Clay Minerals*, 20, 241-246.
 Jeong, G.Y. (1992) Mineralogy and Genesis of Kaolin in the Sancheong District, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 325p.
 Jeong, G.Y. and Cheong, C.-S. (2005) Recurrent events on a Quaternary fault recorded in the mineralogy and micromorphology of a weathering profile, Yangsan Fault System, Korea. *Quaternary Research*, 64, 221-233.
 Jeong, G.Y. and Kim, S.J. (1993) Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by weathering of anorthosite in Sancheong area, Korea. *Clays and Clay Minerals*, 41, 56-65.
 Jeong, G.Y. and Sohn, Y.K. (2011) Microtextures, microchemistry, and mineralogy of basaltic glass alteration, Jeju Island, Korea with implications for elemental

- behavior. *American Mineralogist*, 96, 1129-1147. DOI: 10.2138/am.2011.3677.
- Harder, H. (1972) The role of magnesium in the formation of smectite minerals. *Chemical Geology*, 10, 31-39.
- Nagasawa, K. (1978) Weathering of volcanic ash and other pyroclastic materials. In: Sudo, T. and Shimoda, S. (eds.), *Clays and Clay Minerals of Japan*, Kodansha Ltd., Tokyo, Japan, 105-126.
- Noro, H. (1986) Hexagonal platy halloysite in an altered tuff bed, Komaki City, Aichi Prefecture, central Japan. *Clay Minerals*, 21, 401-415.
- Quantin, P., Gautheyrou, J., and Lorenzoni, P. (1988) Halloysite formation through *in-situ* weathering of volcanic glass from trachytic pumices, Vico's Volcano, Italy. *Clay Minerals*, 23, 423-437.
- Siffert, B. (1978) Genesis and synthesis of clays and clay minerals: recent development and future prospects. In: Mortland, M.M. and Farmer, V.C. (eds.), *Proceedings of the VI International Clay Conference 1978, Developments in Sedimentology*, 27, Elsevier, Amsterdam, 337-347.
- Sudo, T. (1978) An outline of clays and clay minerals of Japan. In: Sudo, T. and Shimoda, S. (eds.), *Clays and Clay Minerals of Japan*, Kodansha Ltd., Tokyo, Japan, 1-104.

접수일(2010년 6월 10일), 수정일(1차 : 2011년 6월 24일),
게재확정일(2011년 6월 27일)