

전자현미경을 이용한 Anorthoclase의 미세구조 및 화학 연구

A Study on Microstructures and Chemistry of Anorthoclase Using Electron Microscopy

이 영 부 (Young Boo Lee)^{1,*} · 김 윤 중 (Youn Joong Kim)¹ · 이 석 훈 (Seok Hoon Lee)¹ ·
이 정 후 (Jung Hoo Lee)²

¹한국기초과학지원연구원

(Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea)

²전북대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea)

요약: 알칼리 장석 중 고온 상인 anorthoclase의 미세구조 및 화학을 EPMA 및 TEM을 이용하여 분석하였다. Anorthoclase는 BSE image 상에서 Na-rich 지역과 K-rich 지역이 다양한 크기의 lamella를 형성하며 혼재되어 있으며, EPMA 분석 결과 Na-rich 지역은 평균 조성이 Ab: 81%, Or: 3%, An: 12%이며 K-rich 지역은 평균 조성이 Ab: 45%, Or: 44%, An: 11%로 나타났다. TEM 관찰 결과 Na-rich 지역은 엘바이트(albite) 쌍정 구조가 잘 발달한 반면 K-rich 지역은 다시 미세한 엘바이트 쌍정이 발달한 엘바이트와 쌍정이 없는 orthoclase가 약 100 nm의 규칙적인 lamellae 형태를 이루며 서로 섞여 있음이 드러났다. K-rich 지역의 [001] 전자회절도형도 두 상이 공존함을 보이는데, 엘바이트 회절점은 쌍정 구조에 의하여 (010)* 방향으로 streaking이 나타난다. 이에 비하여 (100)* 방향으로 엘바이트 회절점과 orthoclase 회절점이 모두 streaking을 가지는데 이는 Al과 Si의 배열-비배열 현상과 두 상의 계면 간에 나타나는 왜력(strain)에 기인한 것으로 여겨진다. 엘바이트와 orthoclase의 방향이 서로 반대로 나타나는 이유는 두 상의 계면 간의 왜력을 줄이기 위한 일종의 pole switching의 결과로 여겨진다. 위의 결과를 종합해 볼 때 연구된 광물은 중간 단계의 Al-Si 비배열 상태를 가지며 미세구조의 생성 온도가 400°C~600°C로 추정되기 때문에 고온 상인 anorthoclase라기보다는 보다 저온 상인 cryptoperthite라 할 수 있다.

주요어 : anorthoclase, lamella, 엘바이트 쌍정, Al-Si의 배열-비배열, 왜력

ABSTRACT: Microstructures and chemistry of anorthoclase, a high-temperature phase of alkali feldspars, were studied using EPMA and TEM. BSE images of anorthoclase displayed mixtures of Na-rich areas and K-rich areas forming lamella of various sizes. EPMA analysis indicated that the Na-rich area is composed of Ab: 81%, Or: 3% and An: 11% in average, while the K-rich area is composed of Ab: 45%, Or: 44% and An: 11% in average. TEM analysis revealed albite with Albite twins in the Na-rich area, contrasting to mixtures of albite with fine Albite twins and orthoclase without twins, forming regular lamella of about 100 nm sizes, in the K-rich area. The [001] electron

*교신저자: yblee@kbsi.re.kr

diffraction pattern of the K-rich area also indicated coexistence of the two phases. While streaking parallel to the (010)* direction appeared only in albite due to the twin structure, streaking parallel to the (100)* direction appeared both in albite and orthoclase, probably due to strain on the interface as well as order-disorder phenomena of Al and Si. It is suggested that the reverse orientation of albite and orthoclase is caused by pole switching to reduce strain on their interfaces. Based on these observations and analyses, the mineral studied is identified as lower-temperature cryptoperthite rather than high-temperature anorthoclase, which has a midium degree of Al-Si ordering and 400 °C ~ 600 °C of estimated temperatures for the microstructure formation.

Key words : anorthoclase, lamella, Albite twin, Al-Si order-disorder, strain

서 언

알칼리 장석은 Al과 Si의 배열-비배열(order-disorder) 차이에 따라 구조적으로 저온 상(ordered phase)과 고온 상(disordered phase)으로 크게 구분되는데, anorthoclase ((Na, K)AlSi₃O₈)는 고온형 엘바이트(high albite)와 같은 정도의 비배열 상태를 갖는 고온 상으로 알려져 왔다. 또한 anorthoclase는 생성 온도에 따른 상전이 및 용리(exsolution) 현상과 관련된 광학현미경으로 관찰하기 어려운 미세구조를 형성한다고 보고되었다(Smith and Brown, 1988; Parsons, 1994; Deer *et al.*, 2001).

알칼리 장석에 대하여 선행된 많은 연구에서는 연정(intergrowth)을 이룬 상 관계는 전자현미분석기(EPMA)를 이용한 각 상의 화학성분을 분석하는 방법으로 수행되었다(Martin, 1974; Smith, 1974). 그러나, 전자 beam을 이용하여 화학분석을 할 때는 전자 beam에 민감한 양이온의 거동에 유의해야 할뿐만 아니라 최소 크기의 beam보다 더 작은 연정이 존재하는가를 확인하지 않으면 EPMA 분석의 결과를 상평형에 적용하는 데는 한계가 있다.

지금까지 알칼리 장석의 구조 연구는 주로 XRD를 이용하여 ordering의 정도와 성분변화에 따른 격자상수의 변화를 파악하는 것이 주종을 이루었다(Ribbe, 1983). 그러나, 고온 상인 anorthoclase는 부분적으로 다른 크기의 연정을 가질 수 있으며 이에 따라 각각의 부분에 나타나는 strain 상황, ordering 정도 그리고 화학성분이 다를 수 있기 때문에 정확한 구조 연구를 위해서는 XRD 연구와 함께 미세구조 및 화학에 대한 투과전자현미경(TEM)의 병행연구가 필수적으로 요구 된다(Xu *et al.*, 2000; Kim and Lee, 2003).

이번 연구에서는 장석의 미세구조에 대한 전반적인 연구의 일환으로 anorthoclase에 대한 EPMA 분석과 TEM 관찰을 통하여 미세구조와 화학성분에 대하여 연구하였다. EPMA 분석 값을 알칼리 장석의 상평형도에 적용하여 미세구조의 생성 온도를 유추하였고 TEM 전자회절도형에서 얻은 V^* 값을 XRD 자료를 근거로 한 성분-구조 도표에 적용하여 Al-Si의 ordering 상태를 유추하였으며 이를 EPMA 분석으로 얻은 결과와 비교하였다.

연구방법

Anorthoclase 시료는 미국 Ward 사에서 판매하는 표준시료(Larvik, Norway)를 사용하였다. BSE image로 연정관계를 확인하면서 EPMA 분석을 하였으며 EPMA 분석이 된 지역에 대하여 TEM 관찰용 시편을 ion milling하여 제작하였다(Kim and Lee, 2003).

EPMA 분석은 Cameca사의 SX-51과 경통에 부착된 파장분산분광기(WDS)를 사용하였다. 각 원소별로 20초 동안 분석하였으며 주 구성원소의 분석시간이 80초를 넘지 않도록 하였다. Focused beam (beam size = 0.8 μ m)을 사용하였으며 20 kV, 10 nA의 조건에서 분석하였다.

TEM 분석은 Carl Zeiss(현재 LEO)사의 에너지 여과 투과전자현미경(EF-TEM)인 EM 912Omega와 경통에 부착된 에너지분산분광기(EDS)를 이용하여 120 kV에서 수행하였다. 에너지 여과된 전자회절도형은 양축경사 시료지지대를 사용하여 주로 580 mm와 1440 mm의 카메라 길이에서 얻었다. 전자회절도형을 이용한 Al-Si의 배열 상태를 파악하기 위해 Lee and Kim (1999)에 보고된 정밀한 측정도구 및 방법을 이용하였다.

연구결과

EPMA 분석

BSE image는 관찰하는 광물의 평균 원자번호에 의해서 밝기가 달라지므로 미세한 크기로 혼재된 광물 조직을 연구하는데 매우 유용하다. 연구에 이용한 anorthoclase는 BSE image 상에서 Na-rich 지역(어두운 색)과 K-rich 지역(밝은 색)이 다양한 크기의 lamella를 형성하며 혼재되어 있음이 관찰되었다(Fig. 1).

혼재된 부분에서 1 μm 이상의 크기를 가지는 각각의 lamella에 대해 EPMA 분석을 실시하였다. 그 결과 Na-rich 지역은 평균 Ab: 80%, Or: 3%, An: 12%의 값으로 나타났으며 K-rich 지역은 평균 Ab: 45%, Or: 44%, An: 11%의 값으로 나타났다(Table 1). Na-rich 지역의 분석 값은 lamella의 크기와 위치에 관계없이 비교적 일정한 분석 값을 보인 반면에 K-rich 지역의 분석 값은 표준편차가 Na-rich 지역의 분석 값에 비하여 높게 나타났다.

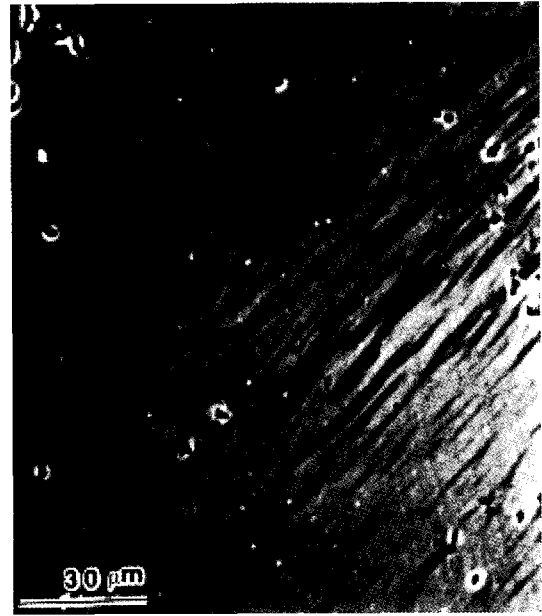


Fig. 1. An EPMA-BSE image showing intergrowth microstructures in anorthoclase studied. The Na-rich area shows dark contrast, while the K-rich area shows light contrast.

Table 1. EPMA data and structural formula for anorthoclase studied

	Na-rich area							Avg.
SiO ₂	65.63	66.01	66.63	65.52	65.46	67.02	66.68	66.14(0.64)
TiO ₂	0.12	0.06	0.08	0.05	0.11	0.05	0.05	0.07(0.03)
Al ₂ O ₃	21.63	21.48	21.13	21.37	21.43	21.46	21.16	21.38(0.18)
Fe ₂ O ₃	0.13	0.14	0.66	0.04	0.17	0.18	0.18	0.22(0.20)
MgO	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02(0.05)
CaO	2.78	2.50	2.32	2.45	2.50	2.37	2.32	2.46(0.16)
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0(0.00)
Na ₂ O	9.45	9.48	8.19	10.02	10.14	9.57	9.39	9.46(0.63)
K ₂ O	0.96	0.41	0.44	0.37	0.40	0.40	0.77	0.54(0.23)
Total	100.70	100.07	99.58	99.83	100.22	101.06	100.55	100.28(0.51)
Si	2.88	2.90	2.92	2.89	2.88	2.91	2.91	2.90(0.02)
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.00)
Al	1.12	1.11	1.09	1.11	1.11	1.10	1.09	1.10(0.01)
Fe	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01(0.01)
Mg	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.00)
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0(0.00)
Sum	4.00	4.01	4.05	4.00	4.00	4.02	4.01	4.01(0.02)
Ca	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12(0.01)
Na	0.80	0.81	0.70	0.86	0.86	0.81	0.80	0.80(0.05)
K	0.05	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03(0.01)
Sum	0.99	0.95	0.83	0.99	1.01	0.94	0.95	0.94(0.06)

Table 1. (Continued.)

K-rich area								Avg.
SiO ₂	63.79	61.58	63.42	63.49	63.34	63.48	64.07	63.31(0.81)
TiO ₂	0.08	0.06	0.04	0.06	0.11	0.07	0.06	0.07(0.02)
Al ₂ O ₃	20.94	19.58	20.76	20.83	20.85	20.52	21.16	20.66(0.52)
Fe ₂ O ₃	0.14	1.64	0.14	0.14	0.09	0.21	0.14	0.36(0.57)
MgO	0.00	0.29	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.045(0.11)
CaO	2.42	1.79	2.30	2.46	2.31	1.87	2.44	2.23(0.28)
MnO	0.02	0.05	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.02(0.03)
Na ₂ O	5.98	2.55	5.46	5.11	5.18	4.26	7.12	5.09(1.43)
K ₂ O	6.22	11.18	7.02	7.77	7.63	8.69	4.65	7.59(2.04)
Total	99.58	98.73	99.15	99.85	99.57	99.09	99.64	99.37(0.39)
Si	2.88	2.87	2.88	2.88	2.88	2.90	2.88	2.88(0.01)
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.00)
Al	1.11	1.08	1.11	1.11	1.12	1.10	1.12	1.11(0.02)
Fe	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01(0.01)
Mg	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.01)
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00(0.00)
Sum	4.00	4.03	4.00	4.00	4.00	4.01	4.00	4.01(0.01)
Ca	0.12	0.09	0.11	0.12	0.11	0.09	0.12	0.1(0.01)
Na	0.52	0.23	0.48	0.45	0.46	0.38	0.62	0.45(0.12)
K	0.36	0.66	0.41	0.45	0.44	0.51	0.27	0.44(0.12)
Sum	1.00	0.98	1.00	1.02	1.01	0.98	1.00	1.00(0.01)

TEM 분석

Lamella가 형성된 부분에 대한 TEM 관찰 결과 Na-rich 지역은 약 1 μm 정도의 크기를 가지며 엘바이트 쌍정이 잘 발달된 단일 상을 보였다. 엘바이트 쌍정의 폭은 약 140 nm 정도이며 매우 균일하게 나타났다. 이에 비하여 K-rich 지역은 다시 미세한 엘바이트 쌍정이 발달한 지역과 쌍정이 없는 지역이 약 100 nm 정도 크기의 규칙적인 lamella 형태를 이루며 서로 섞여 있음이 관찰되었다(Fig. 2). EDS 분석 결과 엘바이트 쌍정이 발달한 지역은 화학적으로도 순수한 엘바이트이며 엘바이트 쌍정이 발달하지 않은 지역은 orthoclase 성분으로 나타났다. 미세하게 발달한 엘바이트 쌍정은 15~20 nm 정도의 폭을 가지는데, 엘바이트 쌍정이 나타나는 각각의 lamella의 크기가 클수록 쌍정의 폭도 비례하여 커지는 경향이 있다.

전자회절도형의 관찰 결과 1 μm 정도로 성장한 Na-rich 지역과 K-rich 지역은 각각의 방향이 약 5°정도 경사져 있음이 드러났다. K-rich 지역

의 [001] 전자회절도형은 엘바이트와 orthoclase의 두 상이 공존함을 보이는데 엘바이트와 orthoclase는 b^* 방향이 서로 반대로 나타남이 특징적이다(Fig. 3). 이 중에서 (010)* 방향으로서는 엘바이트 회절점만이 streaking을 가짐에 반해, (100)* 방향으로서는 엘바이트 회절점과 orthoclase 회절점이 모두 streaking을 가지는데 orthoclase 회절점에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

Na-rich 지역의 엘바이트에 대한 [001] 전자회절도형의 분석에서는 (010)면과 (100)면 사이의 각(γ^*)은 89.4°로, (110)면 및 ($\bar{1}\bar{1}0$)면과의 각은 각각 59.6°와 119.0°로 측정되었다. 한편, K-rich 지역의 [001] 전자회절도형 분석에서는 엘바이트의 (010)면과 (100)면 사이의 각(γ^*)은 89.3°로, (110)면 및 ($\bar{1}\bar{1}0$)면과의 각은 각각 60.1°와 119.5°로 측정되었다. 이에 비해 orthoclase의 (010)면과 (100)면 사이의 각(γ^*)은 90.7°로, (110)면 및 ($\bar{1}\bar{1}0$)면과의 각은 각각 59.4°와 121.5°로 측정되었다(Table 2).

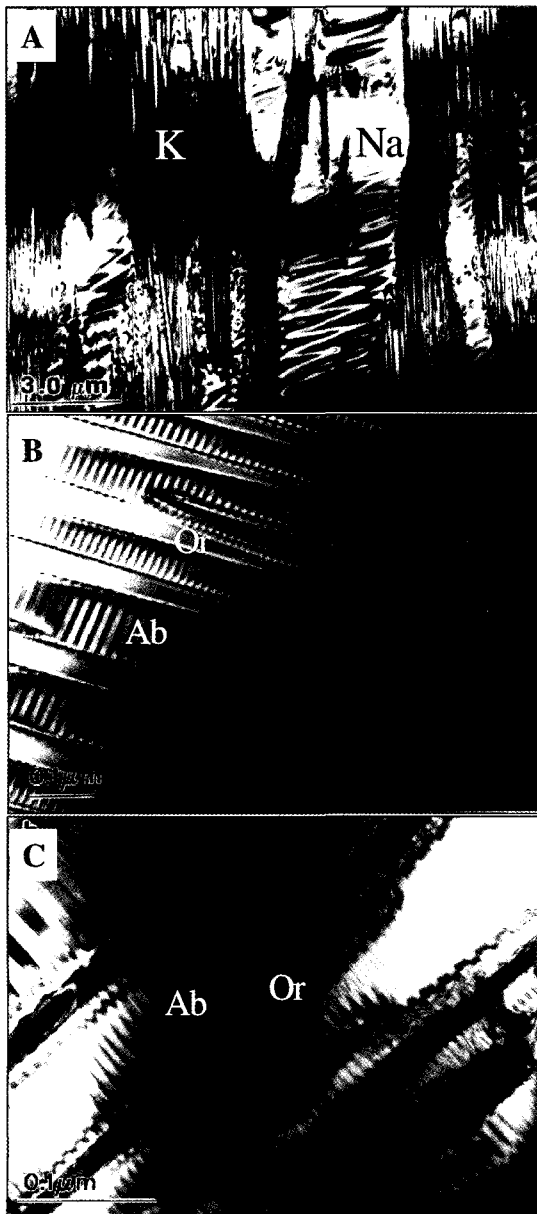


Fig. 2. Low (a) medium (b) and high (c) magnification images show intergrowth microstructures and albite twinning. Na: Na-rich area, K: K-rich area, Ab: Albite, Or: Orthoclase.

결과 분석 및 토의

EPMA 분석

결정질 또는 비정질 물질에 대하여 EPMA를

할 때 원자번호가 낮은 원소들은 전자 beam에 의하여 쉽게 영향을 받으며, 그 결과 해당 원소 뿐만 아니라 구성되어 있는 다른 원소의 분석 값에도 영향을 준다. 이번 연구의 대상 광물인 anorthoclase는 전자 beam에 쉽게 영향을 받는 Na와 K가 중요한 구성 원소이다. 이들 양이온들의 거동을 보기 위하여 EPMA 분석을 실시하기 전에 전류량을 변화시키면서(20 nA, 10 nA) 10 초 간격으로 150초 동안 동일 지점에 beam을 조사하여 분석결과를 알아보았다. Fig. 4a에 나타난 바와 같이 20 nA의 전류량으로 분석할 경우 약 50초가 지난 후부터는 Na와 K의 분석값이 감소하는 결과를 보였는데 특히 Na의 값의 변화가 현저하였다. 다른 주 구성 성분인 Si와 Al은 일정한 값을 보였으며 상대적으로 약간 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 비하여 10 nA의 전류량으로 실험한 결과(Fig. 4b) 모든 측정 원소의 값이 20 nA의 경우처럼 현저한 변화는 보이지 않았다. 이상의 결과는 상대적으로 결합력이 약한 Na 및 K 원소의 최외각 전자가 집중되는 전자 beam에 의하여 쉽게 그 위치를 이탈하여 나타나는 현상(이온화 현상)과 이에 따른 증발 현상에 의한 것으로 여겨지며 그 결과 WDS나 EDS 정량분석에서 분석값에 상당한 오류를 일으킬 가능성이 있음을 지시한다. 이러한 오차를 줄이기 위해 EPMA 분석 조건으로 10nA의 전류량을 사용하였으며 주 구성성분에 대한 분석을 80초 이내에 마칠 수 있도록 하였다.

Na-rich 지역과 K-rich 지역의 EPMA 분석값을 비교하면 K-rich 지역이 Na-rich 지역에 비해 상대적으로 분석값의 변화가 큰데 이는 K-rich 지역이 엘바이트와 orthoclase의 미세한 연정으로 이루어져 있기 때문이라고 사료된다. 즉, 연정의 크기(약 0.1 μm)가 EPMA 분석에서 사용하는 전자 beam의 크기(약 0.8 μm)보다 작아서 분석하는 지역에 따른 편차가 크게 된다.

Na-rich 지역의 평균 성분을 An의 값을 무시하고 normalize한 Ab와 Or의 값(Ab: 96.4%, Or: 3.6%)으로 Thompson과 Waldbaum(1969)이 제시한 strain-free solvus line에 적용해보면 약 450 $^{\circ}\text{C}$ 정도의 생성 온도를 얻는다(Fig. 5). 이 값은 용리된 다른 상인 Or-rich 상의 성분이 불확실하고 12%에 달하는 An의 값이 고려되지 않았기 때문에 의미를 부여할 수 없다. 반면 K-rich 지역의 분석값은 0.1 μm 이하의 전자빔을 이용하여 엘

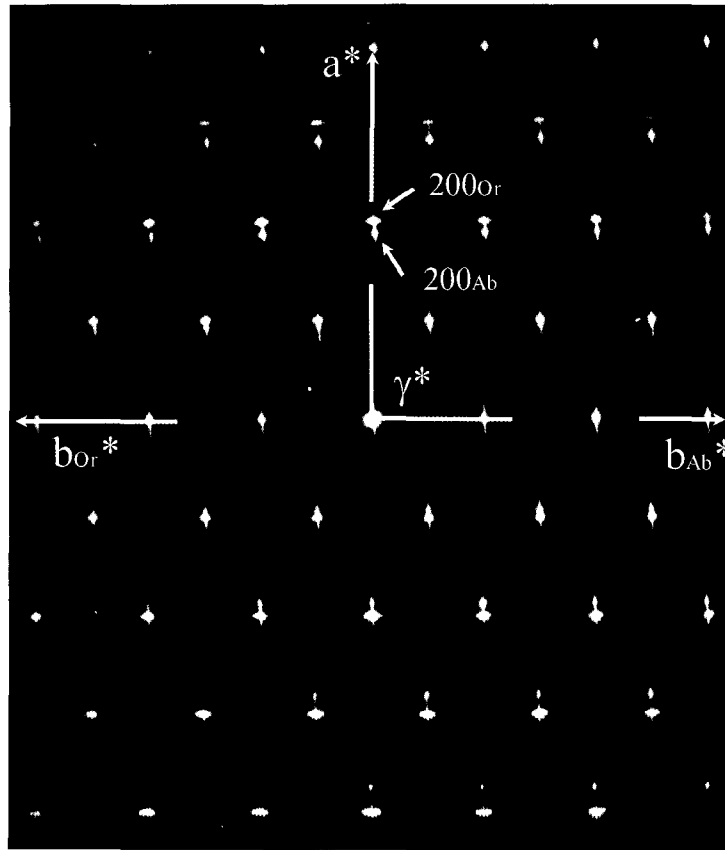


Fig. 3. The [001] electron diffraction pattern of albite and orthoclase from the K-rich area. Note the directions of b^* in albite and orthoclase are opposite each other.

Table 2. Interplanar angles measured from the [001] electron diffraction patterns of anorthoclase with reference data (Kroll, 1971). (LA: Low Albite; HA: High Albite; LM: Low Microcline; MF: Monoclinic Feldspar)

Interplanar Angle	LA (Ref.)	HA (Ref.)	LM (Ref.)	MF (Ref.)	Albite (Na-rich area)	Albite (K-rich area)	Orthoclase (K-rich area)
$(010) \wedge (100)$ (= γ^*)	90.46	87.96	92.35	90	89.4	89.3	90.7
$(010) \wedge (110)$	60.65	58.85	60.94	59.31	59.6	60.1	59.4
$(010) \wedge (1\bar{1}0)$	120.10	118.06	122.52	120.69	119.0	119.5	121.5

바이트와 orthoclase의 각각의 평균 조성을 먼저 정확히 구한 다음 두 상의 계면에서 생기는 strain을 고려한 coherent solvus line(Sipling and Yund, 1976)을 이용해야 하기 때문에 현재의 EPMA 값을 그대로 적용할 수 없다. TEM을 이용한 화학분석이 대안이 될 수는 있으나 정량적

인 값을 얻기 위해서는 보다 체계적인 분석 방법이 시도되어야 한다.

TEM 분석

Anorthoclase 또는 perthite에서 관찰되는 lamellae

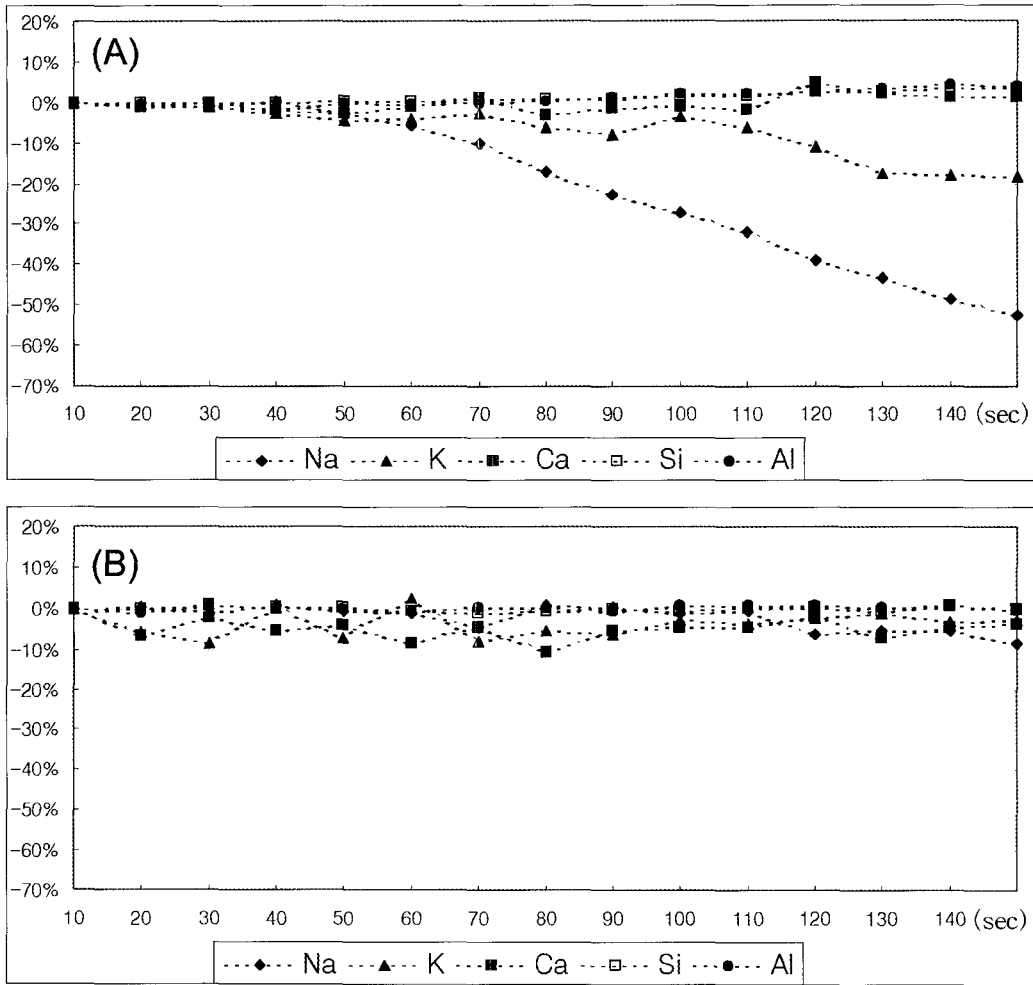


Fig. 4. Plot of time (x-axis) versus change of X-ray count (y-axis) utilizing focused beam of 20 nA current (a) and 10 nA current (b).

의 형태와 발달정도에 따라서 광물이나 미세구조의 생성 온도나 변성 온도의 추정이 가능하다 (Brown and Willaime, 1974; Willaime *et al.*, 1976; Brown and Parsons, 1984). TEM image에서 관찰된 lamella의 형태에 따라 연구에 사용된 광물을 Brown과 Parsons (1984)에 의하여 정리된 자료(Fig. 6)에 적용하면 K-rich 지역에서 엘바이트에는 쌍정이 잘 발달하였으나 orthoclase에는 쌍정이 잘 나타나지 않은 점과 계면이 직선이나 약간의 곡선 상으로 발달한 점을 미루어 보아 stage 6에서부터 stage 8 사이의 상태에 해당함을 알 수 있다. Fig. 6에서 제시하는 온도 자료를 보

면 K-rich 지역은 400°C ~ 600°C의 온도에서 생성되었다고 유추할 수 있다.

[001] 방향에서 측정된 각 지역의 면각에서 v^* 값(Table 2)을 Fig. 7과 같이 XRD 자료에 적용하였다(Stewart and Wright, 1974; Kroll and Ribbe, 1987). a^* 값을 측정하지 않았고 측정값의 숫자가 제한되었기 때문에 정확도에 문제점이 있기는 하지만 분석된 anorthoclase는 약 중간 정도의 Al-Si의 배열 상태를 보였다. 미세구조 및 Fig. 5부터 Fig. 7의 자료를 종합해 볼 때 분석된 광물은 알칼리 장석의 고온 상인 anorthoclase라기 보다는 보다 저온 상인 cryptoperthite에 해당한다고 말할

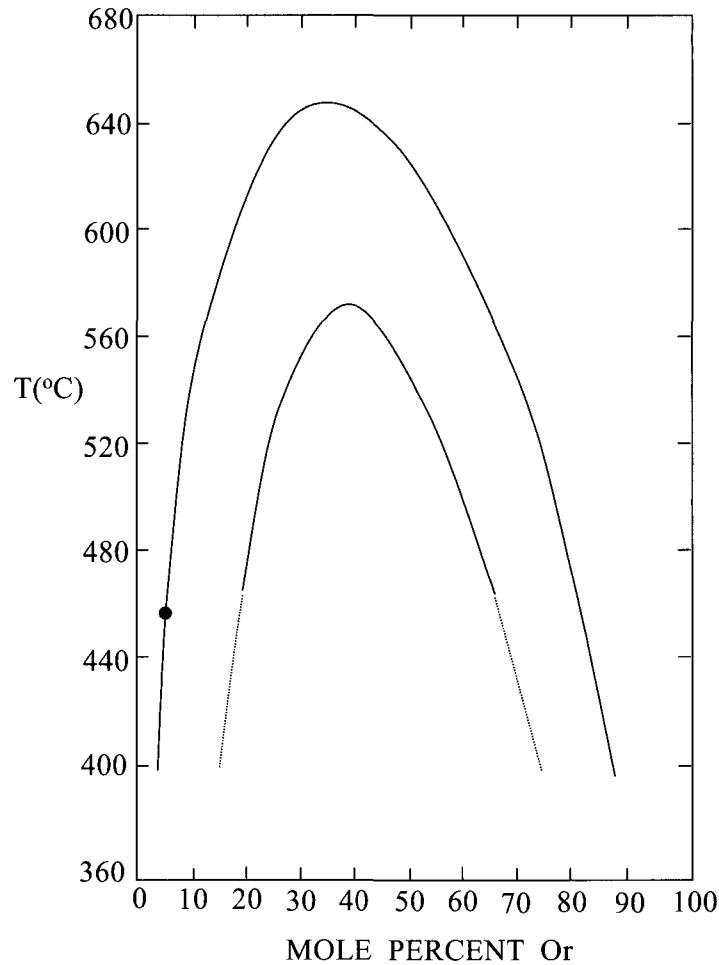


Fig. 5. Comparison of the strain-free solvus (upper curve) and the coherent solvus (lower curve) for the sanidine-high albite series. Albite from the Na-rich area is plotted on strain-free solvus. (After Ribbe, 1983).

수 있다.

K-rich 지역의 엘바이트와 orthoclase의 전자회절도형이 (100)*방향으로 streaking이 나타나는 점은 각각 광물의 화학적 성분차이와 함께 Al-Si의 order-disorder에 따른 strain이 원인이라고 추정되며, 확인되지는 않았지만 orthoclase에서는 tweed 구조가 발달했을 가능성이 높다(Kim and Lee, 2003). 이러한 화학적, 구조적 차이에 의해 엘바이트와 orthoclase의 계면에 특히 strain이 집중되는데, K-rich 지역에서 엘바이트와 orthoclase의 방향이 서로 반대로 위치하는 것은 이러한

strain을 줄이기 위한 일종의 pole switching의 결과로 여겨진다. 단사정계인 $C2/m$ 의 고온 장석이 냉각에 의해 삼사정계인 $C1$ 의 저온 장석으로 상전이하는 것은 대칭성 면에서 비추어 보면 장석이 강탄성(ferroelastic) 물질임을 지시하는데, 이러한 경우 상전이 된 저온상은 고유의 strain (spontaneous strain)을 갖게 되는 특징이 있다 (Aizu, 1970; Wadhawan, 1982; Salje, 1990). 아직까지 이러한 강탄성의 물성이나 pole switching의 관점에서 쌍정을 비롯한 장석의 미세구조에 대한 연구가 본격적으로 진행된 적이 없는데, 강자성

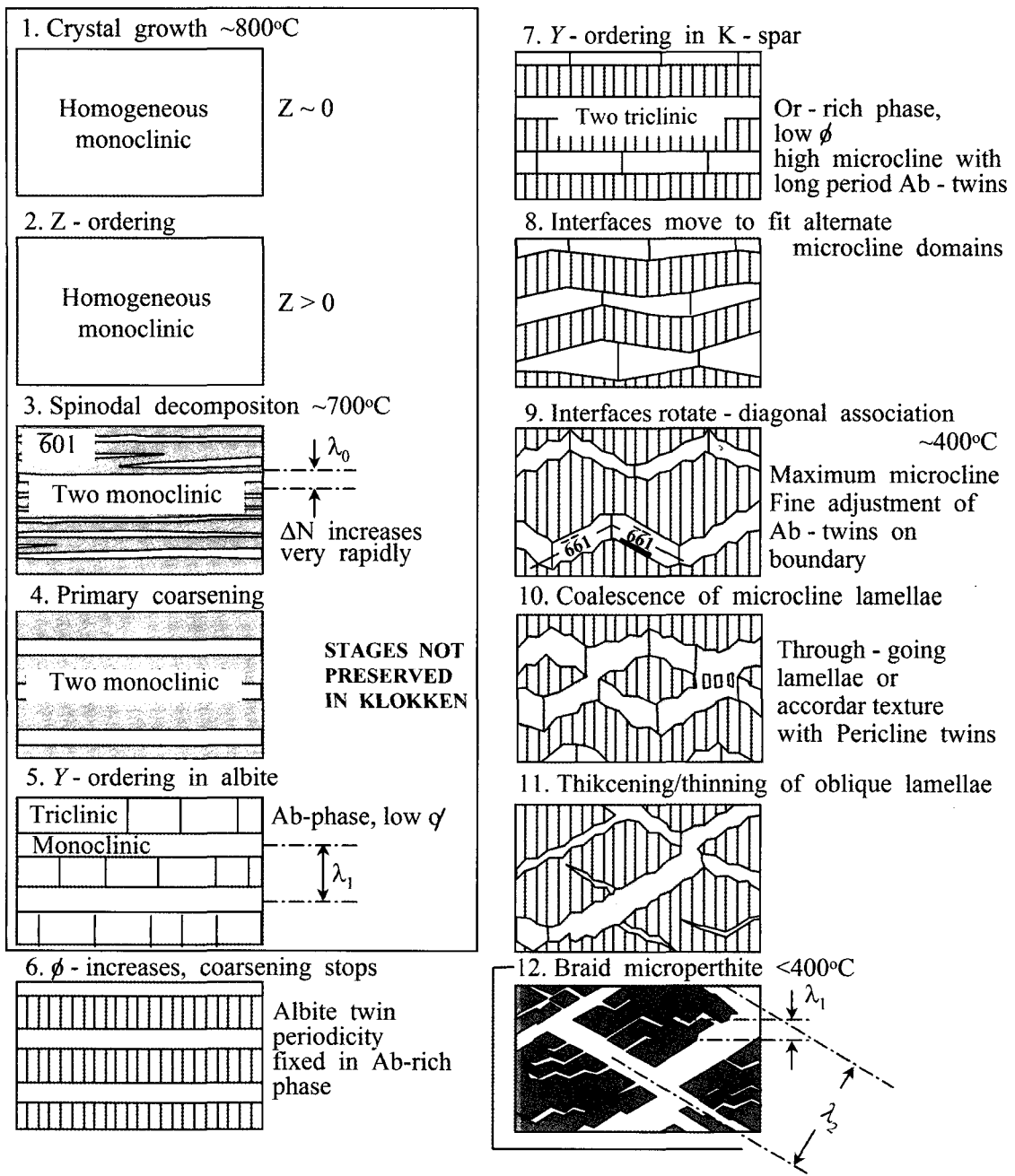


Fig. 6. Stages in the development braid micropertithes on cooling from liquidus temperature. The anorthoclase studied is applicable to the stage 6~stage 8. (After Brown and Parsons, 1984).

(ferromagnetic) 물질이 고자자기 상황을 지시해주는 것처럼 장석의 미세구조가 과거의 지질 환경을 지시해주는 귀중한 자료가 될 수 있다는 점과, 재료적인 측면에서도 장석을 단순한 원료로

이용하는 것이 아니라 부가가치가 높은 신소재로 이용할 가능성을 열어주기 때문에 앞으로 이와 관련된 보다 체계적이고 심도 있는 연구가 진행되어야 한다.

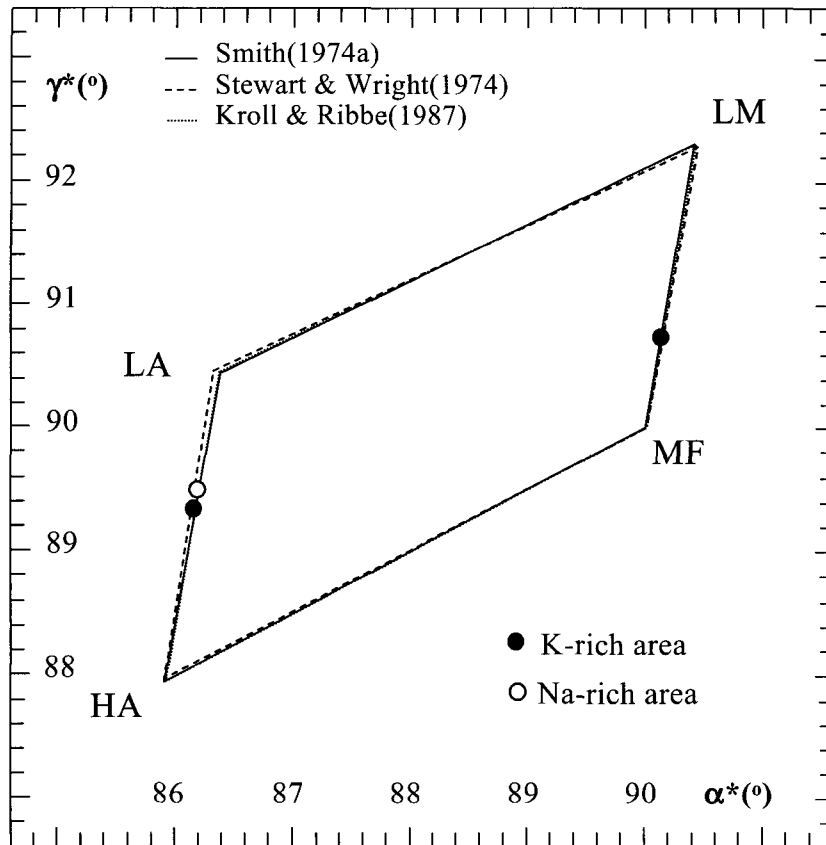


Fig. 7. Plot of a^* versus γ^* using XRD data (LM: Low Microcline, MF: Monoclinic Feldspar, HA: High Albite, LA: Low Albite). (After Smith and Brown, 1988).

그 동안 anorthoclase의 구조에 대한 연구는 주로 XRD에 의존하였으며 화학분석은 EPMA를 이용하였다. 그러나 마이크로미터 이하의 미세구조 및 화학의 분석을 XRD와 EPMA으로 수행하는 데는 한계가 있다. 이런 점에서 TEM을 이용한 연구는 하나의 대안이 될 수 있으며 또한 AFM을 이용한 연구도 새로운 시각과 해결 방안을 제시할 것으로 여겨진다(Xu *et al.*, 2000). 특히 장석의 sub-micrometer 영역에 대한 구조 및 화학의 정량적인 분석이 확립될 경우에는 지질환경 해석의 새로운 장을 열 수 있을 것으로 기대된다.

결 언

1) 장석의 EPMA 분석 중 구성 양이온들(Na,

K, Ca)은 전자빔에 의한 영향을 쉽게 받기 때문에 올바른 실험조건을 설정하는 것이 중요하다(예컨대, 10 nA의 전류량 및 80초 이내의 분석 시간 사용 등).

2) 연구한 anorthoclase는 엘바이트(albite) 쌍정이 잘 발달된 Na-rich 지역과, 미세한 엘바이트 쌍정이 발달한 지역과 쌍정이 없는 지역이 약 100 nm의 규칙적인 lamella 형태를 이루며 서로 섞여 있는 K-rich 지역으로 구분할 수 있다. 화학적으로 엘바이트 쌍정이 발달한 지역은 엘바이트이며 엘바이트 쌍정이 발달하지 않은 지역은 orthoclase이다.

3) Na-rich 지역과 K-rich 지역은 각각의 방향이 약 5°정도 tilt 되어 있고, K-rich 지역은 엘바이트와 orthoclase는 b^* 축 방향이 서로 반대로 나타난다. 엘바이트 회절점과 orthoclase 회절점은

들 다 뚜렷한 streaking을 보이는데 orthoclase 회절점에서 더욱 뚜렷하게 나타난다.

4) Anorthoclase의 미세구조는 상전이 과정 중 stage 6~stage 8에 해당함을 지시하며 분석된 광물은 anorthoclase라기 보다는 cryptoperthite라 할 수 있다. 중간 단계의 Al-Si 비배열 상태를 가지며 미세구조의 생성온도는 400°C~600°C로 추정된다.

5) 엘바이트와 orthoclase의 용리(exsolution)는 두 광물의 화학적인 차이와 Al과 Si의 order-disorder를 포함한 구조적 차이에 의해 계면에 많은 strain이 형성되는데, K-rich 지역에서 엘바이트와 orthoclase의 방향이 서로 반대로 위치하는 것은 이러한 strain을 줄이기 위한 일종의 pole switching의 결과로 여겨지며, 이러한 점에서 장석은 강탄성(ferroelastic) 물질임을 지시한다.

참 고 문 헌

- Aizu, K. (1970) Possible species of ferromagnetic, ferroelectric and ferroelastic crystals, *Phys. Rev. B2*, 754-772.
- Brown, W.L. and Persons, I. (1984) Exsolution and coarsening mechanism and kinetics in an ordered cryptoperthite series, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 96, 3-18.
- Brown, W.L. and Willaime, C. (1974) An explanation of exsolution orientations and residual strain in cryptoperthites: In, MacKenzie, W.S. and Zussman, J. (Eds.) *The feldspars*, Manchester Univ. Press: Manchester, 440-459.
- Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J. (2001) *Rock-Forming Minerals, Vol. 4A, 2nd eds., Framework Silicates: Feldspars*, The Geological Society, London, 972pp.
- Kim, Y-J. and Lee, Y-B. (2003) XRD and TEM investigation of structures and phase transformations in albite, *J. Mineral. Soc. Korea*, 16, 91-106.
- Kroll, H. (1971) Determination of Al, Si distribution in alkali feldspars from x-ray powder data, *N. Jahrb. Mineral. Monatsh.*, 91-94.
- Kroll, H. and Ribbe, P.H. (1987) Determining (Al, Si) distribution and strain in alkali feldspar using lattice parameter and diffraction peaks position, A review, *Am. Mineral*, 72, 791-506.
- Lee, Y-B. and Kim Y-J. (1999) An investigation of lattice parameter measurement of inorganic crystals by electron diffraction patterns, *J. Korean Society of Electron Microscopy*, 29, 75-81.
- Martin, R.F. (1974) Controls of ordering and subsoildus phase relation in the alkali feldspar: In, MacKenzie, W.S. and Zussman, J. (Eds.) *The feldspars*, Manchester Univ. Press: Manchester, 313-336.
- Parsons, I. (ed.) (1994) *Feldspars and Their Reactions*, Kluwer Academic Publishers, 650pp.
- Ribbe P.H. (ed.) (1983) *Feldspar Mineralogy*, 2nd ed., Review in Mineralogy, 2, Mineral. Soc. Am, 362pp.
- Salje, E.K.H. (1990) *Phase transitions in Ferroelastic and Co-elastic Crystals*, Cambridge Univ. Press, 281pp.
- Sipling, P.J. and Yund, R.A. (1976) Experimental determination of the coherent solvus for sanidine-high albite, *Am. Mineral*, 61, 897-906.
- Smith, J.V. (1974) *Feldspar Minerals. I. Crystal structure and Physical Properties*, Springer-Verlag: Heidelberg, 627pp.
- Smith, J.V. and Brown, W.L. (1988) *Feldspar Minerals*, Springer-Verlag, 828pp.
- Stewart, D.B. and Wright, T.L. (1974) Al/Si order and symmetry of natural alkali feldspars, and the relationship of stained cell parameter to bulk composition, *Bull. Soc. franc Mineral Cristallogr*, 97, 356-377.
- Thompson, J.B. and Waldbaum, D.R. (1969) Mixing properties of sanidine crystalline solutions. III. Calculations based on two-phase data, *Am. Mineral*, 54, 811-838.
- Xu, H., Veblen D.R., Buseck P., and Ramakrishna B.L. (2000) TEM and SFM of exsolution and twinning in an alkali feldspar, *Am. Mineral*, 85, 509-513.
- Wadhawan, V.K. (1982) Ferroelasticity and related properties of crystals, *Phase Transitions*, 3, 3-103.
- Willaime, C., Brown, W.L., and Gandais, M. (1976) Physical aspects of exsolution in natural alkali feldspars: In, Wenk, H.R. (Eds.) *Electron Microscopy in Mineralogy*, Springer Berlin, 248-257.

2003년 8월 3일 원고접수, 2003년 9월 7일 게재승인.