

## 오야응회암의 지화학적 풍화 열화 특성과 변질작용

추창오<sup>1)</sup> · 정교철<sup>\*1)</sup> · 오대열<sup>2)</sup> · 김종태<sup>1)</sup> · T. Seiki<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>안동대학교 지구환경과학과, <sup>2)</sup>대구공업대학 토목건설과,

<sup>3)</sup>일본 우츠노미야대학 토목공학과

## Chemical Weathering Deterioration of Oya Tuff and Its Alteration to Zeolitic Materials

Chang Oh Choo<sup>1)</sup> · Gyo-Cheol Jeong<sup>\*1)</sup> · Dae Yul Oh<sup>2)</sup>

Jong-Tae Kim<sup>1)</sup> · T. Seiki<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Daegu Technical College

<sup>3)</sup>Dept. of Civil Engineering, Utsunomiya University, Japan

일본 오야응회암의 역학적 특성에 영향을 주는 화학적 풍화 열화 및 변질작용을 고찰하였다. XRD회절분석과 전자현미경분석 결과, 오야응회암은 제올라이트 광물인 클리네틸로라이트를 상당량 포함하고 있으며, 석영, 사장석, 정장석, 모오데나이트, 오팔C-T, 스멕타이트를 수반한다. 풍화된 응회암에서 석영의 함량감소 정도는 비교적 적으나, 장석의 함량감소가 뚜렷하므로 화산유리질과 장석으로부터 실리카, 알루미늄 및 알칼리원소가 공급되어 추가적인 제올라이트가 형성된 것으로 볼 수 있다. 신선한 오야응회암의 경우, 이미 형성과정동안 상당한 양(30~50%)이 제올라이트화한 것으로 볼 때, 물이나 습기에 이 암석이 노출된다면 쉽게 풍화, 변질되어 이 암석의 강도는 급격히 감소할 것으로 예측된다. 화산성 기질과 반정간 광물조성과 화학조성의 차이로 인하여 동일한 시료내에서도 풍화, 변질되는 양상은 서로 상이할 것으로 예측된다.

**주요어 :** 오야응회암, 풍화, 클리네틸로라이트, 모오데나이트

This study was performed to relate the weathering properties of Oyaish tuff from Japan to mechanical properties of rocks in terms of mineralogical alteration and chemistry. The tuff is composed of clinoptilolite, quartz, feldspars, mordenite, opal C-T, and smectite. Since fresh tuff contains approximately 30~50% zeolite, it is expected that the rock is subjected to weathering process ascribed to water contents on earth surface, significantly reducing mechanical strength of tuff. It is also anticipated that weathering process and properties may be different even in the same rock mass, due to the differences in local mineralogy, chemistry and microtextures in tuff.

**Key words:** Tuff, Chemical weathering, Clinoptilolite, Mordeniteth

\* Corresponding author: jeong@andong.ac.kr

## 서 언

풍화암석의 함수율, 함수광물비, 공극율 변화, 간극 율, 절리 발달과 점토광물비는 풍화도에 따른 지하담 지반으로서의 체적함수비 및 암석의 역학적 특성에 밀접한 영향을 준다. 암석의 동결 융해와 건습의 반복에 기인하여 발생하는 사면, 지하공간, 대규모 토목시설, 터널 등 암반구조물의 안정성 문제점은 역학적 요소와 풍화에 따른 이차광물의 형성과 관련된다. 암체의 미세조직 변화와 풍화작용을 결정하는 근본적인 메카니즘은 암석과 풍화도의 강도, 함수율, 공극비, 미세절리 발달분포 등과 같은 역학적 특성까지도 밀접히 관련된다. 따라서 풍화암석의 경우 광물의 분해과정, 이차광물의 침전 및 이들의 상호 화학반응과 역학적 특성과의 관련성에 대한 검토가 요구된다.

제올라이트질 응회암은 전세계적으로도 광범위하게 분포하는데, 성인과 형성과정이 다양함에도 불구하고 선사시대부터 건축재료로 널리 사용되어져 왔다. 일본의 경우 유럽에 비하여 그 활용도가 제한적이나, Tochigi 현의 Utsunomiya 시에서 Oyaish라는 응회암을 사용해 오고 있다. 이 응회암은 클리노틸로라이트(*clinoptilolite*)와 모오테나이트(*mordenite*)로 구성되는데 주로 건축 자재용으로 쓰이거나, 역사적으로는 고분, 불상, 사탑에 주로 사용되었으며, 19세기에 들어서는 도쿄의 Teikoku호텔 건축에 사용된 바 있다. 국내에서는 화산응회암 또는 화산쇄설성 암석의 역학적 특성에 관한 연구가 수행된 바 있으나(이정인, 1982; 정형식과 유병옥, 1997; 김해경 외, 2004), 지표에 노출되거나, 지하 천부환경에서 응회암의 역학적 특성에 큰 영향을 미치는 풍화현상과 관련된 연구는 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 지표에 노출된 오야 응회암을 대상으로 풍화에 따른 지화학적, 광물학적 특성을 밝히고, 이를 통하여 역학적 특성변화와의 관련성에 관한 기본적인 근거자료를 제공하고자 한다.

## 시료 및 실험방법

최근에 지하터널에서 채굴된 신선한 응회암과 현재 지표상에 노출되어 풍화작용을 겪고 있는 응회암을 대상으로 채취하였다. 후자의 경우 위 지역에서 건축재료로 사용된 지 70년이 경과한 시료에 해당하는데, 자연적인 풍화작용을 겪고 있는 암석으로 볼 수 있다.

오야 응회암시료를 가로, 세로 각 4.5 cm 크기의 정육면체로 채취하고, 각 방향에 따라 두께 1cm로 절단하여 풍화특성을 연구하였다(Fig. 1). 풍화된 응회암은 신선한 응회암 보다는 덜 치밀하며, 회색의 바탕에 연 녹색 내지 녹회색의 반점이 특징적이다. 함철광물이 있던 부분은 담갈색으로 풍화되어 이차광물로 변질되거나, 결정이 탈락되어 빠져나간 자리에 동공이 형성되어 있다.

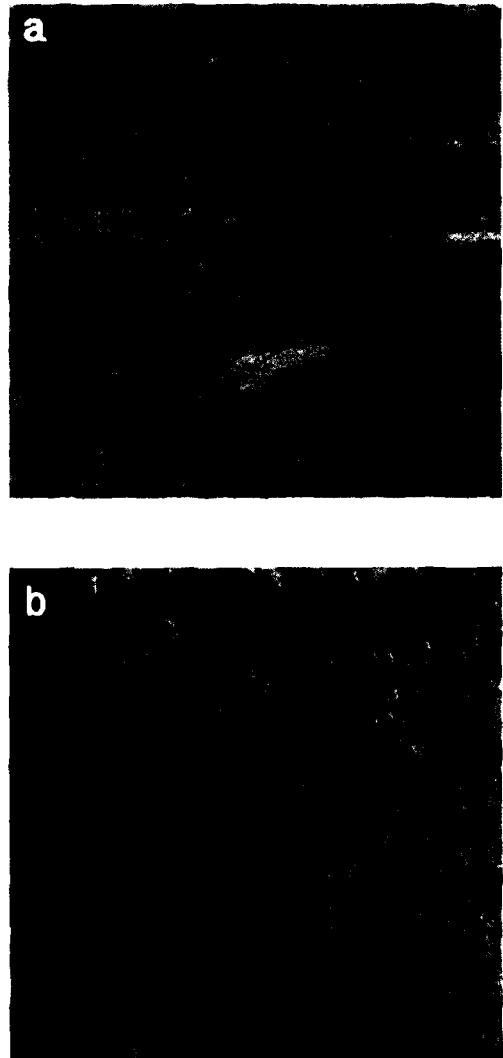


Fig. 1. Slab of tuffs with faces of 4.5cm-length. (a) fresh tuff. (b) Weathered tuff(sample 1-1) showing dark brown cavity and less dense surface.

편광현미경으로써 풍화단계에 따른 암석의 물리적 미세균열의 발달상태를 관찰하여 응회암의 조직변화의 특징을 관찰하였다.

각 응회암 시료의 일부를 분말상태로 제작하여 X-선 회절분석(X-Ray Diffraction, XRD)을 통하여 응회암을 구성하고 있는 광물조성을 분석하였다.  $CuK\alpha$  파장을 이용하여 5-65도  $2\theta$  구간에서 분당 5도 속도로 0.05도 간격으로 스캔하였다.

풍화단계에 따른 미세조직의 발달특징과 조직관찰은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 이용하였으며, 구성하는 광물들의 화학성분 분석을 수행하였다. 이를 위하여 JEOL사의 JSM-6300과 이에 장착된 에너지분산 스펙트럼(Energy Dispersive Spectrum, EDS)을 이용하여 응회암의 화학조성을 분석하였다.

응회암의 풍화에 따른 미세조직 관찰과 이차적 변질광물의 동정, 화학성분 분석을 위하여 전자현미경 분석(Electron Microprobe, EPMA)을 실시하였다. 연마편을 제작한 후, Shimadzu EPMA-1600을 이용하여 후방산란 전자영상(Back Scattered Electron Image, BSE)으로써 미세조직을 관찰하고, 주요 광물과 기질에 대하여 EDS분석을 실시하여 반정량 화학분석을 수행하였다.

## 결과 및 토의

### 현미경적 조직특징

본 응회암은 주로 석영, 사장석, 정장석, 제올라이트 등으로 구성되며, 소량의 중정석(barite)이 포함된다. 기질(groundmass) 부분의 경우 현미경상으로는 개별 입자의 구분이 어려우며 대부분 심하게 변질되어 있다. 반정결정은 주로 아각상(subangular)이 주를 이루는데 석영과 장석은 일부 변질되어 있거나 가장자리 부분에서 용식조직(corroded texture)을 나타낸다(Fig. 2). 어떤 장석은 결정 내부가 점토질 광물로 심하게 변질되어 있어서 가장만을 유지하기도 한다. 본 응회암에서 암편의 존재는 거의 확인이 안 되며, 유리질인 기질부분의 양이 가장 많은 상태이므로 암석학적 분류상으로는 유리질 응회암(vitric tuff)에 해당한다.

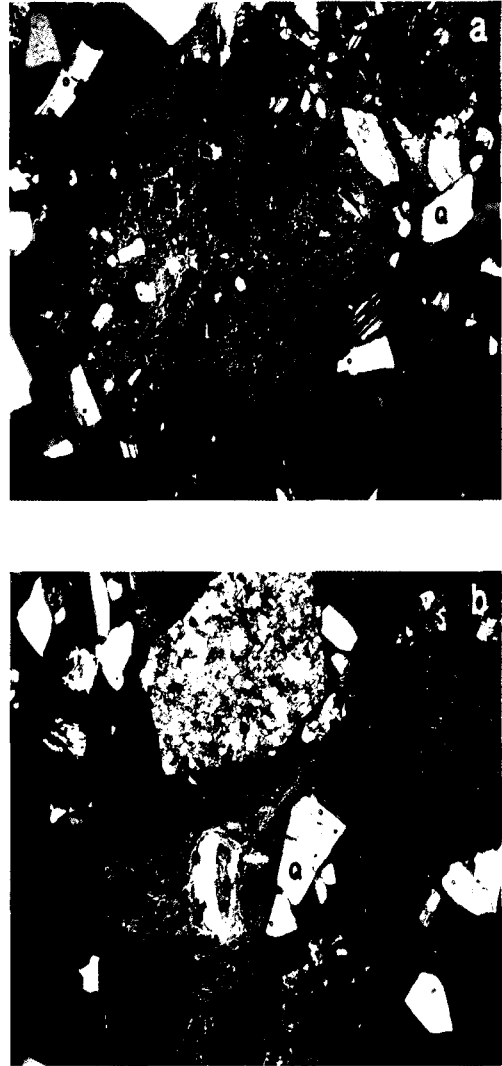


Fig. 2. Photomicrographs of weathered tuff(sample 1-1). (a) Phenocrysts of plagioclase(P) and quartz(Q). (b) Intensively altered phenocryst and groundmass.

### XRD 분석결과에 의한 광물조성

XRD회절분석 결과, 오야응회암은 제올라이트 광물인 클리네틸로라이트를 상당량 포함하고 있으며 석영, 장석, 스멕타이트, 모모테나이트 등이 수반된다(Fig. 3). 따라서 오야응회암은 제올라이트질 응회암(zeolitic tuff)으로 볼 수 있다. 신선한 응회암의 경우 석영, 장석의 함량이 가장 높고, 그 다음으로 클리네틸

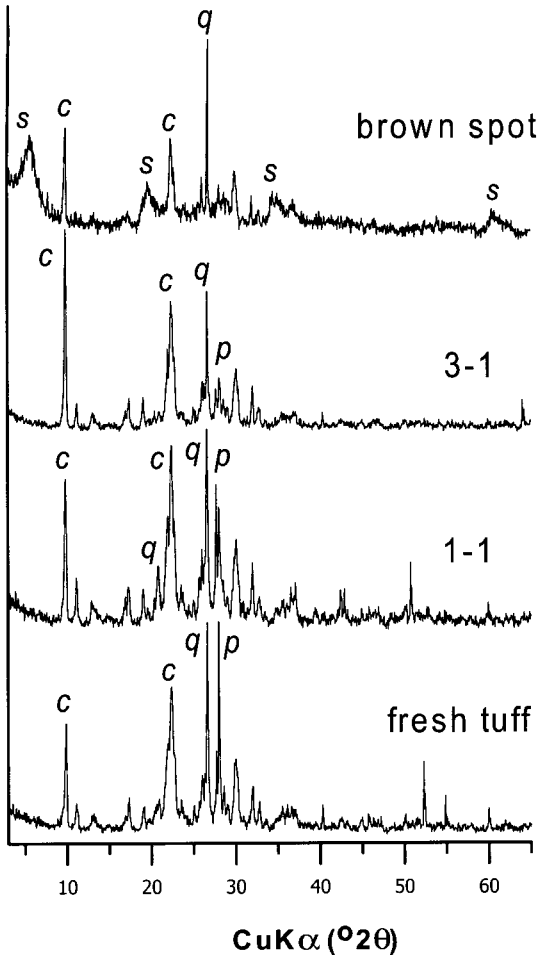


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of tuffs. c: clinoptilolite, p: plagioclase, q: quartz, s: dioctahedral smectite.

로라이트의 함량이 높다. 신선한 암석에 비하여 풍화가 진행된 응회암에서는 석영과 장석의 회절선이 감소하는 반면에 클리노틸로라이트의 회절선은 크게 증가한다. 특히 3-1 시료에서는 사장석의 함량이 대폭 감소하면서 클리노틸로라이트의 함량은 상대적으로 가장 높게 나타난다. 제올라이트는 응회암이 형성될 당시, 또는 그로부터 지질시대를 겪어 오는 동안에 속성작용과 같은 조건하에서 반정과 기질물을 이루고 있던 장석과 석영으로부터 제올라이트가 생성되는 것이 일반적이다. 즉 반정과 기질물을 이루고 있던 장석과 석영으로부터 빠져 나온 실리카, 알루미늄, 및 알칼리 원소로부터 제올라이트가 형성된다. 그런데 본 시료에서처럼 풍화암에서 제올라이트의 함량이 상대적

로 높고 석영과 장석의 함량이 크게 감소하는 현상은 다음과 같은 두 가지의 해석으로 설명할 수 있다. 첫째, 풍화과정 동안 분해, 용해되어 석영과 장석이 상대적으로 불안정하여 실제로 이들의 함량이 감소한 것일 수 있다. 둘째, 장석은 풍화동안 특히 심하게 용해되었으므로 이 과정에서 제올라이트의 형성정도는 석영과 장석에 비하여 상대적으로 증가한 것으로 볼 수 있다. 그런데 석영은 풍화에 강하고 상온에서의 용해도는 낮으므로 이것이 실제로 용해되어 그 함량이 감소한 결과로 보기 어렵다. 그 보다는 제올라이트 형성에 필요한 실리카는 응회암내 풍부한 화산유리질 성분이 보다 쉽게 용해되어 공급된 것으로 보아야 타당할 것이다. 풍화된 응회암에서 석영의 함량감소 정도는 비교적 적으나, 장석의 함량감소가 뚜렷하므로 화산유리질과 장석으로부터 실리카, 알루미늄 및 알칼리 원소가 공급되어 제올라이트가 형성된 것으로 볼 수 있다. 따라서 두 번째 해석이 더욱 타당하다.

철, 마그네슘 광물의 반정은 풍화작용을 겪으면서 적갈색 내지 담갈색의 미세한 점토광물의 집합체로 변질되어 있는데, 이런 곳은 주로 스멕타이트 광물이 형성되어 있으며, 제올라이트가 소량 수반된다. 스멕타이트의 경우 (060)회절선이 1.5Å에서 나타나므로 이판면체(dioctahedral) 구조를 가지는 점토광물 종류로 감정된다. 대표적인 이판면체 스멕타이트 광물에는 몬모릴로나이트(montmorillonite), 베이델라이트(beidellite) 및 논트로나이트(nontronite) 등이 있는데 본 시료에서 관찰된 이판면체형 스멕타이트는 몬모릴로나이트일 가능성이 높다. 몬모릴로나이트와 제올라이트는 각각 약알칼리와 강알칼리 환경에서 안정한 것으로 알려져 있으나 pH의 주기적인 변동에 따라 이들이 혼재하기도 한다(노진환과 고상모, 2004). 스멕타이트는 풍화작용을 통하여 제올라이트로 전이되기도 하며, 알칼리 환경이나 Na 함량이 높은 용액에서의 환경에서도 서로 혼하게 나타난다. 제올라이트질 응회암에서 화산유리질 성분과 공극수와의 반응초기에는 몬모릴로나이트가 생성되나, 화산유리질이 가수, 변질작용을 겪으면서 제올라이트가 형성된다(Noh and Boles, 1989). 그런데, 풍화된 오야응회암의 반정내 함철광물은 풍화작용동안 스멕타이트화 하였고 부분적으로 제올라이트가 관찰되므로 일반적으로 형성되는 과정과 반대의 경향을 나타내고 있다.

후방산란전자영상(BSE)과

주사전자현미경(SEM)에 의한 미세조직의 특징

후방산란전자영상(Back Scattered Electron Image, BSE)으로 풍화된 응회암(1-1 시료)을 관찰한 결과, 제올라이트, 중정석(barite), 석영, 장석류가 인지된다. 화산유리질의 기질은 일정한 방향으로 배열되어 엽층리(lamina)조직을 보이며, 입자가 수십 $\mu$ m로 조금 조립질인 부분은 가장자리가 날카롭게 용식된 유리질 shard로 구성된다(Fig. 4). 에너지분산 스펙트럼(Energy Dispersive Spectrum, EDS) 분석결과에 따르면 화산유리질이 있는 부분에서는 실리카의 함량이 높고, 반정 부분에서는 약간 낮게 나타난다. 그러나 반정에서는 Na, Ca, 및 Al이 상대적으로 낮게 나타나 이 광물이 사장석임을 알 수 있다. 그렇지만 사장석은 내부가 변질되어 불균일한 화학조성을 가지며, 결정의 가장자리도 불규칙한데 이는 풍화변질, 또는 응회암이 형성되는 당시 내지 그 직후에 변질작용을 받았음을 지시하는 것이다. 화산유리질 부분은 실리카 이외에도 Al, Na, Ca로 구성되므로 화학조성상으로 제올라이트에 해당한다. 따라서 응회암내 기질부분은 현미경적 조직에서도 인지되었듯이 상당부분이 제올라이트화한 상태이다.

주사전자현미경 관찰에 따르면 응회암내 기질과 반정은 여러 광물로 구성되며, 다양한 조직을 나타낸다. 응회암은 석영, 사장석, 정장석, 제올라이트 광물인 클리네텔로라이트와 모오데나이트, 오팔C-T, 스멕타이트로 구성된다. 특히 정장석은 결정형이 완전정질로서 K, Al, Si로 구성되는데, 이는 응회암이 형성될 당시에 생성된 것이다. 스멕타이트는 기질이나 장석이 변질된 부분에서 부분적으로 소량 나타난다.

신선한 응회암의 경우(Fig. 5), 클리네텔로라이트는 결정외형이 뚜렷한 상태로 동공내에서 형성되어 있다. 화산유리질 부분은 엽층리구조를 보이거나 길게 일정한 방향으로 배열되는데 대부분 치밀한 상태이지만 국부적으로는 용식된 부분도 있다. 오팔C-T는 지름 20 $\mu$ m내외의 구형으로서 결정의 가장자리에서 부분적으로 용해된 조직이 관찰된다. 이는 클리네텔로라이트나 화산유리질 부분에서 함께 잘 나타난다.

풍화된 응회암에서는 시료에 따라 다양한 변질, 용해조직이 나타난다. 제올라이트는 판상 내지 주상, 또는 침상의 결정형을 보이는데, 판상 내지 주상형은 클리네텔로라이트, 그리고 침상형은 모오데나이트이다.

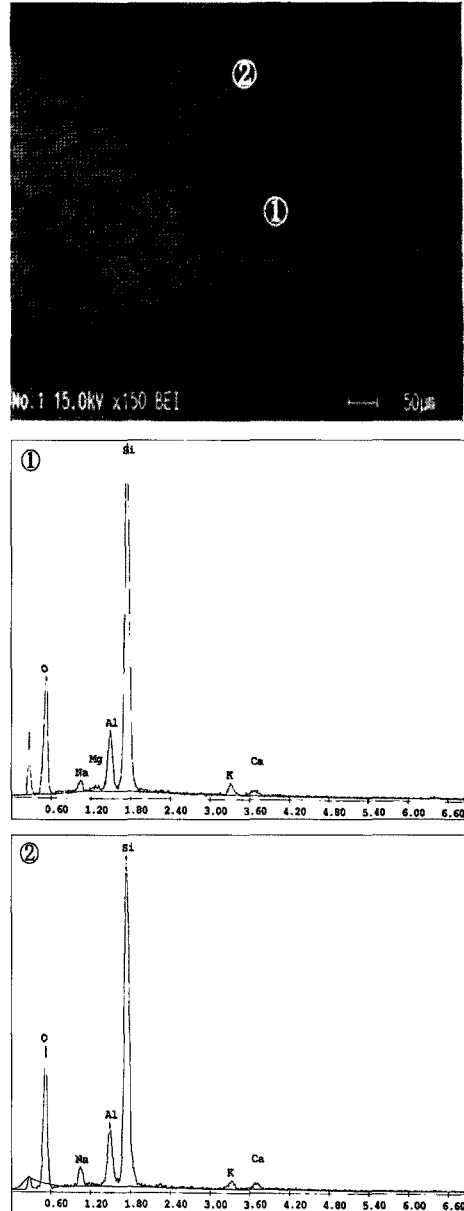
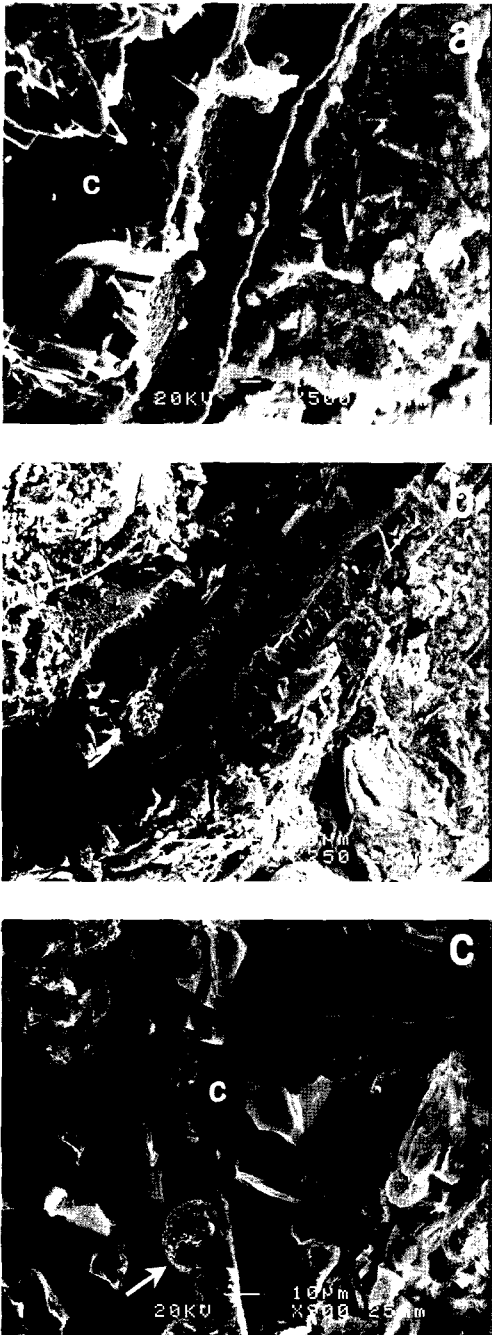


Fig. 4. BSE image and EDS patterns of tuff(sample 1-1). Layered glassy part(number 1) with O 35.08, Na 1.80, K 3.21, Ca 1.73, Mg 0.57, Al 8.01, Si 49.60 wt.% and phenocryst(number 2) with O 37.16, Na 3.04, K 2.29, Ca 2.07, Al 8.30, Si 47.14 wt.%.



**Fig. 5.** SEM images of fresh tuff. (a) Well-crystallized clinoptilolite formed in vug and volcanic glass. (b) Volcanic glass shows laminations. (c) Clinoptilolite(c) and volcanic glass. Note altered opal C-T spherule which is indicated as an arrow.

1-1시료의 경우 석영 반정은 심하게 용식되어 가장자리 부분은 심한 요철을 보이며, 사장석 반정의 경우 벽개를 따라서 용해동공이 발달하고, 결정의 형태는 심하게 변질되어 있다(Fig. 6). 화산유리질의 기질부분은 수십  $\mu\text{m}$  직경의 용해동공이 특히 발달하는데 실리카가 용해된 부분에 해당한다. 일부의 용해동공 내부에는 모오테나이트가 형성되기도 한다. 응회암의 형성 당시에 이차적으로 생성된 정장석은 결정형이 완정질로서 풍화에 의한 변질특성이 거의 나타나지 않으며, 비교적 신선한 상태를 보인다. 3-1시료와 같이 화산유리질의 엽층리가 잘 나타나는 응회암의 경우 기질내 미세입자들의 배열 방향성은 비교적 잘 유지되고 있다(Fig. 7). 그러나, 풍화에 의한 용식조직은 잘 나타나는데, 이는 실리카 성분이 빠져 나간 증거로 볼 수 있다. 특히 용해동공의 내부에서는 결정의 형태가 불규칙한 실리카 기질에 벌집모양(honeycomb)의 미세한 용식조직이 특징적으로 나타난다. 기질부에서 덜 치밀한 변질부분에서는 클리네토로라이트가 주상내지 판상형으로 나타난다. 특히 그 주변부에는 불규칙한 형태의 미세한 함철마그네슘 광물의 집합체가 발달되어 있는데, 이는 풍화작용 동안 형성된 것으로 보인다.

클리네토로라이트는 대부분 판상형으로서 다각형의 결정형태를 띠는데, 두께  $5\mu\text{m}$ , 직경  $20\sim 50\mu\text{m}$  내외의 크기가 일반적이다. 모오테나이트는 평균 직경이  $1\mu\text{m}$  이하의 극세사 실타래처럼 얽혀 있는 섬유상 내지 침상의 형태를 띠며, 길이는 수십  $\mu\text{m}$  이상으로 길게 성장한 것이 특징적이다. 모오테나이트는 특히 실리카 기질의 용해동공에서 다발로 형성되거나, 클리네토로라이트의 결정이 변질된 가장자리에서 성장한다. 따라서 모오테나이트는 이 응회암에서 변질작용에 따른 최후기의 산물에 해당된다. 모오테나이트가 클리네토로라이트에 비하여 후기에 형성되는 특징은 활성적인 열수순환 환경에서 온도가 점차 낮아지면서 형성되기도 한다(Pe-Piper, 2000). 규질성분이 부화될수록 클리네토로라이트가 형성되며, 그 후에는 점차 모오테나이트가 형성된다(노진환과 고상모, 2004).

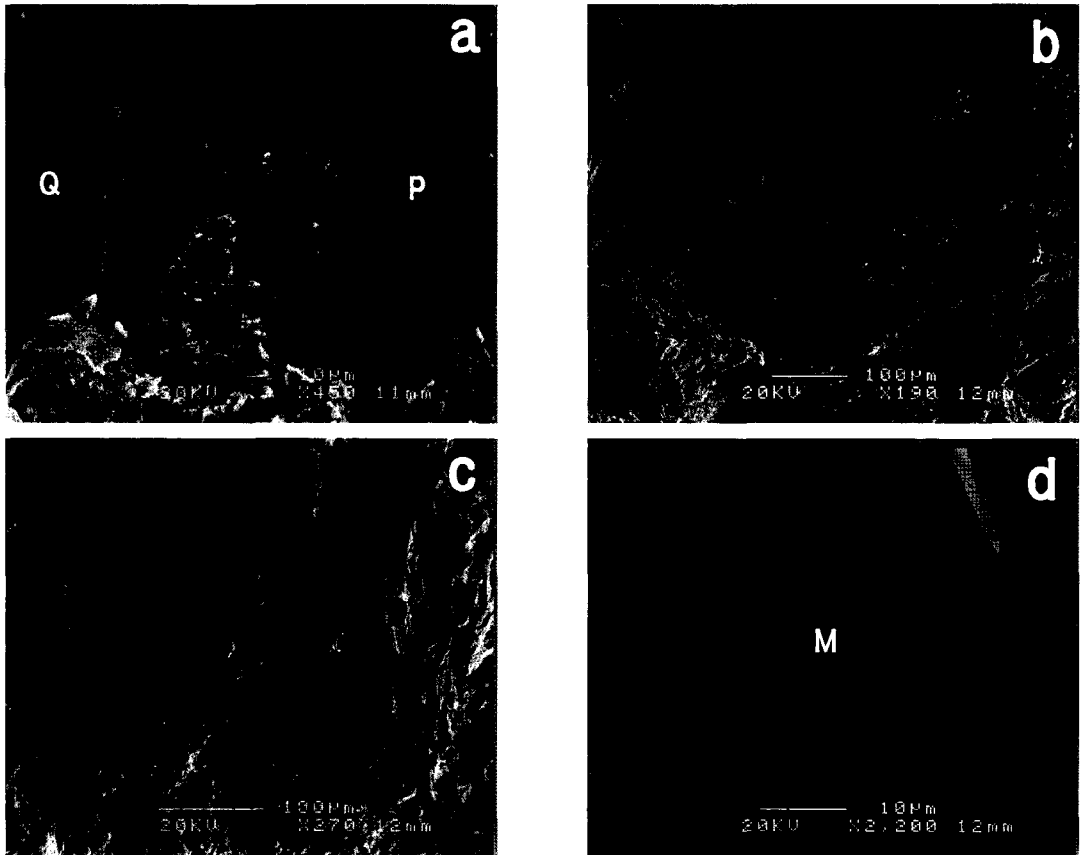
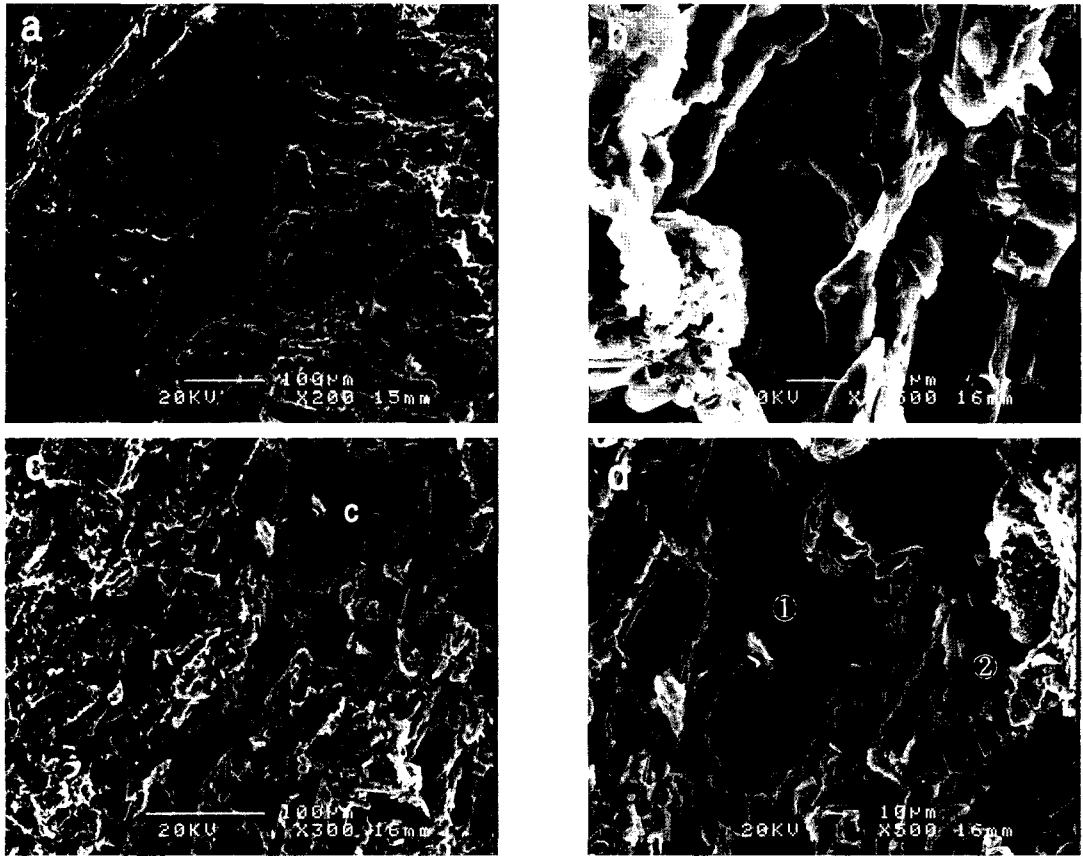


Fig. 6. SEM images of weathered tuff(sample 1-1). (a) Quartz phenocryst shows irregular grain boundary, whereas plagioclase phenocryst has dissolution cavities along cleavage. (b) Volcanic glass shows etch pit. (c) Etch pit in volcanic glass and well-crystallized zeolites. (d) Mordenite fibers formed in etch pits developed in volcanic glass. M: mordenite, P: plagioclase, Q: quartz.



**Fig. 7.** SEM images of weathered tuff(sample 3-1). (a) Volcanic glass shows lamination texture. (b) Honeycomb etch pit in volcanic glass. (c) Clinoptilolite(c) in volcanic glass. (d) Enlarged image of (c) and EDS analysis points. K-rich clinoptilolite(1) is O 56.18, Na 0.29, K 4.11, Ca 1.50, Al 6.53, Si 31.39 wt.%. and altered volcanic glass(2) contains O 46.47, Na 0.05, K 3.43, Ca 2.20, Fe 11.34, Mg 1.29, Al 6.16, Si 29.07 wt.%.



**풍화특징**

시료에 따른 풍화정도는 1-1 시료는 1-3 시료보다 덜 풍화가 진행되어 비교적 신선하였으며, 2-1 시료와 3-1 시료의 경우도 각각 2-3 시료와 3-3 시료에 비하여 다소 신선한 암석의 특징을 나타낸다. 이같은 현상은 주사전자현미경으로 관찰할 경우에 더욱 명확하게 구분된다. 즉 1-3, 2-3, 3-3 시료의 경우 응회암은 상당부분이 제올라이트화 하였으나, 1-1, 2-1, 및 3-1 시료에서 응회암은 실리카와 장석질이 풍부한 응회암 상태로 유지되고 있어서 제올라이트 광물의 함량비는 상대적으로 적게 나타난다. 따라서 풍화가 다소 진행된 응회암에서는 실리카와 장석질의 기질물질은 상당부분이 제올라이트로 변화한 특징을 보인다. 한편, 응회암내 반정의 경우 풍화가 진행된 부분에서 갈색의 스멕타이트가 흔히 형성되어 있다.

제올라이트는 풍화작용 동안 화산암의 유리질과 장석류의 반정으로부터 결정화되는데 동일한 시료에서도 다양한 종류가 수반된다. 이 같은 경우는 산성화산암에서 더욱 뚜렷한데, 건조한 환경에서는 K장석과 알칼리 제올라이트가 형성되는 경우, 스멕타이트를 수반하기도 한다(Walker et al., 1978; Velde, 1985). 클리네틴로라이트와 모오데나이트 같은 알칼리 계열의 제올라이트는 공극에 실리카와 알칼리원소의 활동도가 높아야 형성되기 쉬우며, 제올라이트가 상당한 양의 물을 함유하므로 H<sub>2</sub>O의 화학적 포텐셜도 높아야 한다(Hess, 1966). 응회암은 Si, Al이 풍부하므로 쉽게 제올라이트를 형성시키고 있는데, 알칼리 양이온의 함량비에 따라서 다양한 유형의 제올라이트 광물들이 형성된다. K가 풍부한 곳에서는 정장석 계열의 장석이 자형의 결정을 이루고 있다. 침상형의 모오데나이트는 Na-Ca 계열의 제올라이트로 나타난다. 판상의 제올라이트는 Ca-Na 계열의 제올라이트로 나타난다.

**결 언**

풍화된 응회암에서 석영의 함량감소 정도는 비교적 적으나, 장석의 함량감소가 뚜렷하므로 화산유리질과 장석으로부터 실리카, 알루미늄 및 알칼리원소가 공급되어 제올라이트가 형성된 것으로 볼 수 있다. 신선한 오야응회암의 경우, 이미 형성과정동안 상당한 양(30~50%)이 제올라이트화 한 것으로 볼 때, 물이나 습

기에 이 암석이 노출된다면 더욱 쉽게 풍화, 변질될 것이며, 따라서 이 암석의 강도는 급격히 감소할 것으로 예측된다. 그러나 화학적으로는 지하수나 지표수내 중금속 성분들을 비롯한 여러 금속이온들은 이온교환이나 흡착반응에 의하여 이 응회암에 상당부분이 흡착제거 될 수 있을 것으로 보인다. 신선한 응회암인 경우라도 화산성유리질과 제올라이트의 결정들끼리는 부분적으로 치밀하게 배열되어 있으나, 전체적으로 볼 때 공극율은 높은 것으로 관찰되었다. 화산성 기질과 반정 간 광물조성과 화학조성의 차이로 인하여 동일한 시료내에서도 풍화, 변질되는 양상은 서로 상이할 것으로 예측된다.

**사 사**

이 논문은 2004학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구 되었다. 또한 이 연구에서의 기기분석은 한국기초과학연구원(KBSI)과 안동대 공동실험실습관에서 수행되었으며, 캐나다 University of Alberta, 토목환경공학과 D. Martin교수는 암반역학에 미치는 풍화 영향에 대하여 많은 조언을 해주었다. 이에 사의를 표한다.

**참고문헌**

김해경, 고영구, 오강호, 2004, 고흥지역에 분포하는 백악기 응회암의 역학적 특성에 관한 연구, 지질공학회지, 14, 273-285.  
 노진환, 고상모, 2004, 열일지역 제올라이트질 벤토나이트의 광물특성 및 생성환경, 한국광물학회지, 17, 135-145.  
 이정인, 이희근, 유창하, 양형식, 1982, 우리나라에 분포하는 주요 암석류의 역학적 특성연구-주요 탄전지역 및 지하발전소 건설지역에 분포하는 퇴적암의 역학적 성질, 대한광산학회지, 19, 260-267.  
 정형식, 유병옥, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구, 한국지반공학회지, 13, 71-93.  
 Hess, P., 1966, Phase equilibria of some minerals in the K<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system at 25 °C and 1 atmosphere. Am. Jour. Sci., 264, 289-309.  
 Graham, I.T., Pogsosn, R.E. and Baines, A., 1999,

- Zeolite crystal habits, New Zealand, *Mineralogical Magazine*, 67(4), 625-637.
- Noh, J.H. and Boles, J.R., 1989, Diagenetic alteration of perlite in the Guryongpo area, Republic of Korea, *Clays and Clay Minerals*, 37, 47-58.
- Pe-Piper, G, 2000, Mode of occurrence, chemical variation and genesis of mordenite and associated zeolites from the Morden area, Nova, Canada, *The Canadian Mineralogist*, 38, 1215-1232.
- Velde, B. 1985, *Clay Minerals: A physico-chemical explanation of their occurrence*. Elsevier. p427.
- Walker, T.R., Waugh, B. and Grone, A. J., 1978, Diagenesis in first-cycle desert alluvion of Cenozoic age, South Western United States and Northwestern Mexico, *Bull. G.S.A.*, 89, 19-32.

투 고 일	2004년 11월	1일
심 사 일	2004년 11월	2일
심사완료일	2004년 11월	29일

---

추창오  
 안동대학교 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 TEL: 054-820-5185  
 FAX: 054-823-1627  
 Email: choocco@empal.com

정교철  
 안동대학교 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 TEL: 054-820-5753  
 FAX: 054-823-1627  
 Email: jeong@andong.ac.kr

오대열  
 대구공업대학 토목환경과  
 704-721 대구광역시 달서구 본동 831  
 TEL : 053-560-3870  
 FAX : 053-560-3874  
 Email : ds1cye@hotmail.com

김종태  
 안동대학교 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 TEL: 054-820-5182  
 FAX: 054-823-1627  
 Email : kjtt98@hotmail.com

T. Seiki  
 Dept. of Civil Engineering,  
 Utsunomiya University,  
 Utsunomiya, 321-8585, Japan  
 TEL/FAX : +82-28-689-6216  
 Email : tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp