

단사회석의 용리조직과 지구조직 해석

이인성, 안중호

충북대학교 지구환경과학과(einsung@geop.chungbuk.ac.kr)

1. 서 론

변성암과 화성암에서 산출하는 회석의 용리작용은 주변암석의 온도와 압력의 변화 및 암석의 냉각속도에 관한 정보를 제공하므로 이에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 일반적으로 용리조직을 보이는 단사회석은 (100) 면 또는 (001) 면에 평행한 방향으로 발달한 용리판이 생성된다 (Poldervaart and Hess, 1951). 또한 세 방향의 용리판들을 포함한 단사회석이 변성암에서 처음으로 Jaffe and Jaffe (1973)에 의해 설명되었다. 용리조직에 관한 자세한 연구는 Robinson et al. (1971)에 의하여 단결정 X-선 회절을 이용하여 연구되었는데, 단사회석의 (100)방향에 평행한 용리판은 사방회석임이 밝혀졌다. 단사회석내에 나타나는 사방회석의 경계면은 항상 단사회석의 (100)면에 평행하게 나타나고, 단사회석의 (100)면에 근접한 용리판은 “100” 용리판이라 하고, (001)면에 근접한 용리판은 “001” 용리판이라 명명하였다 (Robinson et al., 1971). 이러한 두 용리판간의 각도는 회석의 화학성분에 따라 변화하는데, 회석의 Fe 성분이 증가할수록 “001”과 “100” 용리판 간의 각도는 감소한다 (Jaffe et al., 1975). 이러한 용리판간의 각도에 의거하여 회석의 화학성분을 정량적으로 알아낼 수 있다. 또한 용리판의 방향은 격자변수와 관계되며, 격자변수는 온도, 압력, 그리고 화학성분에 따라 변한다.

본 연구에서는 경기육괴 북부에 위치하는 화천 백립암 복합체에서 발견된 용리조직을 보이는 단사회석 (Yi, 1998)을 세부적으로 조사하였다. 백립암체가 냉각되면서 일어나는 광물작용인 회석의 용리현상은 암체의 변성진화과정을 해석할 수 있는 매우 중요한 단서가 될 수 있으며, 임진강대와 경기육괴의 경계를 이루는 화천 백립암 복합체의 지체 구조적 진화를 이해할 수 있는 중요한 자료를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 단사회석 내에 나타나는 용리조직을 전자현미분석기와 투과전자현미경을 이용하여 화학적 특징과 결정구조 및 생성환경을 밝히고자 한다.

2. 연구 및 실험방법

투과전자현미경시료로 사용하기 위하여 가열을 하면 용융되며 아세톤에 용해되는 물질인 크리스탈본드를 접합제로 사용하여 박편을 제작하였다. [001] 과 [010] 정대축에 수직으로 절단된 회석결정을 선택하여 전자현미분석기를 이용하여 화학분석과 후방산란영상을 관찰하였다. 기초과학지원센터의 CAMECA SX 51 전자현미분석기를 이용하였는데, 분석조건은 가속전압 15 KeV, 20 nA의 빔전류, 그리고 빔의

직경은 2 μm 이다.

투과 전자현미경 연구를 위한 ion-milled 시료를 만들기 위해 3 mm washer를 관찰하려는 휘석의 결정위에 붙였다. Washer를 붙인 시료를 가열하여 슬라이드로부터 분리시킨 후 ion-milling과 탄소 코팅을 하였다. 본 연구에서 사용된 투과전자현미경은 JEOL JEM-2010 모델로서 가속전압은 200 KeV 이며, tilting angle이 $\pm 20^\circ$ 이고, 구면수차계수(Cs)가 0.5 mm, lattice image 분해능이 0.14 nm, point image 분해능이 0.194 nm이다.

3. 연구결과

용리조직을 보여주는 휘석은 편광현미경하에서 한방향의 미세한 용리판과 또 다른 방향의 보다 두껍고 넓은 간격의 용리판을 보여준다. 또한 휘석이 약 90° 벽개각을 이루는 시료에는 미세한 용리판이 두 방향 벽개를 가로질러 발달되었다. 휘석의 [010] 정대축방향에서 후방산란전자영상을 관찰하면 단사휘석내에 보다 밝은 명암을 보여주는 두 방향의 용리판이 나타나는데, 미세하고 좁은 간격으로 나타나는 용리판이 “100” 용리판이고, 두껍고 넓은 간격으로 나타나는 용리판이 “001” 용리판에 해당한다. 휘석의 [010] 정대축에서 관찰되는 두 용리판들은 112° 의 일정한 교차각도를 유지한다. [001] 정대축에서는 휘석의 두 방향 벽개를 가로질러 “100” 용리판이 부분적으로 굵게 나타나는 것과 얇고 희미하게 나타나는 등 다양하게 나타난다. 또한 휘석과 용리판의 화학적 성분의 차이를 보이는데, X-선 영상을 관찰하면 두 용리판은 단사휘석보다 Ca 이 결핍되어 있으나 Fe 와 Mg 은 약간 높다.

휘석의 용리조직은 편광현미경과 후방산란전자 영상에서도 관찰이 가능하나, 오자이트와 용리판의 결정구조적 특징을 정확한 결정축 방향에서 자세히 알아보기 위하여 투과전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 휘석을 [001] 정대축에서 관찰하면 휘석의 벽개 {110}를 가로지르는 얇은 “100” 용리판만이 관찰된다. “100” 용리판의 두께는 약 0.1 μm 로 나타나고, 단사휘석과 비교하여 볼때 용리판은 밝은 명암을 보여주고 있다. 또한 “100” 용리판을 따라 어두운 명암을 보여주는 또 다른 광물들이 특징적으로 나타난다. 이 광물을 밝히기 위하여 전자회절 분석을 수행하였는데 티탄철석 또는 적철석의 전자회절 패턴과 일치한다 (Veblen and Bish, 1988). “100” 용리판이 부분적으로 점토광물로 교대되어 나타나는데, 풍화작용에 의하여 휘석이 변질작용을 받아서 생성된 것으로 해석된다. 휘석을 [010] 정대축에서 전자회절 패턴을 관찰하면 “100” 용리판은 사방휘석 “001” 용리판은 피전나이트의 특징을 보인다. [010] 정대축방향에서 투과전자현미경 영상을 관찰하면 약 0.1 μm 두께를 지니는 “100” 용리판이 0.25 μm 두께를 지니는 “001” 용리판을 관입하여 “100” 용리판이 생성된 조직을 보여준다. “001” 용리판을 구성하는 피전나이트 (P21/c)와 오자이트 사이에 $\Delta\beta = 2^\circ$ 차이가 나고, d(100)값은 단사휘석이 약 0.1 Å 정도 피전나이트에 비하여 크게 측정된다.

4. 결론 및 토의

화천 백립암복합체내에 산출하는 고철질백립암은 후퇴변성작용에 의하여 점진적으로 석류석 각섬암으로 변화하는데, 이 암석에서 발견되는 오자이트는 불균질 핵생성과정과 성장을 거쳐 단사휘석의 “001” 와 “100” 두 방향의 미세한 용리판이 생성되는 조직을 보여준다. 전자현미분석기를 이용한 후방산란전자영상의 관찰에 의하면, “001” 용리판은 2.5 μm 이하의 두께로 나타나며 “100” 용리판은 1.0 μm 이하의 두께로 나타난다. 그러나 두 용리판 모두 전자현미분석기 분해능이하의 매우 얇은 용리판으로 나타난다. 이에 반하여 투과전자현미경을 이용한 [010] 정대축 영상에서는 “001” 용리판과 “100” 용리판이 각각 0.25 μm , 0.1 μm 이하의 두께로 관찰된다. 따라서, “001” 용리판은 “100” 용리판보다 두껍게 나타나는 특징과, “100” 용리판이 “001” 용리판을 관입하여 성장하는 조직은 “001” 용리판이 용리작용시 초기에 먼저 생성되었음을 지시한다.

두 용리판 사이의 작은 오자이트와 “001” 피전나이트 용리판의 $\Delta\alpha$ 와 $\Delta\beta$ (+ 0.1 Å, 2°) 뿐만아니라 오자이트내에 XFe 의 영향 때문에 관찰한 시료의 112°의 일정한 교차각도를 유지하고 있다. 전자회절패턴에서 “100” 용리판을 구성하는 사방휘석과 오자이트의 d(010)값은 거의 차이를 보이지 않지만 사방휘석의 d(200)은 오자이트의 d(100)보다 작음이 확인되었다. 또한, “100” 용리판은 석영과 산화광물이 함께 나타나는 것이 발견되었다. 이는 단사휘석의 용리작용은 지금까지 알려진 단순한 단사휘석-사방휘석, 단사휘석-단사휘석 반응만으로 이루어지지 않은 보다 복잡한 광물작용이었을 가능성을 가리킨다.

본 연구에서 관찰한 단사휘석들이 용리조직은 이 휘석들을 포함하는 변성암체가 변성작용 시기에 용리작용을 일으키기에 충분한 이온 확산이 일어날 정도로 비교적 느린 속도로 냉각되었음을 지시한다. 또한 “100” 용리판은 투과전자현미경에 의하여 관찰된 0.1 μm 이하의 두께로 매우 미세히 나타나며, “001” 용리판이 한 방향성을 띠고 나타난다. 따라서 본연구에서 관찰되는 매우 미세한 두께의 “100” 용리판의 생성은 매우 빠른 속도로 암체가 냉각되었으며 이 지역이 변성작용 후기에 급격히 냉각되었을 가능성을 제시한다.

5. 참고문헌

- Jaffe, H.W., and Jaffe, E.B. (1973) Bedrock geology of the Monroe quadrangle, New York. N.Y. State Museum and Sci. Serv., Map and Chart Ser. No.20, Albany, N.Y.
- Jaffe, H.W., Robinson, P., Tracy, R.J., and Ross, M. (1975) Orientation of pigeonite exsolution lamellae in metamorphic augite: Correlation with composition and calculated optimal phase boundaries. *American Mineralogist*, 60, 9-28.
- Poldervaart, A. and Hess, H.H. (1951) Pyroxene in the crystallization of basaltic magma. *J.Geology*, 59, 472-489.

- Robinson, P., Jaffe, H. W., Malcolm, R., and Cornelis, K. Jr. (1971) Orientation of exsolution lamellae in clinopyroxenes and clinoamphiboles: consideration of optimal phase boundaries. *American Mineralogist*, 56, 909-939.
- Robinson, P., Jaffe, H. W., Malcolm, R., and Cornelis K. Jr. (1971) Erratum. *American Mineralogist*, 56, 1836.
- Robinson, P., Ross, M., Nord, G.L., Smyth, J., and Jaffe, H.W. (1977) Exsolution lamellae in augite and pigeonite : fossil indicators of lattice parameters at high temperature and pressure. *American Mineralogist*, 62, 857-873.
- Veblen, D.R. and Bish, D.L. (1988) TEM and X-ray study of orthopyroxene megacrysts Microstructures and crystal chemistry. *American Mineralogist*, 73, 677-691.
- Yi, K. (1998) Reaction textures and P-T paths in the Hwacheon granulite complex, South Korea. 87p. M. S. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.