

경주시 양북면 단층각력대에서 산출하는 로몬타이트와 아둘라리아의 광물학적 특징과 후기 단층활동

Mineralogical Characteristics of Hydrothermal Laumontite and Adularia in the Breccia Zone of a Fault, Yangbuk-myeon, Gyeongju and Implications for Fault Activity

추 창 오(Chang Oh Choo)¹ · 장 윤 득(Yun Deuk Jang)^{1,*} · 장 천 중(Chun-Joong Chang)²

¹경북대학교 지질학과

(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea)

²한국수력원자력(주) 중앙연구원 부지재해평가팀

(KHNP Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. Korea)

요약 : 경주시 양북면 단층대의 각력암에서 로몬타이트와 아둘라리아가 산출되는데, 이들의 형태적 특징은 단층활동과 관련된 열수와의 반응으로 형성되었음을 지시한다. 로몬타이트의 산출은 충분한 물이 존재하는 각력대에 알칼리원소가 풍부하게 공급되었음을 의미한다. 로몬타이트는 신장된 주상형의 결정이 특징적인데 길이와 폭의 비는 대부분 5~10:1 범위이다. 자형의 로몬타이트, 아둘라리아는 Ca-사장석을 교대하거나, 유체로부터 침전되어 이차적으로 형성되었는데, 최후기 단계에서 비교적 빠르게 형성되었다. 단층과쇄작용으로 인해 투수성이 높아진 화강암질 모암은 열수와 반응하여 Ca, K와 같은 알칼리원소를 용탈시켰으며, 중성-약알칼리성의 열수용액으로부터 각력대에 로몬타이트, 아둘라리아가 침전되었다. 단층과쇄대에서 흔히 발달하는 로몬타이트와 아둘라리아와 같은 저온성 변질광물의 형성과정과 성인은 천열수광상에서 흔히 일어나는 모암변질, 열수반응과 유사하다. 단층대에서 생성되는 저온성, 이차적 아둘라리아의 형태적 특징과 화학조성은 조암광물의 K-장석류와 구분되므로 국내의 단층대에서 흔히 산출하는 K-장석은 아둘라리아일 가능성이 높다.

주요어 : 단층대, 각력암, 로몬타이트, 아둘라리아, 열수변질작용

ABSTRACT : Morphological and mineralogical characteristics of laumontite and adularia in the breccia zone in a fault, Yangbuk-myeon, Gyeongju, Korea suggest that they formed by reaction with hydrothermal alteration related to fault activity. Laumontite commonly occurring in the breccia zone is related to the presence of hydrothermal fluids bearing alkaline elements in the zone. Laumontite is characterized by elongated columnar form with aspect ratio varying 5~10. Laumontite and adularia whose characteristic euhedral forms are indicative of the latest product formed as rapid precipitation from fluids or replacements of Ca-plagioclase. Hydrothermal fluids reacted with intensively fractured granite, typical with high permeability, leached alkaline elements such as Ca, K, allowing laumontite and adularia to be precipitated under neutral to weak alkaline conditions. It is noteworthy that the

*교신저자: jangyd@knu.ac.kr

formation process and genesis of low temperature minerals such as laumontite and adularia are very similar to those formed by wallrock alteration or hydrothermal alteration that occurred in epithermal deposits. Taking into account its characteristic morphology and chemistry, authigenic K-feldspar that commonly forms at low temperature in many fault zones must be adularia.

Key words : fault zone, breccia, alumontite, adularia, hydrothermal alteration

서 언

단층대와 같은 파쇄된 열극대는 높은 투수성과 공극률이 특징적인 개방계(open system)이므로 화성활동과 관련된 지열수나 마그마수를 쉽게 운반할 수 있으며, 평형상태를 유지하기보다는 연속적으로 교란된다. 단층대에는 높은 투수율로 인하여 여러 단계의 후속변질작용이 중첩되어 있으며, 이로 인해 다양한 유용광물이 배태되거나, 변질작용이 일어나며, 암반역학적으로도 취약하다(장태우와 채연준, 2004; 장태우와 장운득, 2008; 이영민 외, 2009; 이창섭과 이효민, 2009). 단층파쇄대에서는 저온에서 안정한 이차광물들이 잘 형성되는데, 이는 단층대가 열수변질의 영향을 받기 쉬운 지질구조임을 의미한다. 단층활동 최후기에는 거의 필수적으로 열수변질 작용이 일어나는데(Sibson *et al.*, 1975), 이차광물의 침전 및 교대작용으로 단층파쇄대가 메워지면서 단층활동이 종료된다. 그 동안 국내의 단층연구에서는 단층암에서 흔히 산출하는 로몬타이트와 아둘라리아의 광물학적 특징을 구체적으로 연구한 바 없으며, 이들의 산출이 갖는 단층활동사적 의미를 간과하고 있는 실정이다.

본 연구의 목적은 경주시 양북면 단층대에서 산출하는 로몬타이트와 아둘라리아의 광물학적 특징과 성인을 밝히고, 이를 통하여 단층활동에 수반되어 일어나는 저온성 열수변질작용의 의미를 고찰하는데 있다. 특히 아둘라리아의 경우 현재까지 국내 단층암에서 그 산출이 알려진 바 없다.

로몬타이트(laumontite)를 비롯한 제올라이트 광물군은 여러 단층대에서 산출하는데, 예를 들면 San Andreas 단층대(Vincent and Ehlig, 1988)를 비롯하여 국내 여러 단층대에서도 흔히 산출한다(장태우와 추창오, 1998; 이석훈 외, 2000; Choo and Chang, 2000; 박성민 외, 2007; 유장한, 2008; 유장한과 김용욱, 2009; 추창오 외, 2011).

K-장석의 변종광물인 아둘라리아(adularia)는 저온에서 형성되는데, 열수변질된 주변암(wall rocks)

이나 지열수가 상승하는 단층파쇄대에서 흔하다(Steiner, 1970). 아둘라리아는 화학조성상 간극양이온(interstitial cation)으로서 거의 K만을 함유하며, 독특한 결정형태나 정벽(habit)을 가진다. 아둘라리아의 결정형은 pseudo-orthorhombic를 비롯하여 다양한 형태가 존재하며, 구조적으로는 질서도가 높은 미사장석에서부터 무질서한 새니딘까지 다양하게 나타나는데, 그 이유는 결정성장속도 및 결정생성 후의 열적변화와 밀접히 관련된다(Smith, 1974; Cerny and Chapman, 1986). 아둘라리아는 광학적으로도 매우 불균질하여 단사정계와 삼사정계의 혼합적인 특징을 보이거나, 심지어 단일결정 내에서조차 중심부와 외곽부가 서로 다른 결정계를 가지기도 한다(Akizuki and Sunagawa, 1978). 이는 화성암, 변성암 기원의 K-장석에서는 존재하지 않는 구역조직(domain texture)과 준안정 전이상태와 관련된 구조적 불균질성에 기인한다(Cerny and Chapman, 1984). 이처럼 구조적, 형태적으로 변화가 심한 근본적인 이유는 아둘라리아가 저온에서 빠르게 형성되므로 평형상태에 충분히 도달하지 못하기 때문이다. 따라서 조암광물로서의 K-장석류와 저온성인 자생적 아둘라리아는 결정구조, 형태, 조성, 성인에서 다소 차이가 있다.

지질 및 시료

연구지역인 경상북도 경주시 양북면 일대는 백악기 경상누층군에 속하는 하양층군, 유천층군과 이들을 관입하는 불국사 관입암류 및 그 위에 부정합적으로 놓이는 소규모의 제3기 지층, 그리고 제4기 미고결층으로 구성되어 있다. 불국사 관입암류는 화강암류와 유문암, 안산암과 같은 맥암류로 구성되는데, 화강암류는 화강섬록암, 흑운모 화강암, 각섬석 화강암, 미문상 화강암 등이며, 퇴적암류와 경계부에는 접촉변성작용이 관찰된다(장태우와 채연준, 2004). 본 연구를 위하여 양북면 용당리 일대에서 북서서-남동동으로 발달하는 계곡을 따라 분

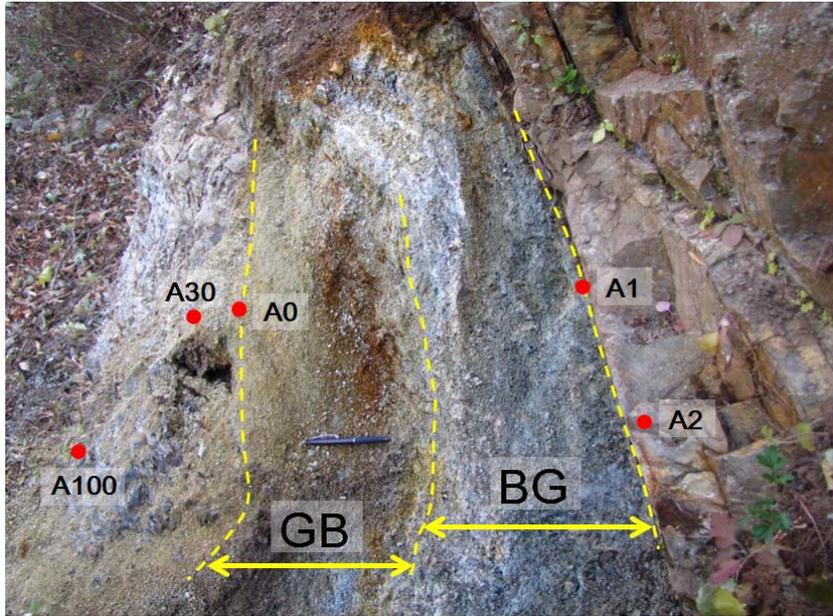


Fig. 1. Outcrop shows distinctive gouge zonation with greenish brown (GB) and bluish grey (BG) developed between brecciated zones from which breccia samples were collected.

포하는 단층(N35°44.174'/E129°28.327')에서 단층각력암 시료를 채취하였다. 이 단층대에는 비지대와 각력대가 잘 발달하고 있는데, 단층대 중심에서부터 외곽부로 가면서 대상 분포를 잘 보여준다(그림 1). 단층각력암은 불국사화강암에 속하는 화강섬록암으로서 암색은 유백색을 띠며, 중립 내지 조립질의 석영, 장석류가 육안으로 관찰된다. 그러나 운모류와 함철광물은 그 존재여부가 확인되지 않을 정도로 변질작용을 겪었다. 단층대 주변에는 균열이 발달한 녹회색질 안산암이 방향성이 없이 불규칙하게 관입하고 있다. 단층면은 N70~83W, 60~70SW이며, 각력대와 비지대를 포함하는 단층핵의 폭은 약 1.5 m 내외이며, 각력대와 비지대의 경계는 뚜렷이 구분되나, 점이적인 구간도 국부적으로 존재한다. 흑색의 망간산화물과 비정질의 함철산화물이 이들 경계부의 틈새를 흔히 채우거나, 비지대의 엽리방향을 따라 석영맥, 황철석 맥이 발달한다. 비지대는 특이하게 청회색대, 녹황색대로 세분되는데, 녹황색 대에서는 육안관찰 상 단층엽리가 상대적으로 더 잘 발달하며, 함철산화물이 틈새를 따라 흔히 침전해 있다. 특히 이들 비지대의 경계부에서 폭 1 cm 이하의 석영세맥이 수 매 발달하며, 직경 5 mm 내외인 자형의 황철석이 산점상

으로 분포하거나, 집합체로서 맥상으로 발달한다. 각력대 내에서는 파쇄절리가 방향성이 없이 무질서하게 발달하는데, 절리간격은 수 cm~30 cm범위로 조밀하며, 각력대 외곽부로 가면서 파쇄절리의 간격은 점차 넓어진다. 각력대 내 파쇄절리의 간극을 맥상광물이 채우거나, 피복하고 있다. 이들 맥상광물은 주로 로몬타이트, 석영, 스�멕타이트, 방해석, 망간산화물 및 육안상 감정이 어려운 함철산화물 등으로 구성된다. 특히 로몬타이트 맥은 회백색이 특징적인데, 폭 1 cm 내외로 발달한다(그림 2). 육안관찰 시 로몬타이트는 수 mm 크기의 주상 결정들이 치밀한 집합체를 이루나, 쉽게 부스러진다. 스�멕타이트는 절리틈새를 채우거나, 세립질 파쇄물이 집중된 곳에서 분포하는데, 팽활성의 점토질감을 주며, 담갈색을 띤다. 본 연구를 위하여 각력대에서 5개의 시료를 채취하였다.

연구방법

단층각력대 구성광물의 감정을 위하여 X-선회절 분석(XRD)을 실시하였다. 시료를 상온에서 건조시킨 다음, 분말상태로 제작하여 모노크로미터가 장착된 Philips X' Pert-PRO/MRD X-ray diffracto-



Fig. 2. Laumontite vein in the breccia zone.

meter를 이용하여 분석하였다. Ni-필터링 $\text{CuK}\alpha$ (1.54056 Å) 선을 이용하여 가속전압과 전류는 40 kV/30 mA, $5^\circ\sim 65^\circ$ 범위에서 0.02° 간격으로 1 sec씩 스캔하여 측정하였다. 회절패턴에 대해 Rietveld법 프로그램인 Siroquant v.3.0으로 정량계산을 하였다.

미세조직 관찰과 주요 광물의 화학분석을 위하여 주사전자현미경(SEM) 분석을 실시하였다. 이를 위하여 한국기초과학지원연구원 대구센터의 전계 방출형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, HITACHI model S-4200)과 이에 부착된 에너지분산스펙트럼(energy dispersive spectrum, EDS)을 이용하여 광물의 화학분석을 실시하였다. 황(sulfur, S)이나, 주요 중금속원소의 스펙트럼과의 간섭중첩을 피하기 위하여 시료표면을 오스뮴(osmium, Os; 원자번호 76)으로 코팅하여 분석시편을 제작하였다. FE-SEM 관찰시의 가속전압과 전류는 각각 20 kV, 10 nA 조건이며, 최대 10,000 배율 이하에서 관찰하였다.

결 과

단층각력대의 광물 조성

XRD 분석에 의하면 대표적인 단층각력암은 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 로몬타이트 등의 점토광물과 석영, K장석, 알바이트 사장석 등으로 구성되며, 광물의 구성비는 표 1과 같다.

로몬타이트는 단층비지대와 각력대에서 산출하며, 주로 맥상으로 산출하기 때문에 단층대에서 대상분포를 하지 않고, 국부적으로만 확인된다. 특히 각력대에서 산출하는 로몬타이트 맥은 XRD 분석 결과, 거의 순수한 로몬타이트로 구성된다. (110) 결정면의 회절선이 가장 높으며, 그 외 (200), (220), (130) 결정면의 회절선도 비교적 높게 나타난다(그림 3). 회절선의 강도가 강하고, 좁은 것으로 보아, 결정도가 높은 것으로 볼 수 있다.

장석은 각력암에서 K-장석, 알바이트 사장석으로 감정되지만, XRD 회절선의 중첩으로 인해 이들 장석광물을 각각 구분하기가 어렵다. 특히 K-장석은 새니딘, 정장석, 미사장석을 포괄적으로 지칭하지만, 구조적 특징차이로 인해 XRD 상에서 각각의 광물종의 구분이 가능하다(Smith, 1974). 그러나 단층각력대 전암시료를 대상으로 XRD 분석

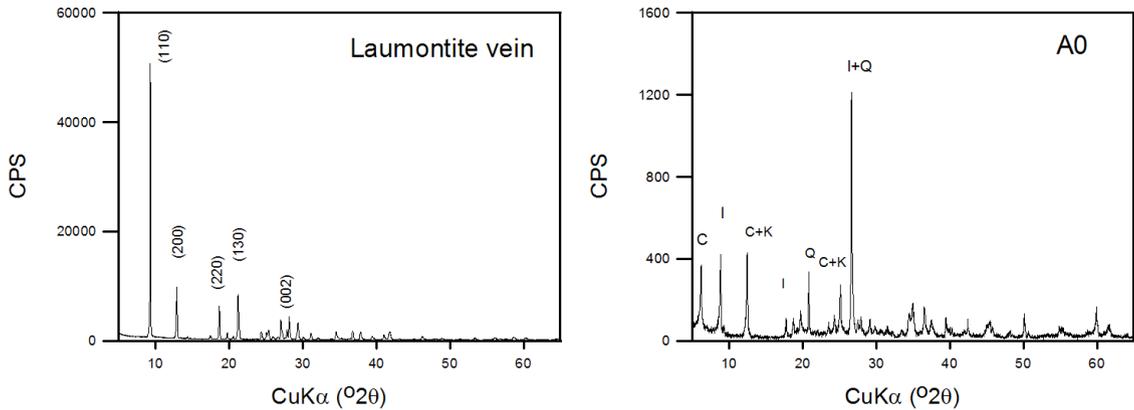


Fig. 3. XRD patterns of laumontite and A0 sample representative of fractured materials in the breccia zone. C: chlorite, I: illite, K: kaolinite, Q: quartz.

Table 1. Mineral content of breccia zone analyzed by XRD. Qtz: quartz, Kaol: kaolinite, Ill: illite, Ab: albite, Ksp: K-feldspar, Lau: Laumontite. Unit: %.

	Qtz	Kaol	Ill	Ab	Ksp	Chl	Lau
AR1	49.3		3.6	15.4	18.2	13.5	
AR2	31.4		9.5	41.3	7.9	9.9	
A0	20.7	7.8	38.0			33.5	
A30	30.2		6.2	41.9	14.2	7.6	
A100	20.9	2.5		52.9	8.8	13.6	1.4

을 실시한 본 연구에서는 단지 K-장석으로만 감정할 수 있을 뿐, 어떤 K-장석 광물종에 해당하는지, 또는 이들이 아둘라리아인지는 판단할 수 없었다. 아둘라리아는 질서도(ordering)가 다양한 범위에 걸쳐 일어나므로 여러 광물종이 혼합된 단층암에서 XRD상으로 각각을 구분하기가 어렵다.

XRD 분석결과에 의한 주요 광물의 산출특징은 다음과 같다. 일라이트는 각력대에서도 소량으로 함유되나, 단층비지대에서는 주구성 광물이다. 일라이트는 단층암에서 가장 풍부한 광물로서 비지대 및 그와 접촉하는 각력대(A0 시료)에서 높게 함유되나, 각력대 외곽부(A100 시료)에서는 산출되지 않는다. 각력대에서 산출하는 일라이트에서는 (001) 회절선이 10 Å에서 나타나는데 회절선의 폭이 좁아 결정도는 높음을 알 수 있다.

녹니석은 각력대와 비지대에서 흔히 산출되나, 특히 각력대에서 훨씬 풍부하게 함유된다. 본 단층

암에서 비지대의 경우 녹니석의 (001) 결정면의 회절선($d = 14 \text{ \AA}$)은 배경치가 높고 폭이 넓어 결정도가 낮은 반면, 각력대에서는 녹니석의 (001) 회절선이 날카롭고 폭도 좁아 결정도가 높다. 특히 각력대의 A0시료에서는 녹니석의 회절선이 잘 나타난다(그림 3). 이 경우 (001) 회절선이 높은 것으로 보아 Fe의 함량이 적으며, Mg 함량이 높은 clinocllore 계열의 녹니석으로 보인다. 일부 녹니석의 경우 (001) 결정면의 회절배경치가 (002) 결정면($d = 7 \text{ \AA}$)보다 더 높는데, 이로 보아 버미클라이트가 함유되어 있을 가능성이 있다.

카올리나이트는 단층비지에서부터 각력대에 이르기까지 다양한 단층암에서 산출되며, 최대 8% 이하로 소량 함유되어 있다. 2θ 부근에서 여러 회절선으로 분리되므로 비교적 결정도가 높은 카올리나이트로 볼 수 있다. 그러나 전반적으로 카올리나이트는 단층암에서 소량으로 함유되는데 녹니석과 함께 산출하는 경우 이들의 주요 회절선이 중첩되거나 간섭되기 때문에 본 연구에서는 정확한 감정이 어렵다. 스펙타이트는 각력대에서만 산출하는데, 흔히 일라이트, 녹니석과 수반된다. $d(060)$ 이 1.5 \AA 으로 나타나는 것을 볼 때, 이는 이팔면체형으로 판단되나 현재 데이터로써는 어떤 스펙타이트 광물종인지를 확인할 수 없다. 방해석은 현미경 상에서 일부 세맥이나, 교대조직으로 나타나는데, 본 논문에서는 이에 관한 현미경 자료를 생략하였다.

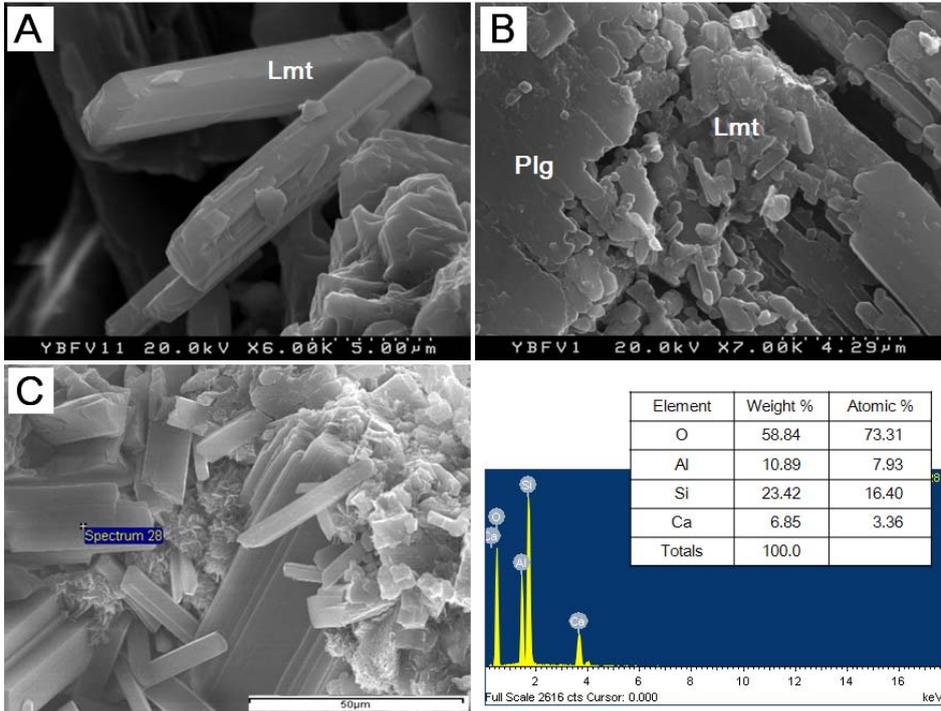


Fig. 4. SEM microphotographs of laumontite. (A) Euhedral, prismatic laumontite. (B) Equigranular laumontite on altered plagioclase. (C) Well-crystallized laumontite and its EDS data. Smectite grown in the pore between laumontite. Lmt: laumontite, Plg: Plagioclase.

로몬타이트의 광물학적 특징

로몬타이트는 신장된 주상형의 결정이 특징적이다(그림 4). 길이와 폭의 비는 대부분 5~10:1 범위이다. 로몬타이트는 Ca가 풍부한 사장석이 용해, 변질된 곳에서 흔히 생성되며, 맥상으로 산출하는 경우 빈 공간에서 자형으로 성장한다. 로몬타이트가 사장석으로부터 형성되는 경우, 인근의 사장석은 심하게 변질 작용을 겪었다. 특히 사장석은 알바이트 쌍정을 따라 변질작용이 일어나는데, 용해, 변질된 사장석에는 1 μm 이하인 로몬타이트의 미세결정이 생성되어 있다. 일반적인 로몬타이트 결정의 크기는 5~10 μm 가 흔하며, 맥상으로 산출하는 로몬타이트는 수십 μm 이상에서부터 육안상 관찰이 가능한 것까지 다양하게 나타난다. 로몬타이트는 결정표면이 신선하고 집합체로 산출하는데, 스�멕타이트가 함께 수반되기도 한다. 로몬타이트의 구조화학식은 $\text{Ca}_4[\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 로서 사면체 구조에 Si, Al이 들어가며, 양이온은 채널에 들어

가며 화학조성범위는 넓지 않는데, 채널에 들어가는 주요 양이온은 Ca, Na, K이다(Deer *et al.*, 2006). 단층각력암에서 로몬타이트는 층간 양이온으로서 Ca를 가지나, K, Na를 소량 함유하는 경우도 있다(그림 5).

아들라리아의 광물학적 특징

아들라리아는 각력대 전반에 걸쳐 산출하는데, 결정의 표면이 신선하며 결정면이 잘 발달한다(그림 6). 이들은 대부분 집합체를 이루나, 일라이트 기질부에서 각각의 결정으로도 산출한다(그림 7, 8). 아들라리아는 특정한 방향으로 배열되거나, 무작위로 결정들이 배열되기도 한다. 아들라리아의 결정형은 육각판상형이 주를 이루며, 그 외에 능면체(rhombic), 큐브형도 산출된다. 특히 결정면이 신선하고, 표면에서는 변질작용이 거의 관찰되지 않는다. 가장 흔한 육각판상형인 경우, 새니딘에서처럼 (010)면이 잘 발달하여 면적이 가장 넓으며, 그

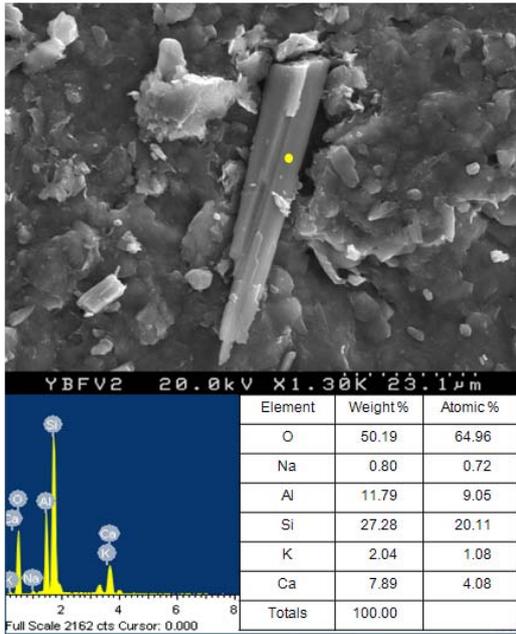


Fig. 5. SEM microphotograph of vein-type laumontite and its EDS data. Analyzed point is marked as a dot.

다음으로는 (001), ($\bar{1}01$) 등의 결정면이 잘 발달한다. 아둘라리아의 정벽(habit)의 종류에 관하여서는 여러 모델이 제시되었지만, 지질환경, 산출지마다 다르며, 거정질 조차도 기존 모델에 전혀 맞지 않는 경우도 있고, 심지어 방해석 능면체의 가상으로 산출하는 일도 있다(Smith, 1974). 본 아둘라리아에는 기존의 아둘라리아 결정형에서 잘 나타나는 (110)면은 형성되어 있지 않으며, 결정형은 단사정계처럼 수직에서 약간 벗어나 신장되어 있다. 육각 판상형은 한 방향으로 점차 신장되면 능면체로 변한다. 또한 {010}을 따라서 납작한 결정형도 존재하는데(Reynolds, 1929), 이는 본 단층암내 아둘라리아에서 흔하게 나타나는 결정형과 비교적 일치한다. EDS 분석에 의하면 간극양이온으로는 거의 K가 들어가나, Na가 소량 함유되는 경우도 있다. 그림 8에서 아둘라리아는 일라이트 기질부에 의해 둘러싸이는데, 1 μm 이하의 자형으로 나타난다. 아둘라리아는 자형으로 산출되며, 표면이 신선하고 변질작용을 받지 않았으므로 최후기 산물임을 지시한다.

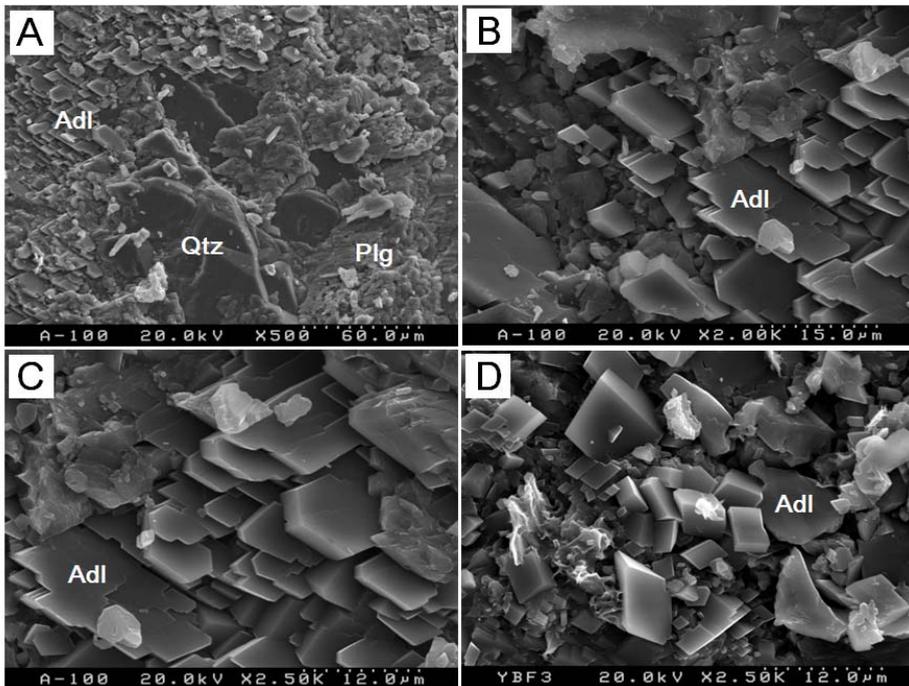


Fig. 6. SEM microphotographs of euhedral adularia. (A) Intensively altered plagioclase and fresh euhedral quartz. (B), (C) Euhedral adularia aggregates arranged in similar orientation. (D) Euhedral adularia arranged randomly. Adl: adularia, Qtz: quartz, Plag: Ca-rich plagioclase.

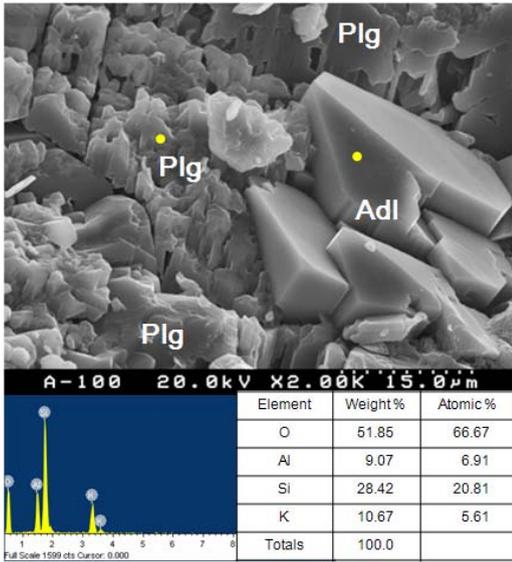


Fig. 7. SEM microphotograph of adularia and its EDS data. Altered plagioclase contains Si 25.95, Al 11.24, K 1.13, Ca 7.47, O 54.21 wt% obtained from EDS analysis. Analyzed points are marked as dots.

기타 수반광물의 특징

석영의 경우 일차적 기원의 입자는 파쇄되거나, 용식되어 1~5 μm 크기의 미세입자로 변한다. 이 경우 미세입자들은 자형의 등방형이 혼하며, 여러 개의 입자가 접합되거나 치밀하게 접촉하는 경우도 있다. 또한 여러 개의 입자가 단단히 접합 (annealing)된 것처럼 보이는 경우도 있다. 석영입자들은 표면이 약간 각져 있거나, 구형도가 높으며, 전체적으로는 등방체에 가깝다. 원래의 큰 입자표면에는 용식된 에칭홈(etching pit)이 혼하다 (그림 9). 에칭 홈은 Si가 빠져 나간 자리에 해당하는데, 수백 nm 이하의 직경을 가지면서 일렬로 배열하거나, 산점상으로 분포하는데 대부분 그 크기가 비슷하다.

장석의 경우 Ca 함량이 높은 사장석이 주를 이룬다. 사장석에서 Na, K는 소량으로만 함유된다. 사장석의 입자는 알바이트 쌍정을 따라 파쇄되어 수 μm 이하의 미세입자로 변해 있는데, 표면은 심하게 변질되어 있다(그림 10). 쌍정면을 따라 발달

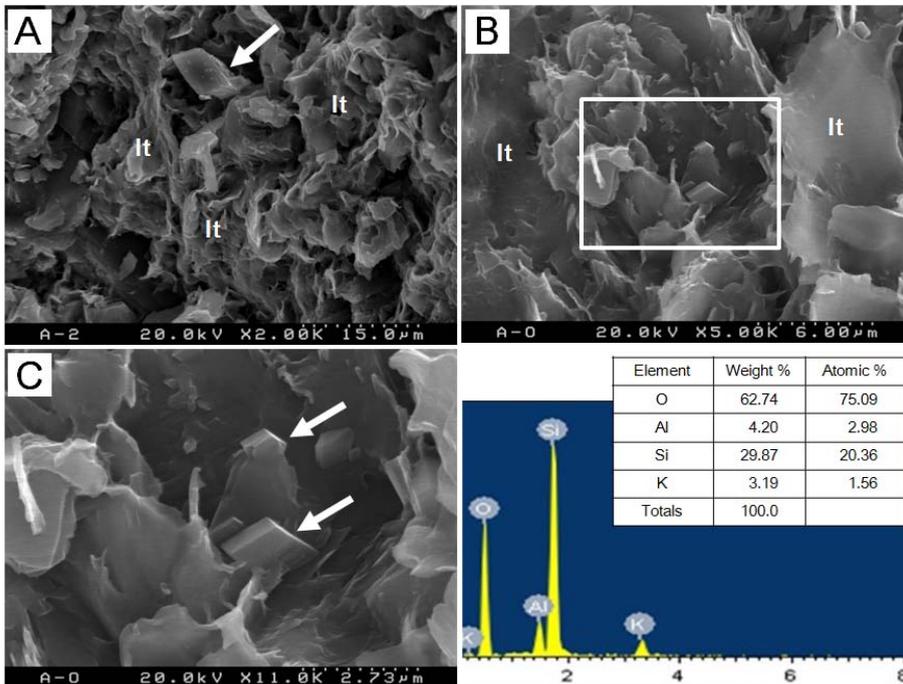


Fig. 8. SEM microphotographs of adularia and illite (It). (A) Rhombic adularia (arrowed) in the illite matrix. (B) Euhedral adularia in the illite matrix. (C) Enlarged image of the box area in (B). Euhedral adularia crystals (arrowed) and EDS data.

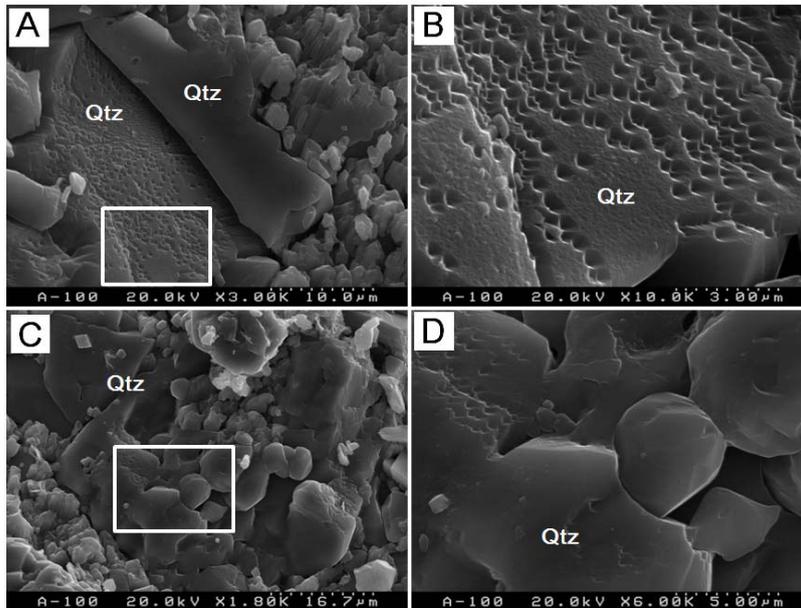


Fig. 9. SEM microphotographs showing alteration of quartz surrounded with Ca-plagioclase. (A) Dissolution cavity or etch pits in quartz. (B) Enlarged image of the box area in (A). (C) Dissolved primary quartz and recrystallized quartz. (D) Enlarged image of the box area in (C) reveals etch pits on the surface of primary quartz and recrystallized quartz grains newly grown.

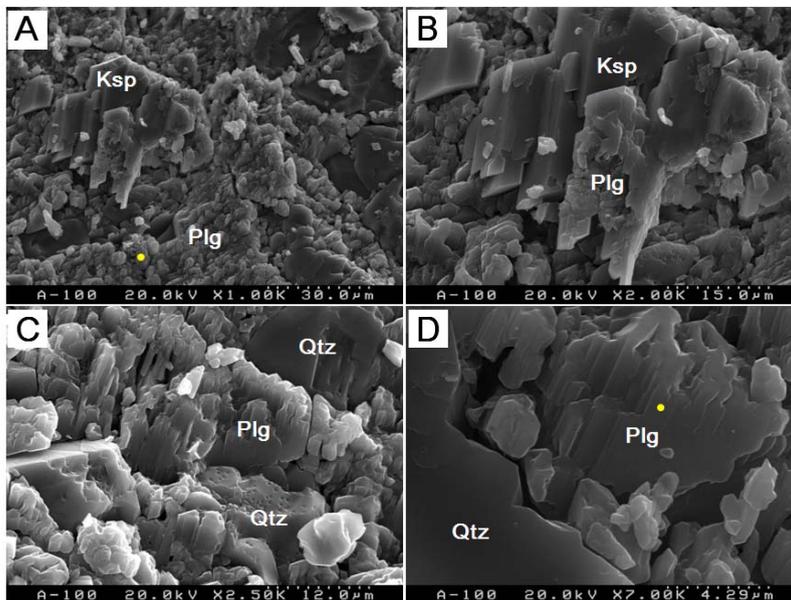


Fig. 10. SEM microphotographs of altered feldspars and quartz. (A) Low magnification of feldspars. Altered plagioclase contains Si 26.63, Al 10.50, K 1.08, Ca 6.20, O 55.58 wt% obtained from EDS analysis. (B) Enlarged image of (A). Note altered plagioclase in K-feldspar (adularia). (C) Dissolution taken place along albite twins in plagioclase, and altered quartz with dissolution cavity. (D) Altered plagioclase contains Si 30.38, Al 11.09, K 1.30, Ca 9.10, O 48.14 wt% obtained from EDS analysis. Ksp: K-feldspar adularia, Plg: Plagioclase, Qtz: quartz. Analyzed points are marked as dots.

하는 벽개는 일부가 잘려 있거나 용식된 조적을 보여 준다. 단층대 시료 전반에 걸쳐 신선한 사장석 입자는 전혀 없으며, K-장석(아들라리아), 로몬타이트, 석영과 흔히 수반된다. 사장석과 수반되는 K-장석의 경우, 2~20 μm 크기의 결정들이 집합체로서 나타나며, 결정면이 발달한 자형을 보이는데, 특정한 방향으로 잘 배열하여 산출하는 것으로 보아 이들은 자생적인 아들라리아에 해당한다. 심하게 변질된 사장석 기질부가 아들라리아로 변해가는 경우도 있는데(그림 10B), 이 경우 아들라리아는 육각의 자형을 보이며 여러 입자들이 치밀한 군집체를 형성하는 반면에, 사장석은 심하게 변질되어 있고 입자의 경계가 분명하지 않다. 또한 변질된 사장석의 가장자리에는 자형의 아들라리아가 형성되어 있다.

토 의

로몬타이트의 형성과정

로몬타이트는 상온에서는 자연적으로 생성되기 어려우나, 250 $^{\circ}\text{C}$ 내외에서 쉽게 합성되며, 특히 활성지열대(active geothermal field), 저온열수광상, 속성작용, 온천, 화산암류의 속성변질작용, 화강암류의 열극, 저도변성암, 및 단층대 등에서도 형성되며, Ca-사장석이나, 스틸사이트, 홀란드사이트와 같은 저온형 Ca-제올라이트의 교대작용, 상전이로부터도 형성되기 쉽다(Liou, 1971; McCulloh *et al.*, 1981; Weisenberg and Bucher, 2010). 로몬타이트는 열수와 Ca 성분이 풍부한 투수성이 높은 암석간의 반응으로 생성되기 쉬운데, 특히 단층대에서도 흔히 산출된다. 예를 들면 San Andreas 단층대 인근의 화강암질 파쇄암에서 이들은 사장석을 교대하거나, 단층파쇄대나 미세파쇄대를 채운다(Silver and James, 1988; Vincent and Ehlig, 1988).

로몬타이트의 형성환경은 온도 뿐만 아니라 화학적 환경에도 크게 좌우되는데, 40~80 $^{\circ}\text{C}$ 의 온천(McCulloh *et al.*, 1981)에서도 형성되나, 일반적으로 50~250 $^{\circ}\text{C}$ 범위, 중성내지 알칼리성의 유체가 풍부한 환경에서 잘 형성된다(Deer *et al.*, 2006). 그러나 산성환경에서는 쉽게 용해되므로 금속광화대에서는 형성되지 않는다. 로몬타이트는 구조수나 흡착수로서 상당량의 수분을 함유하는데, 단위포당 최대 16.9 wt.%의 H₂O를 가지므로(Deer *et al.*, 2006), 중성 내지 알칼리성의 유체가 비교적 풍부

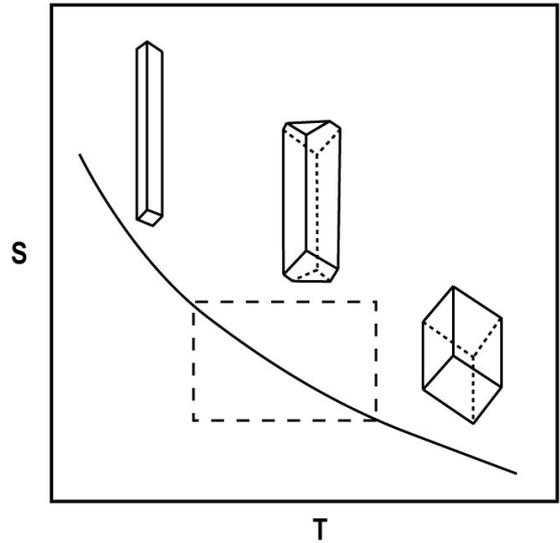


Fig. 11. The schematic concept for crystal habits of natural laumontites with supersaturation (S) and temperature (T) modified from Ghobarkar and Schaf (1998). It is likely that our laumontite is stable in the box area. Not to scale.

한 저온환경에서 로몬타이트가 형성된다.

본 단층암에서 Ca-사장석의 용해와 변질작용은 로몬타이트의 형성과 밀접한 관련성이 있는 것으로 보인다. 즉 일차적 기원의 사장석은 벽개나 쌍정을 따라 심하게 용해, 변질되어 있는데, 로몬타이트는 사장석의 변질된 부분에서 흔히 생성되거나, 또는 파쇄공극, 균열을 따라 맥상으로 침전되었다. 자형을 잘 보여주는 로몬타이트는 단층활동 최후기에 생성된 것으로 판단된다. 단층암에서 기존의 입자는 파쇄, 마모작용을 심하게 받는데(장태우와 장윤득, 2008) 반하여, 로몬타이트의 결정형은 자형을 보이며, 전혀 응력을 받은 흔적이 없다. 이로 볼 때, 단층파쇄대의 공극을 침투한 열수가 사장석으로부터 용탈된 Ca와 반응하여 로몬타이트를 형성한 것으로 보인다.

광물산출 및 조직의 특징으로 볼 때, 본 단층각력대에서 산출되는 로몬타이트의 형성과정은 Central Apls 화강암질암 열극에서의 로몬타이트의 침전반응(Weisenberger and Bucher, 2010)과 유사하다. 먼저 장석이 열수와 반응하여 일부가 용해되면, 다음처럼 Ca와 Al이 빠져 나온다. 이때 유체에는 Ca가 풍부해지므로 반응이 진행될수록 점차 알칼리성을 띠며, 용탈되어 나온 Ca, Al, Si는 로몬타이트

트를 형성한다. 이 과정에서 과잉의 Ca^{2+} 는 방해석을 형성하게 된다. 본 각력대에서 방해석의 산출은 XRD 분석으로는 확인이 안되며, 현미경으로만 관찰될 정도로 소량인 것으로 보아 로몬타이트를 형성한 후에까지도 잔존하는 Ca^{2+} 의 양은 적었던 것으로 보인다.

그림 11에서처럼 로몬타이트의 형태는 온도와 포화도에 의해 크게 영향을 받는다. 장축과 단축간의 비가 크며, 가늘고 신장된 주상 형은 저온에서 비교적 높은 과포화 조건에서 형성되며, 이 비가 낮으면서 사방체에 가까운 형은 고온 및 낮은 과포화 조건에서 형성된다(Ghobarkar and Schaf, 1998). 본 단층각력대에서 나타나는 로몬타이트의 경우 장축과 단축의 비는 5~10:1 범위인데, 이로 보아 저온 하에서 비교적 높은 과포화조건에서 형성된 것에 해당한다. 이는 유체로부터 Ca, Al, Si 및 H_2O 를 충분히 공급받았지만, 개방계인 단층파쇄대의 물리화학적 환경이 일정하지 않으므로 비교적 다양한 크기와 형태를 보이는 것으로 보인다.

아틀라리아의 형성과정

본 단층암내 아틀라리아는 형태가 온전하고, 전혀 변질되지 않았으며, 일정한 배열을 치밀하게 이루고 있는데, 이는 파쇄대에 발달한 열극면이나, 공극에서 침전되었으며, 최후기에 형성되었기 때문이다. 흔히 관찰되는 맥상의 아틀라리아는 과포화도가 높을수록 성장속도가 빨라져 무질서도가 커지게 된다(Dong and Morrison, 1995). 맥상으로 산출하는 자형의 아틀라리아는 점차 알칼리성으로 유체가 변화하면서 100~200°C에서 침전되기 때문에 비등(boiling)의 증거가 된다(Browne, 1978; Henley, 1985). 비등이 일어나면 유체압력은 급격히 감소하므로, 유체속의 각종 성분들은 과포화에 쉽게 도달하기 때문에 결정화가 빨리 진행된다. SEM 관찰에 따르면 단층암내에서 일차적 기원의 K-장석은 관찰되지 않는다. 비지대 뿐만 아니라, 각력대에서도 일라이트는 거의 등립질로서 치밀한 집합체로서 엽리를 형성한다. 또한 아틀라리아와 공존하는 Ca-사장석은 심하게 용해되거나 아틀라리아로 교대되는데(그림 10), 이로 볼 때, 반응유체에는 K가 풍부하였던 것으로 보인다.

본 단층암에 흔히 관찰되는 아틀라리아와 일라이트 간 공생관계도 천열수광상의 경우와 잘 일치한다. 아틀라리아는 각종 천열수맥(epithermal vein)

에서 sericite (illite)와 수반되는 경우가 흔한데 (Buchanan, 1981; Herald *et al.*, 1987), 특히 최후기 마그마성 열수광상에 해당하는 아틀라리아-sericite 천열수광상은 지각천부 2 km 이내에서 일어난다(Hedenquist and Lowenstern, 1994). 열수가 냉각되기 시작하면서 $Al(OH)_4^-$ 은 K, Si와 반응하여 아틀라리아와 일라이트(또는 sericite)를 형성한다(Dong and Morrison, 1995). 이때 유체속에 풍부한 K, Si는 수산화알루미늄 이온과 반응하여 아틀라리아를 형성하며, 약산성에서는 아틀라리아나 일라이트를 형성한다(Reed and Spycher, 1985). 이때 가용 가능한 알루미늄수산화물의 정도에 따라서 아틀라리아 또는 일라이트가 침전된다. 일라이트 기질에서 산출되는 자형으로 생성되는 나노~마이크론의 극미립질 아틀라리아의 경우(그림 8), 일라이트의 엽편상이 일부 변질조직을 보이는 것으로 보아, K는 주변의 풍부한 일라이트 기질로부터 공급되었던 것으로 보인다. 본 단층암에서 일라이트는 등립질의 치밀한 집합체로 산출하며, 특히 비지대에서는 강한 엽리를 형성한다. 이는 단층대에서 K가 풍부한 유체로부터 침전하였으며, 형성후에도 단층활동에 의한 응력이 가해졌음을 의미한다. 각력대에서 일라이트 조직이 느슨하며, 등립질인 것은 K-함유 광물로부터 교대되어 형성된 것이 아니라, K를 풍부하게 함유하는 유체로부터 침전되었음을 지시한다. 유체의 pH가 강알칼리성으로 높아지면 일라이트는 더 이상 생성되지 않고, 아틀라리아만 형성된다(Reed and Spycher, 1985). 일라이트가 풍부하면서도, 아틀라리아가 최후기 산물로 관찰되는 것으로 보아 유체에는 K가 풍부하였던 것으로 판단된다. 즉 투수성이 높은 단층파쇄대로 K가 풍부한 유체가 유입되면 빠르게 침전반응이 일어났을 것이다.

후기 단층활동과 각력대의 변질작용

단층대에서 흔히 산출되는 맥상광물 또는 충전광물은 단층지진에 의해 하부의 열수가 단층대를 따라 상승하는 소위 지진펌프(seismic pumping)효과에 의해 형성된 것이다(Sibson *et al.*, 1975). 각력대의 경우 투수성이 비지대에 비하여 크므로 단층작용의 후기단계에서는 활발한 유체이동의 통로가 되며, 맥상광물을 쉽게 형성한다(Goddard and Evans, 1995). 열수유입은 단층활동에 의해 영향을 받은 열수유체가 투수성이 현저하게 증가된 단층

과쇄대로 유입되며, 단층분쇄물과 반응하여 점토광물을 생성시키거나(Tanaka *et al.*, 1995; 장태우와 추창오, 1998), 고농도로 이온이 농집된 열수용액인 경우, 단층과쇄대에 유용한 광물을 천연수 광상처럼 침전시키게 된다. 본 연구지역 일대 화강암류 균열대의 시추코아에서 발견되는 맥상광물 또는 점토광물 위주의 단열충전광물의 기원은 황, 산소, 수소 안정동위원소분석 결과에 의하면 마그마 기원으로 알려져 있다(김진영 외, 2008). 이를 종합하면, 본 단층암에서 흔히 산출하는 로몬타이트, 석영, 황철석과 같은 맥상광물은 단층과쇄대를 따라 유입된 마그마성 열수공급에 의해 생성되었다고 판단된다.

석영, 로몬타이트, 아틀라리아, 일라이트, 녹니석, 사장석, 스펙타이트는 본 단층대가 중성내지 약알칼리성 열수의 영향을 받은 것임을 지시한다. 특히 방해석이 산출되나, 녹염석이 산출되지 않은 것은 이산화탄소 분압이 매우 낮았음을 지시한다. Weisenberger and Bucher (2010)의 상평형도에 근거해 볼 때, 방해석이 카올리나이트와 공존하면서 산출하려면 P_{CO_2} 는 최대 0.05 이하에 불과하다. 로몬타이트는 높은 pH와 낮은 P_{CO_2} 에서 안정하나 탄산기가 존재할 시 용해되므로(Crossey *et al.*, 1984), 단층열극을 순환한 열수용액은 중성, 약알칼리성이며, 거의 H_2O 로 이루어졌을 것이다. 특히 로몬타이트는 사장석의 교대작용과 유체로부터 침전작용, 아틀라리아는 주로 유체로부터 침전되어 형성되었을 것이다.

함수광물인 로몬타이트를 생성시킨 변질작용은 H_2O 가 풍부한 환경하에서 Ca를 비롯한 알칼리원소가 공급되었음을 지시한다. 반응성이 높은 Ca-사장석류는 심하게 변질, 용해되어 있으므로 사장석이 유체에서 알칼리원소와 실리카의 공급원으로 작용한 것으로 보인다. 유체와 접하는 장석의 표면은 점차 Ca, Na, K가 용탈되는데, 이때의 장석의 용해속도는 비정질의 실리카보다 빠르다(White and Brantley, 1995). 따라서 유체에 가장 영향을 주는 규산염 광물은 화강암질 단층암에서 풍부하게 함유되어 있는 장석일 것이다. 석영은 단층암에서 풍부한 광물이지만 이차기원의 석영은 풍부하게 관찰되지는 않는다. 석영의 용해도는 중성에서 매우 낮기 때문에 여러 용해조직을 보여주고 있음에도 실제로 유체에 용해되는 정도는 미미한 것으로 보인다.

아틀라리아는 K가 풍부한 유체로부터 저온에서

새롭게 형성된 것이므로 일종의 천연수광상에서 일어나는 K-변질작용과 흡사하다. 실제로 아틀라리아가 흔히 산출하는 활성지열대나 천연수 광상은 단층대와 밀접히 수반된다(Steiner, 1970; Browne, 1978; Cerny and Chapman, 1986; Dong and Morrison, 1995; Gudmundsson and Arnórrsson, 2005). 단층대에서 아틀라리아는 200°C 이하의 저온에서 주로 열수용액으로부터 이차적으로 생성된 경우가 대부분이므로 기존의 모암의 용탈작용이나, 단층활동과 관련한 마그마성 열수의 특성을 반영하고 있다. 이에 반해 조암광물인 K-장석류(새니딘, 정장석, 미사장석)는 고온에 형성되며, 가장 온도가 낮은 미사장석의 경우도 최대 400°C 이하에서 결정화되는데, 이들 K-장석류 광물종들은 XRD분석만으로도 서로 구분이 가능하다. 그러나 아틀라리아는 저온에서 유체로부터 빠르게 형성되므로 비평형적 구조, 형태적 복잡성과 다양성이 나타나기 때문에 XRD로써는 조암광물의 K-장석류와는 구분이 어려우며(Smith, 1974; Cerny and Chapman, 1986), ^{27}Al NMR, ^{29}Si NMR분석에 따르면 T자리의 질서도 범위도 기존의 K-장석류와 겹치면서 폭 넓게 나타난다(Zhou, *et al.*, 2001). 즉 아틀라리아의 구조는 질서도가 높은 미사장석에서부터 극히 무질서한 새니딘 구조까지 다양하게 나타날 수 있다(Smith, 1974; Cerny and Chapman, 1986). 그러므로 아틀라리아만의 고유한 구조를 명확하게 규정하기 어렵다. 그보다는 산출환경, 자형의 형태, K-단성분에 가까운 독특한 화학조성으로써 아틀라리아를 판단할 필요가 있다.

현재 모든 국내 단층관련 연구에서는 아틀라리아의 산출자체를 기재하지 않고 있으며, 이로 인해 저온성, 이차적 기원인 아틀라리아가 단층대에서 형성되는 의미를 간과하고 있다. 국내의 기존의 단층연구에서는 단층비지대 위주로 시료를 채취하며, 주로 XRD로써 감정하기 때문에 K-장석의 광물종을 정확하게 분석하지 않는 경향이 있으므로 이들은 실제로 아틀라리아일 가능성이 높다. 일례로, 동태단층대의 비지대에서 맥상의 홀란드타이트와 수반되는 자형의 K-장석(Choo and Chang, 2000)은 육각형의 형태, K-단성분, 맥상의 산출조직에 근거하면 이는 이차적으로 생성된 아틀라리아가 분명하다. 국내 단층대에서 흔히 형성되는 자형의 K-장석이 K-단성분에 가까운 화학조성을 가지는 경우, 이는 마그마성 조암광물의 K-장석류와는 엄연히 다르다.

결 론

단층파쇄작용으로 인해 투수성이 높아진 화강암질 모암은 열수와 반응하여 Ca, K와 같은 알칼리 원소를 용탈시켰으며, 중성-약알칼리성의 열수용액으로부터 각력대에 로몬타이트, 아둘라리아가 형성되었다. 로몬타이트와 아둘라리아는 사장석을 교대하거나, 유체로부터 비교적 빠르게 침전되어 자형을 이루면서 형성되었다. 이들이 특징적인 자형을 이루는 것은 단층대에서 최후기 변질작용의 산물임을 지시한다. 단층파쇄대에서 흔히 발달하는 로몬타이트와 아둘라리아와 같은 저온성 변질광물의 형성과정과 성인은 천열수광상에서 흔히 일어나는 모암변질, 열수반응과 유사하다. 특히 아둘라리아는 자형으로 다양한 결정형을 보이는데, 화학 조성은 거의 단성분 K-장석류에 가깝다. 저온에서 이차적으로 형성되는 아둘라리아의 독특한 화학조성과 자형의 특징은 조암광물의 K-장석류와 구분되므로 국내의 단층대에서 흔히 산출하는 K-장석은 아둘라리아로 간주해야 한다.

사 사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 방사성폐기물 관리기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(201017102002C). XRD 및 SEM 분석은 한국기초과학연구원 대구센터에서 수행되었으며, 두 분의 심사위원께 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

김건영, 고용권, 최병영, 신선호, 김두행 (2008) 중, 저온 위 방사성폐기물 처분부지의 지구화학 특성 II. 암석 및 광물. 방사성폐기물학회지, 6, 307-327.
 박성민, 강한, 장윤득, 임창복, 김정진 (2007) 제4기 입실 단층 파쇄대에서 나타나는 단층점토의 산출상태에 따른 광물조성 연구: 고해상도분말회절 분석을 중심으로. 광물학회지, 20, 83-89.
 유장한(2008) 우리나라 동부 젊은 단층대에서 산출되는 일부 저변성광물류와 중요성. 2008 한국암석학회·한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 167-170.
 유장한, 김용욱 (2009) 우리나라 동해안 인접 젊은 단층대의 저변성광물류와 그 중요성. 2009 자원환경지질학회, 지질공학회, 지질학회, 석유지질학회 공동학술발표회 243-244.
 이석훈, 정창식, 손병국, 임창복 (2000) 울산단층대 신기 단층 비지의 광물학적 특성 및 생성환경, 2000년 한

국암석학회, 한국광물학회 공동학술발표회 논문집, 46-49.
 이영민, 김종찬, 구민호, 김영석(2009) 단층대에서의 열수리적 거동 모델링. 자원환경지질학회지, 42, 609-618.
 이창섭, 이효민 (2009) 양산단층을 통과하는 북안터널구간의 열수변질작용과 공학적 특성. 한국광물학회지, 22, 13-22.
 장태우, 추창오 (1998) 동래단층 지역 단층비지의 생성과정과 K-Ar 연령. 지질공학회지, 8, 175-188.
 장태우, 채연준 (2004) 울산단층 동부지역 제4기 단층 비지에서 단층작용과 열수활동. 대한지질학회지, 40, 469-479.
 장태우, 장윤득 (2008) 단층비지대의 성장: 경주시 양북면 부근의 사례. 지질공학회지, 18, 135-143.
 추창오, 장태우, 장천중, 김수정, 장윤득 (2011) 경주시 양북면 단층대에서의 로몬타이트의 산출특징과 단층활동 환경에 대한 고찰. 춘계지질과학기술 공동학술대회 논문집. 226.
 Akizuka, M. and Sunagawa, I. (1978) Study of the sector structures in adularia by means of optical microscopy, infra-red absorption, and electron microscopy. Min. Mag., 42, 453-462.
 Gudmundsson, B.T. and Arnórrsson, S. (2005) Secondary mineral-fluid equilibria in the Kraflaand Námafjall geothermal systems, Iceland. Appl. Geochem., 20, 1607-1625.
 Browne, P.R.L. (1978) Hydrothermal alteration in active geothermal fields. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 6, 229-250.
 Buchanan, L.J. (1981) Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest. In: Dickinson, W.R. (eds.) Relations of tectonics to ore deposits in the South Cordillera. Arizona Geological Society Digest, 14, 237-262.
 Cerny, P. and Chapman, R. (1984) Paragenesis, chemistry and structural state of adularia from granitic pegmatites. Bull. Min., 107, 369-384.
 Cerny, P. and Chapman, R. (1986) adularia from hydrothermal vein deposits: extremes in structural state. Can. Min., 24, 717-728.
 Choo, C.O. and Chang, T.W. (2000) Characteristics of clay minerals in gouges of the Dongrae Fault, Southeastern Korea, and implications for fault activity. Clay Clay Min., 48, 204-212.
 Crossey, L.J., Frost, B.R., and Surdam, R.C. (1984) Secondary porosity in laumontite-bearing sandstones: Part 2. Aspects of porosity modification. AAPG Special Volumes, 37, Clastic Diagenesis, 225-237.
 Deer, W.A., Howie, R.A., Wise, W.S., and Zussman, J. (2006) Rock-Forming Minerals, Vol. 4B: Framework Silicates-Silica Minerals, Feldspatoids and Zeolites. Geol. Soc. London. 2nd ed., 982p.

- Dong, G. and Morrison, G.W. (1995) Adularia in epithermal veins, Queensland: morphology, structural state and origin. *Miner. Depos.*, 30, 11-19.
- Ghobarkar, H. and Schaf, O. (1998) Hydrothermal synthesis of laumontite, a zeolite. *Micropor. Mesopor. Mat.*, 23, 55-60.
- Goddard, J.V. and Evans, J.P. (1995) Chemical changes and fluid-rock interaction in faults of crystalline thrust sheets, northwestern Wyoming, U.S.A. *J. Struct. Geol.*, 17, 533-547.
- Hedenquist, J.W. and Lowenstern, J.B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.
- Henley, R.W. (1985) The geothermal framework of epithermal deposits. In: Berger, B.R. and Bethke, P.M. (eds.), *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems. Reviews in Economic Geology*, Vol. 2, Soc. Econ. Geol., 1-24.
- Herald, P., Foley, N.K., and Hayba, D.O. (1987) Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types. *Econ. Geol.*, 82, 1-26.
- Liou, J.G. (1971) Stilbite-laumontite equilibrium. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 31, 171-177.
- McCulloh, T.H., Frizzell Jr., V.A., Stewart, R.J., and Barnes, I. (1981) Precipitation of laumontite with quartz, thenardite, and gypsum at Sespe hot springs, western transverse ranges, California. *Clay Clay Min.*, 29, 353-364.
- Reed, M.H. and Spycher, N.F. (1985) Boiling, cooling, and oxidation in epithermal system: a numerical modelling approach. In: Berger, B.R., Bethke, P.M. (eds.) *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems. Rev. Econ. Geol.*, 2, 249-272
- Reynolds, D. (1929) Some new occurrences of authigenic potash feldspars. *Geol. Mag.*, 66, 390-399.
- Sibson, R.H., Moore, J.M., and Rankin, A.H. (1975) Seismic pumping a hydrothermal fluid transport mechanism. *Jour. Geol. Soc. London*, 131, 653-659.
- Silver, L.T. and James, E.W. (1988) Geologic setting and lithologic column of the Cajon Pass deep drillhole. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 941-944.
- Smith, J.V. (1974) *Feldspar Minerals. I. Crystal structure and physical properties*. New York, Springer-Verlag, 1627p.
- Steiner, A. (1970) Genesis of hydrothermal K-feldspar (adularia) in an active geothermal environment at Wairakei, New Zealand. *Min. Mag.*, 37, 916-922.
- Tanaka, H., Uehara, N., and Itaya, T. (1995) Timing of cataclastic deformation along the Akaishi Tectonic Line, central Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120, 150-158.
- Vincent, M.W. and Ehlig, P.L. (1988) Laumontite mineralization in rocks exposed north of San Andreas Fault at Cajon Pass, southern California. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 977-980.
- Weisenbergner, T. and Bucher, K. (2010) Zeolites in fissures of granites and gneisses of the Central Alps. *J. Metamorph. Geol.*, 28, 825-847.
- White, A.F. and Brantley, S.L. (1995) Chemical weathering rates of silicate minerals: An overview. In: White, A.F. and Brantley, S.L. (eds), *Chemical Weathering Rates of Silicate Minerals, Reviews in Mineralogy*, Vol. 31, Mineral. Soc. America, 1-22.
- Zhou, L., Guo, J., Liu, B., and Jiugao1, Li, L. (2001) Structural state of adularia from Hishikari, Japan. *Chin. Sci. Bull.*, 46, 950-953.

접수일(2012년 3월 20일), 수정일(1차 : 2012년 3월 26일),
 게재확정일(2012년 3월 27일)