

지리산 동부 지역에 분포하는 차노카이트의 변성작용과 성인에 관한 연구

김동연 · 송용선* · 박계현

부경대학교 환경 · 해양대학 환경지질학과, 부산광역시 남구 대연동 599-1

Petrogenesis and Metamorphism of Charnockite of Eastern Jirisan Area

Dong-Yeon Kim, Yong-Sun Song* and Kye-Hun Park

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University,
599-1 Daeyeondong, Namgu, Busan 608-737, Korea

요약: 소백산 육괴 중 남동부 지역의 선캠브리아 변성암류는 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암과 석영장석질 편마암 등으로 이루어져 있으며, 하동-산청 회장암 복합체 서편에 남북방향의 대상으로 사방휘석을 함유한 차노카이트가 폭 3 km, 길이 12 km의 규모로 분포한다. 차노카이트는 조직에 따라 괴상 차노카이트와 엽리상 차노카이트로 분류된다. 성분상 차노카이트의 원암은 화강섬록암에서 석영 몬조나이트에 대비되고, 비알카리질이며, 이들의 주원소 및 미량원소의 함량 변화양상은 전형적인 마그마 분화 경향을 보여준다. 한편, 조구조 판별도에 도시된 지구화학적 자료는 이들 차노카이트가 활동적인 조구조 환경에서 형성되었음을 보여준다. 괴상 및 엽리상 차노카이트에서 관찰되는 주구성 광물은 사장석, 사방휘석, 미사장석, 석류석, 석영 등이며, 석류석은 산점상으로 산출한다. 석류석은 대체로 성분 누대구조가 잘 나타나고, X_{alm} (0.74~0.83)와 X_{py} (0.07~0.12), X_{Mg} (0.12~0.08) 성분은 주변부로 가면서 감소하고, X_{grs} (0.03~0.15)는 중심부에서는 낮고 주변부로 가면서 크게 증가하는 특징적인 변화를 보인다. 사방휘석-석류석-사장석-석영 공생광물군을 이용하여 계산된 차노카이트의 변성조건은 시료에 따라 2.5~7.5 kb, 600~900°C의 큰 범위로 변화하지만, 석류석의 중심부 성분을 사용하였을 경우 약 800°C의 정점온도를 보인다. 그리고 석류석의 누대구조 특성이 뚜렷한 시료 MS 2-1에서는 3.5 kb, 800°C에서 6 kb, 600°C로 후퇴한 반시계 방향의 진화경로가 인지된다.

핵심어: 차노카이트, 백립암상, 회장암, 반시계 방향의 진화경로

Abstract: Precambrian metamorphic rocks of southwest Sobaeksan massif consist of mainly granitic gneiss, porphyroblastic gneiss and quartzofeldspathic gneiss. The orthopyroxene-bearing rocks(charnockites) are found in the west of Hadong-Sancheong anorthosite complex. The charnockites are 3km wide, 12km long and divided into massive and foliated types based on their texture. The compositions of charnockites are comparable to granodiorite to adamellite and subalkaline. Variations in major and trace elemental abundances show typical magmatic differentiation trends. The geochemical data plotted on tectonic discrimination diagrams reveal that these charnockites were formed in the active tectonic environment. The massive and foliated charnockites are mainly composed of plagioclase, orthopyroxene, microcline, quartz and disseminated garnet. Garnets generally show characteristic zonal textures with decreasing X_{alm} (0.74~0.83), X_{py} (0.07~0.12) and X_{Mg} (0.12~0.08) and increasing X_{grs} (0.03~0.15) from core to rim. Metamorphic temperature and pressure of the charnockites estimated from orthopyroxene-garnet-plagioclase-quartz assemblages show wide range of variation of 600~900°C and 2.5~7.5 kbar respectively. The results of P-T estimates indicate an anticlockwise P-T evolution path.

Key words: charnockite, granulite facies, anorthosite, anticlockwise P-T-t paths

*Corresponding author: Tel. 82-51-620-6236, E-mail. yssong@pknu.ac.kr

서론

차노카이트는 특징적으로 사방회석을 함유하는 화강암질 내지 화강섬록암질 암석으로써 회색 내지 녹색 계열의 암색을 띠며, K-장석과 휘석에 의한 독특한 지방광택을 보이는 암석이다. 이 암석은 통상 선캠브리아기 지각에 국한되어 산출하는 것으로 알려져 있으며, 종종 회장암 또는 라파키비 화강암과 연관되어 산출하는 공간적 분포 특성을 가진다(Cooray, 1969; Emslie, 1978; Wendlandt, 1981; Bohlen, 1987; Newton, 1992, Clifford *et al.*, 1995; Higgins and van Breemen, 1996). 차노카이트에 대한 연구 결과 화성기원의 차노카이트와 변성기원의 차노카이트가 함께 보고되고 있다. 화성기원의 증거로 제시될 수 있는 마그마에서 정출된 조석 등의 특성을 갖는 차노카이트가 짐바브웨(Zimbabwe) Limpopo Mobile belt의 북쪽 주변부와 노르웨이 남서쪽 Sveconorwegian belt, Bjerkreim-Sokondal layered intrusion 및 남극대륙 동쪽의 Prince Charles Mountain 등에서 보고되었다(Ridley, 1992; Zhou *et al.*, 1995; Duchesne and Wilmar, 1997; Zhao *et al.*, 1997). 한편 변성기원으로 해석되는 엽리가 발달하고, 석류석이나 흑연 등의 변성광물을 갖는 차노카이트가 인도 남부지역과 짐바브웨 Limpopo belt의 남쪽 주변부 지역 등에서 보고되었다(Cooray, 1969; Janardhan *et al.*, 1982; Bohlander *et al.*, 1992). 차노카이트가 마그마에 의해 만들어지거나 아니면 변성작용에 의해 만들어지는 경우 모두 고온의 생성환경이 요구되며, 차노카이트가 생성된 지역은 일반적으로 정점변성 온도-압력 조건이 약 700~800°C, 5~7 kbar의 백립암상에 이르는 고도의 광역변성작용이 수반되는 지역이다(Janardhan *et al.*, 1982; Clifford *et al.*, 1995; Higgins and van Breemen, 1996). 세계 다른 지역에서 보고된 이상의 연구를 종합해 볼 때, 차노카이트의 생성환경과 성인 및 변성작용에 대한 연구는 선캠브리아기 광역변성작용을 수반한 고변성대 지각의 형성과 진화과정을 이해하는데 중요한 역할을 한다.

최근에 김동연 외(1998)는 지리산 지역에 차노카이트가 분포함을 보고하였다. 차노카이트는 회장암과 더불어 선캠브리아기의 특정 시기에 산출되며 세계적으로도 산출되는 지역이 많지 않기 때문에 소백산 육괴 지리산 지역의 선캠브리아 지괴에 대한 구체적인 생성과 진화 과정뿐만 아니라 한반도 선캠브리아 지각의 발달사를 세계의 다른 지역과 비교하여 연구하는데도 매우 중요한 의미를 갖는다. 김동연 외(1998)와 박계현 외(2001)는 이 차노카이트가 약 18억년 전에 고도의 변

성작용을 겪었으며 차노카이트와 접하여 산출하는 하동-산청 회장암체의 관입이 차노카이트 형성에 기여하였을 가능성을 제시한 바 있다. 그러나, 지리산 지역 차노카이트의 궁극적인 기원에 대한 문제는 아직 본격적으로 연구되지 않았으며 인접한 회장암과의 관계도 잘 알려져 있지 않다.

이 연구에서는 지리산 지역에서 산출하는 차노카이트의 성인을 규명하기 위해서 차노카이트의 산상과 암석학적 특성, 주성분 원소와 희토류원소 등의 지구화학적 특징과 변성작용에 대해 중점적으로 연구한 결과를 보고하며 이를 통해 지리산 지역 소백산 육괴의 변성진화과정을 밝히고자 하였다.

지질개요

소백산 육괴 남서부에 놓인 지리산 일대는 오래전부터 지질도폭조사(김옥준 외 1964a; 김옥준 외, 1964b; 김남장과 강필중, 1965; 남기양 외, 1989)와 이상만(1980) 등의 연구를 통해 변성작용의 특성이 비교적 잘 알려져 있는 지역으로 엠피블라이트 내지 상부-엠피블라이트 변성상의 고변성을 받은 것으로 알려져 왔다(이상만, 1980). 이 지역의 암석은 서쪽의 지리산 편마암 복합체와 이를 관입하고 있는 동쪽의 하동-산청 회장암 복합체로 나눌 수 있다. 지리산 편마암 복합체는 선캠브리아기 변성암류로 구성되며 변성이질암과 반상변정질 편마암, 화강암질 편마암, 석영장석질 편마암, 우백질 화강 편마암이 이에 속한다. 김동연 외(1998)는 지리산 편마암 복합체 분포지역인 기발간 지질도폭(김옥준 외, 1964a; 김남장과 강필중, 1965)에서 하동-산청 회장암 복합체의 서쪽에 분포하는 흑운모 편마암, 메타텍틱 편마암, 그리고 안구상 편마암으로 분류되었던 암체가 차노카이트 내지 차노카이트질 암석으로 확인하여 보고하였다. 연구 지역의 북서쪽과 북동쪽에는 중생대의 심성암체들이 관입하고 있으며(Kim and Turek, 1996), 하동-산청 회장암 복합체의 동쪽은 백악기 퇴적암으로 피복되어 있다(Fig. 1).

지리산 편마암 복합체 중 화강암질 편마암은 차노카이트와 인접하여 산출하고, 화강암질 편마암내에는 남북 방향의 좁은 대상으로 이질 편마암과 반상변정질 편마암이 협재되어 있다. 화강암질 편마암 서쪽에 분포하는 반상변정질 편마암은 자형 내지 반자형의 미사장석이 반상변정을 이루고, 반상변정은 10 cm 내외의 크기이며, 변형되어 신장되었거나 국부적으로는 안구상 구조를 이루기도 한다. 반상변정질 편마암 내에 석영장석질 편마암이 고리 형태로 분포하고 있으며, 우

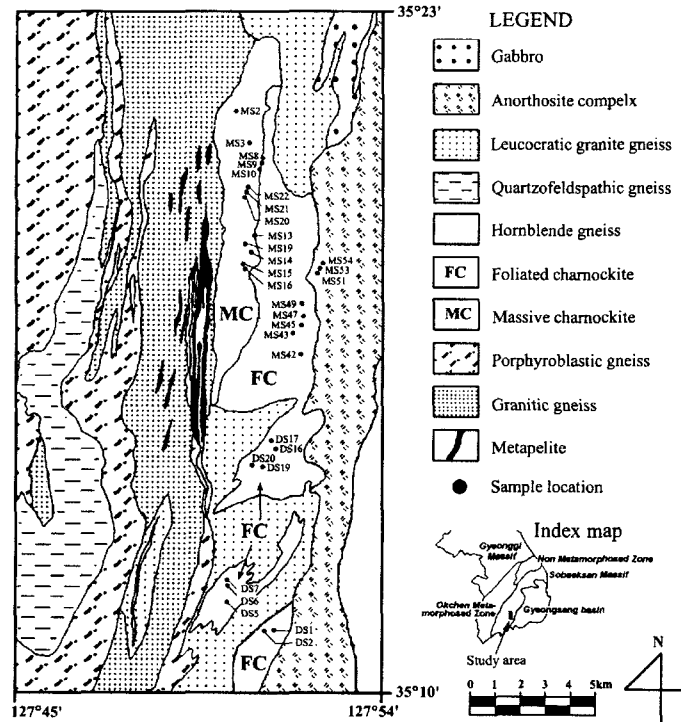


Fig. 1. Geological map of the southwest Sobaeksan massif showing the distribution of newly described massive and foliated charnockites and Hadong-Sancheong anorthosite complex. Sampling locations are shown by solid circles.

흑질 백립암이 포획암의 형태로 산출되기도 한다.

연구 지역의 동편에 분포하고 있는 하동-산청 회장암 복합체는 북부 산청 지역의 괴상형과 남부 하동 지역의 대상형으로 구분되며, 남부 하동 지역의 대상형은 유색광물의 함량과 구조적 특징에 따라 괴상형, 층상형, 간극누적형, 그리고 엽상형으로 분류된다(정지곤, 1987; 이종만, 1999).

지리산 지역에서 확인된 변성조건은 상부-엠펜블라이트상 내지 백립암상 변성작용으로 편마암류들에서 추정된 변성 온도-압력 조건은 정점에서 600~750°C, 3~6 kb, 후퇴시 500~650°C, 2~5 kb이다. 반상변정질 편마암 내의 우흑질 백립암에서 추정된 변성 온도-압력 조건은 정점에서 800~850°C, 6 kb이고 후퇴시는 500°C, 4 kb로서 시계방향의 후퇴경로를 지시한다(송용선, 1997; 송용선, 1999).

암석기재

지리산 지역에 분포하는 차노카이트는 기발간 도폭(김옥준 외, 1964a; 김남장과 강필중, 1965)에서는 흑운

모 편마암, 메타텍틱 편마암, 그리고 안구상 편마암으로 분류되었던 암석이다. 야외조사와 실내관찰 결과 이 지역의 암석들이 전형적인 차노카이트에 해당하는 사방휘석과 K-장석이 공생하는 입상 변정질의 화강암질 내지 화강섬록암질의 암석으로 밝혀졌으며, 구성광물의 모드분석 결과는 석영-알칼리 장석-사장석 삼각도(QAP)에서 차노카이트 영역에 도시된다(Fig. 2). 지리산 지역의 차노카이트는 약 폭 3 km, 길이 12 km 정도의 규모이며, 조직에 따라 괴상 차노카이트와 엽리상 차노카이트로 구분된다. 그러나, 두 암체의 광물조성이나 광물군에 있어서 뚜렷한 차이를 보이지 않는다.

괴상 차노카이트는 화강암질 편마암과 인접하여 분포한다. 녹색 계열의 암색을 띠며 조립질이고 K-장석과 사방휘석에 의해 전형적인 차노카이트의 특적인 지방광택을 보인다(Fig. 3(a), (b)). 주구성 광물은 사장석, 사방휘석, 미사장석, 석류석, 석영 등이며, 부성분 광물로는 티탄철석과 자철석, 저어콘 등이다(Fig. 4(a),(b)). 괴상 차노카이트내 사방휘석은 처음에는 사방각섬석으로 그리고 다시 각섬석으로 후퇴변성되는 반응주변부(reaction rim)를 보여주며, 0.44~3.12% 정도의 모드 함

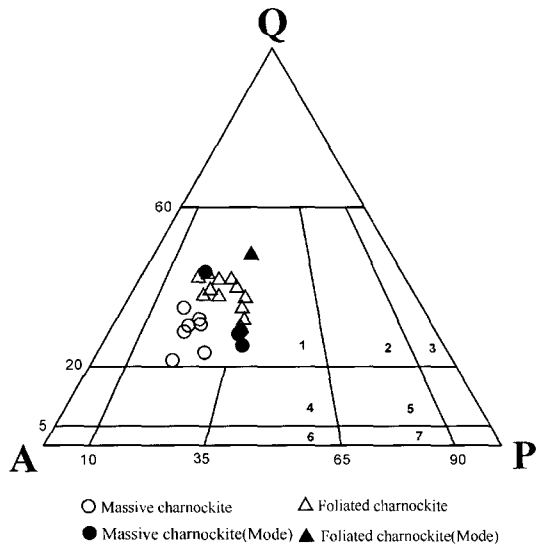


Fig. 2. QAP diagram (Streckeisen, 1974) for massive and foliated charnockites in the study area. Circles is massive charnockite, triangle is foliated charnockite. Open circle and triangle are value of CIPW norm and filled circle and triangle are value of mode analysis. 1: Charnockite, 2: Charnoenderbite, 3: Enderbite, 4: Quartz mangerite, 5: Quartz jotunite, 6: Mangerite, 7: Jotunite.

량 변화를 보인다. K-장석은 보통 1~3 cm 정도의 반상 변정을 이루고, 29.72~36.28%의 모드 함량을 보인다. 석류석은 산점상으로 산출하고, 재결정의 성장조직을 보인다.

엽리상 차노카이트는 회장암체와 인접하여 산출하며 수mm 폭으로 우측부와 우백부가 정연하게 교호하는 층상의 편마구조를 보여준다(Fig. 3(c), (d)). 엽리면은 주로 북동방향(N10°E~N30°E)의 주향을 가지며, 인접한 하동 회장암체에 발달된 엽리와 유사한 방향을 보인다. 엽리상 차노카이트의 주구성 광물은 사장석, 사방휘석, 미사장석, 석류석, 석영, 각섬석 등이며, 석류석은 석영, 사장석, 미사장석 등의 무색광물로 구성된 우백부에서 주로 산출되고 재결정의 성장조직을 보여준다(Fig. 4(c),(d)). 사방휘석은 12.68%의 모드 함량을 가지며 사방각섬석으로 후퇴변성되는 뚜렷한 반응주변부가 발달한다. 국부적으로 단층이나 전단변형으로 파쇄된 조직이 관찰되고, 변형작용에 수반되어 휘석이 녹색의 각섬석으로 후퇴변성 내지 변질된 양상을 보이기도 한다.

전암화학

괴상 및 엽리상 차노카이트에 대해 한국기초과학지

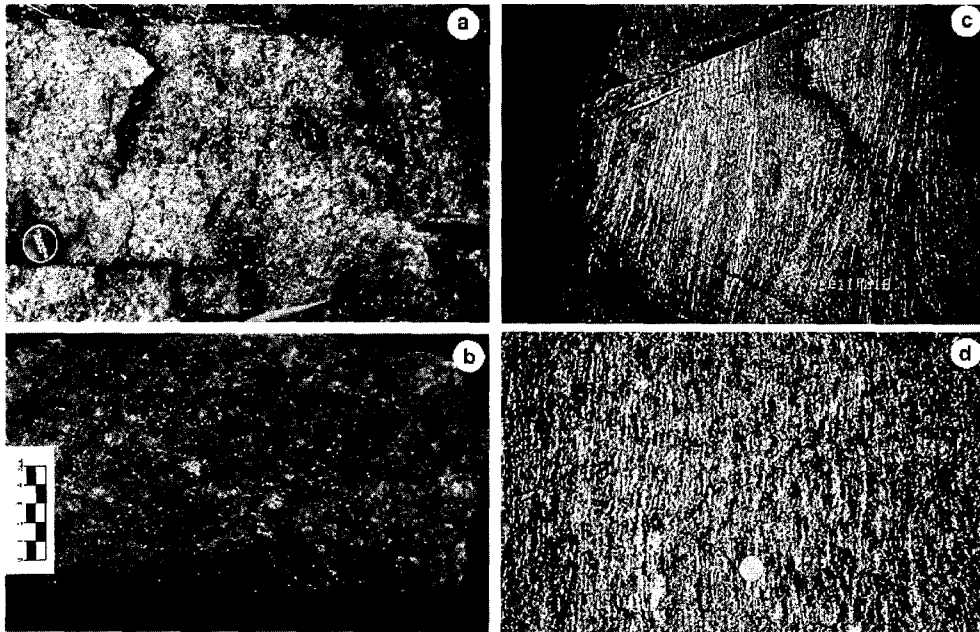


Fig. 3. Outcrop photographs of charnockites containing orthopyroxene, K-feldspar and quartz. (a) the massive charnockite shows dark color and greasy luster and contain K-feldspar phenocryst. (b) the foliated charnockite showing foliated texture.

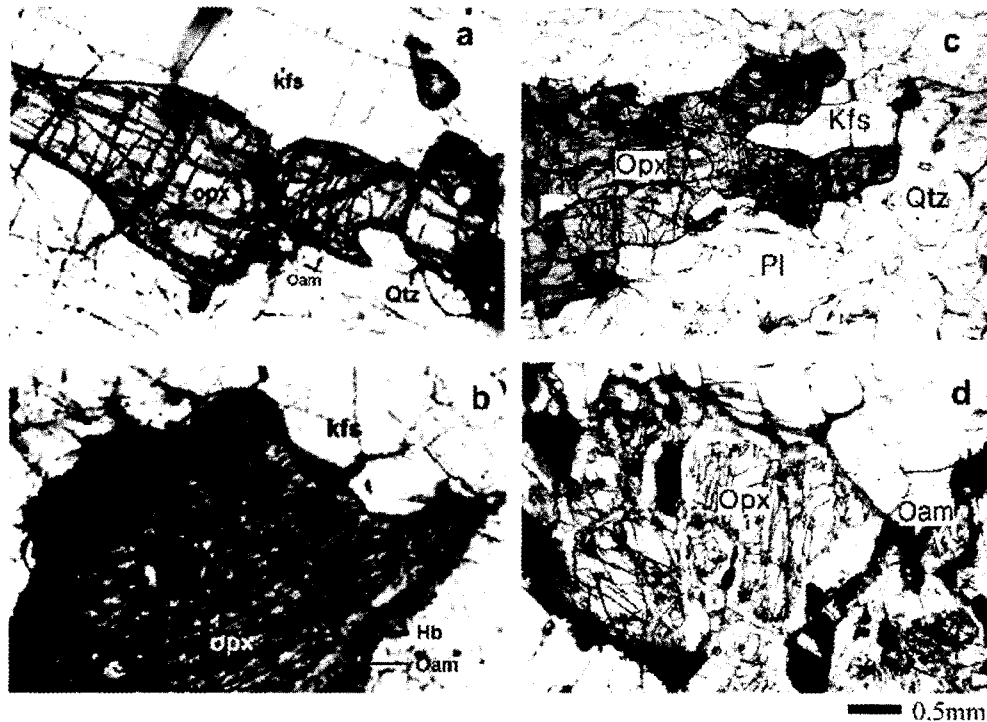


Fig. 4. Photomicrographs of charnockites. (a) Opx coexisting with Kfs and Pl. (b) Reaction rim of Opx(-Oam-Hb). (c),(d) Overgrown Grt coexisting with Pl and Qtz. Abbreviations; Opx-Orthopyroxene, Pl-Plagioclase, Kfs-K-feldspar, Grt-Garnet, Qtz-Quartz, Oam-Orthoamphibole, Hb-Hornblende.

원연구원의 기기를 이용하여 전압분석을 실시하였다. 주원소는 용융시켜 만든 유리원판을 XRF 분광분석기(Phillips PW1480)로 분석하였고, 희토류원소는 불산-질산-과염소산의 혼합산에 의해 용해 및 희석 후 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, VG-Elemental PQ3STE)로 분석하였다. 분석 결과는 Table 1에 나타내었으며, 과상 및 엽리상 차노카이트간의 성분차이는 보이지 않는다.

과상 및 엽리상 차노카이트는 SiO_2 함량이 60~70%로 대체로 중-산성암에 해당되고, 비알칼리질이며 AFM 삼각도에서 슬레아이트의 분화경로를 따른다(Fig. 5(a),(b)). 알루미늄 포화도를 나타내는 도표에서 차노카이트는 대체로 메타알루미나질이지만 일부는 과알루미나질에 속한다(Fig. 5(c)). SiO_2 를 분화지수로 사용한 하커도표(Harker diagram)는 휘석, 티탄철석, 인회석 등의 분화에 의해 성분이 변화되는 전형적인 마그마 분화의 경향을 보여준다(Fig. 6). 차노카이트와 같이 넓은 의미의 화강암질 성분을 가진 변성암류의 기원암종을 추정할 때 널리 사용되고 있는 O'Conner(1965)의 노름 An-Ab-Or 삼각도에 차노카이트의 분석치로부터

계산된 노름치를 도시해 보면 화강섬록암에서 아다멜라이트(석영 몬조나이트)에 해당된다(Fig. 7). 콘드라이트 성분대에 대해 표준화된 희토류원소 패턴에서 과상 및 엽리상 차노카이트는 전반적으로 LREE가 부화되고 HREE가 결핍되어 나타나며((La/Yb)_n = 10~20), 약간 음의 Eu 이상치를 갖는다(Fig. 8(a)). 대륙지각 성분에 대해 표준화한 거미그림(spider diagram)은 대부분의 불호정성 성분들이 부화되고 Zr, Hf, Cr, Ni 등은 결핍되어 나타난다. 과상 및 엽리상 차노카이트가 관입하여 고결된 조구조 환경을 주성분 원소를 사용한 도표에서 보면, 대체로 대륙충돌대나 섭입대와 같은 활동적인 환경에서 생성된 화강암류임을 보여준다. 이를 AFM 삼각도의 결과와 결부시켜 생각하면 당시 차노카이트를 생성시킨 화성활동은 활동적인 대륙주변부에서 일어난 슬레아이트질의 화성활동이었음을 추정할 수 있다(Fig. 9(a),(b)).

한편, 화강암질 편마암과 석영장석질 편마암 및 반상변정질 편마암은 차노카이트와 다른 암석화학적 특성을 보인다. 희토류원소 패턴에서 차노카이트는 약간 음의 Eu 이상치를 보이고, LREE가 부화되고 HREE가

Table 1. Major element (wt%), trace element and REE (ppm) compositions of massive and foliated charnockites from Jirisan area.

Sample	Massive charnockite							Foliated charnockite	
	MS-2	MS-2-1	16	17	18	19	J-19	BH3 10.1	BH3 15.3
SiO ₂	55.70	68.02	63.36	62.50	62.32	62.60	60.16	67.45	61.91
Al ₂ O ₃	14.83	12.89	13.26	13.27	13.32	12.98	15.64	13.55	14.88
Fe ₂ O ₃	16.22	6.97	9.77	10.12	10.56	10.70	10.32	7.74	9.50
TiO ₂	1.21	0.97	1.33	1.45	1.47	1.61	1.42	0.79	1.34
MnO	0.13	0.08	0.11	0.11	0.12	0.15	0.11	0.07	0.10
CaO	2.63	2.94	3.97	4.35	4.52	4.18	4.14	2.80	5.07
MgO	2.38	1.02	1.45	1.46	1.62	1.64	1.39	0.71	1.50
K ₂ O	4.83	4.70	4.34	4.03	3.39	3.58	4.22	3.46	1.97
Na ₂ O	2.05	2.13	2.15	2.44	2.43	2.27	2.33	2.35	2.58
P ₂ O ₅	0.01	0.27	0.26	0.28	0.25	0.30	0.26	0.25	0.23
LOI	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.21
Total	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	99.36	99.29
Sc	27.10	14.30	19.22	19.33	21.13	18.78	21.90	12.40	24.90
Cr	59.00	14.80	26.40	27.04	33.10	27.08	20.10	11.00	29.50
Co	103.00	35.93	30.36	48.04	39.49	31.32	98.10	69.80	80.30
Ni	103.00	8.27	13.36	14.28	22.30	14.55	27.00	13.20	32.50
Cu	129.00	21.57	33.80	31.21	35.94	34.92	36.90	12.40	38.50
Zn	205.00	76.86	116.07	114.81	115.38	115.18	126.00	104.00	116.00
Rb	188.00	151.90	111.20	101.55	86.88	100.40	147.00	149.00	84.90
Sr	126.00	136.67	182.05	182.82	209.36	189.39	196.00	180.00	225.00
Y	58.50	84.38	36.75	31.08	36.43	42.36	34.60	31.20	30.00
Zr	63.90	9.83	9.02	9.33	10.12	8.43	22.30	29.90	21.10
Nb	19.70	21.34	19.62	19.17	20.92	22.99	23.90	10.70	21.20
Cs	1.86	2.04	1.16	0.66	1.97	3.37	0.64	0.48	0.55
Ba	820.00	760.45	951.07	836.81	970.06	1040.51	987.00	1038.00	1146.00
La	32.70	82.95	45.13	37.74	51.29	48.14	27.00	44.50	28.50
Ce	53.30	160.68	80.56	64.22	85.05	86.76	52.20	83.90	53.80
Pr	5.55	20.56	11.05	7.41	10.07	11.24	6.30	10.20	6.58
Nd	18.00	74.44	42.43	28.78	36.20	41.27	25.30	37.50	24.90
Eu	1.59	1.66	2.01	1.96	2.27	2.34	2.18	2.14	2.35
Sm	3.40	13.42	7.99	6.60	7.40	8.57	5.64	7.30	5.02
Gd	4.52	12.45	7.57	6.93	7.43	8.13	5.92	6.65	4.97
Tb	0.89	2.19	1.25	1.04	1.13	1.37	0.89	0.94	0.80
Dy	6.81	13.89	7.27	6.01	6.83	7.79	5.25	5.26	4.73
Ho	1.67	3.02	1.36	1.18	1.23	1.48	1.01	0.90	0.94
Er	5.91	9.80	4.11	3.66	3.85	4.25	3.08	2.56	2.73
Tm	0.93	1.45	0.59	0.50	0.52	0.61	0.47	0.33	0.42
Yb	6.07	8.93	3.94	3.40	3.57	3.85	3.34	2.10	2.73
Lu	0.84	1.25	0.57	0.55	0.57	0.61	0.52	0.32	0.42
Ta	1.18	3.13	2.38	2.41	2.23	5.47	1.56	0.58	1.35
Pb	27.50	27.78	19.20	16.60	17.53	15.98	19.40	23.40	15.80
Th	7.50	18.99	0.97	0.75	0.92	0.95	0.78	3.86	1.02
U	0.47	0.95	0.22	0.19	0.18	0.18	0.16	0.18	0.16

Table 1. Continued.

Sample	Foliated charnockite									
	BH3 30.8	CORE	MS 13'	MS 19	MS 23	MS 48	MS 49	MS 49-1	MS 51	MS 51-1
SiO ₂	58.24	62.58	63.33	70.66	68.54	67.19	69.36	68.33	65.51	65.56
Al ₂ O ₃	14.06	14.02	13.58	13.32	13.57	13.18	12.92	14.18	13.26	13.26
Fe ₂ O ₃	12.83	9.75	10.53	5.64	7.04	8.50	6.80	6.65	8.88	9.46
TiO ₂	1.63	1.53	1.31	0.65	0.79	0.92	0.77	0.66	0.89	0.98
MnO	0.15	0.11	0.10	0.05	0.06	0.08	0.07	0.07	0.09	0.09
CaO	5.27	4.40	4.27	2.27	3.07	2.92	2.52	3.56	3.37	3.85
MgO	2.17	1.69	1.51	0.62	0.58	0.68	0.54	0.48	0.61	0.66
K ₂ O	1.86	2.96	2.37	4.57	3.32	4.04	3.85	2.15	4.01	3.01
Na ₂ O	2.49	1.78	2.00	1.56	1.91	1.69	1.71	2.46	1.57	1.74
P ₂ O ₅	0.34	0.26	0.29	0.21	0.27	0.28	0.23	0.22	0.27	0.28
LOI	0.35	0.27	0.35	0.45	0.24	0.31	0.82	0.51	0.55	0.51
Total	99.39	99.35	99.64	100.00	99.39	99.79	99.59	99.27	99.01	99.40
Sc	25.50	18.23	14.58	7.86	9.52	12.62	8.51	9.19	12.93	14.61
Cr	21.50	38.24	32.31	11.08	9.33	10.15	10.11	8.04	8.59	9.98
Co	92.00	52.53	66.83	58.26	56.41	41.66	43.52	55.06	39.41	51.73
Ni	33.30	13.79	13.94	4.95	4.13	4.03	3.78	3.37	2.37	4.10
Cu	43.70	17.42	13.22	0.92	6.92	3.11	1.96	1.59	12.34	5.54
Zn	137.00	119.94	151.64	101.34	119.46	118.98	124.69	148.29	123.49	131.56
Rb	68.00	72.97	52.89	145.45	105.85	112.84	134.33	70.64	112.87	85.03
Sr	215.00	204.90	182.99	144.53	161.57	157.40	144.61	162.93	179.06	177.38
Y	39.70	26.65	34.41	28.09	28.22	27.44	34.37	21.34	27.56	30.22
Zr	29.40	9.14	11.95	17.47	60.48	7.71	14.32	26.57	14.76	9.10
Nb	23.50	10.15	10.08	2.49	11.94	5.02	3.61	5.76	11.67	3.96
Cs	0.32	1.25	0.36	0.34	0.83	0.65	0.90	0.45	0.58	0.48
Ba	922.00	1298.37	923.60	972.20	803.59	1037.90	817.36	438.84	1051.76	870.91
La	32.40	29.92	46.95	47.15	59.22	36.53	36.30	34.55	33.20	36.50
Ce	65.00	59.59	91.58	94.54	122.90	72.38	74.34	73.22	67.84	73.52
Pr	8.30	7.15	10.66	10.81	14.27	8.65	8.98	9.01	8.16	8.72
Nd	32.60	29.06	43.12	42.70	55.67	35.92	38.00	37.98	33.80	35.45
Eu	2.30	2.17	2.38	1.62	1.85	1.86	1.55	1.56	2.13	2.09
Sm	6.90	6.14	8.29	8.01	10.33	7.50	8.39	8.08	6.95	6.92
Gd	6.98	6.16	8.56	7.30	9.16	7.52	8.66	7.64	6.86	7.33
Tb	1.08	0.88	1.12	0.96	1.20	1.01	1.24	0.91	0.95	1.02
Dy	6.56	5.28	6.86	5.77	6.29	5.84	7.05	4.65	5.49	5.82
Ho	1.19	1.03	1.36	1.07	1.10	1.05	1.25	0.79	1.01	1.13
Er	3.43	3.10	3.93	3.07	2.95	2.87	3.80	2.19	2.96	3.23
Tm	0.51	0.44	0.60	0.43	0.40	0.40	0.50	0.28	0.40	0.43
Yb	3.33	3.02	4.06	2.63	2.19	2.47	3.28	1.80	2.54	2.79
Lu	0.52	0.44	0.68	0.39	0.36	0.40	0.48	0.27	0.38	0.44
Ta	1.51	0.86	1.08	0.21	1.53	0.44	0.40	0.91	1.02	0.32
Pb	13.80	14.47	17.17	27.10	24.16	25.88	21.63	17.63	17.51	15.65
Th	0.92	1.25	2.10	1.22	7.62	0.81	0.51	0.68	1.49	1.46
U	0.17	0.19	0.23	0.34	0.87	0.30	0.16	0.32	0.46	0.60

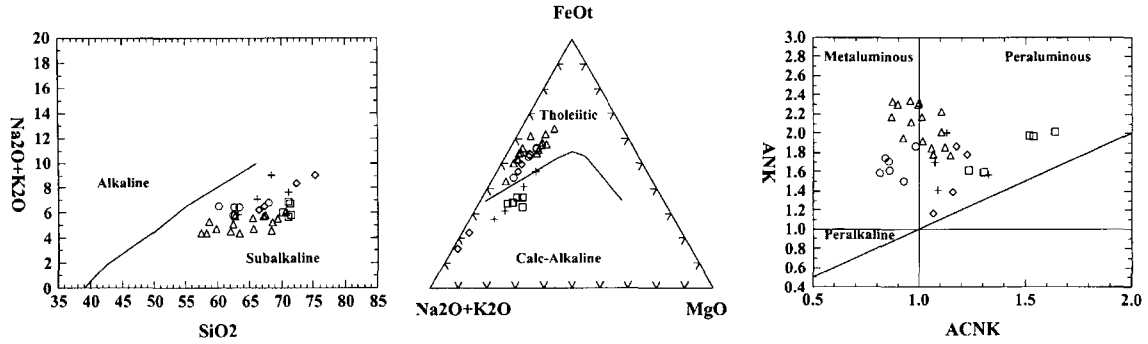


Fig. 5. Rock classification diagrams for massive and foliated charnockites. (a) SiO₂-Alk(Na₂O+K₂O) diagram(Irvine and Baragar, 1971). (b) Alk(Na₂O+K₂O)-MgO-FeOt diagram(Irvine and Baragar, 1971). (c) A/CNK-A/NK diagram(Maniar and Piccoli, 1989). These are molar values of A=Al₂O₃, C=CaO, N=Na₂O, K=K₂O. (○: massive charnockite, △:foliated charnockite, ◇: Quartzofeldspathic gneiss, □: granitic gneiss, +: porphyroblastic gneiss).

결핍되며 좁은 변화범위를 갖는 특성을 보인다. 그러나, 석영장석질 편마암은 큰 음의 Eu 이상치를 보이며, 차노카이트 보다 약간 낮은 LREE값을 가진다. 화강암질 편마암은 차노카이트와 같이 LREE가 부화하고 HREE가 결핍되어 나타나지만, 차노카이트에 비해 상당량의 HREE가 결핍되고 넓은 변화범위를 보인다. 또한, 차노카이트는 특징적인 솔레아이트 변화경향을 보이지만, 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암은 칼크-알칼리 변화경향을 보인다. 이처럼 암석화학적 특성에 있어서 화강암질 편마암과 석영장석질 편마암, 반상변정질 편마암과는 다른 특징을 보이는 점에서 차노카이트는 독립적인 암체로 보는 것이 타당하며, 따라서 지리산 지역의 차노카이트는 다른 암체들의 단순한 변성작용에 의해 생성된 것이 아니라 원래 비교적 균질한 화성기원의 독립적인 암체인 것으로 판단된다.

광물화학조성

차노카이트의 기원을 밝히기 위한 연구의 일환으로 괴상 차노카이트와 엽리상 차노카이트에 대한 박편관

찰을 통해 광물조합과 조성 및 조직적 특성을 관찰하였다. 구성광물의 화학분석은 대표적인 시료의 연마박편을 선정하여 한국기초과학지원연구원의 전자현미분석기(Cameca, SX 51)를 사용하여 분석하였다. 분석은 가속전압 10 kv, 빔 전류 20 nA, 빔 크기 2 μm의 조건으로 실시하였고, 측정시간은 정점(peak)에서 10초였다. 표준물질로는 알바이트(Na, Si), 페리크레이스(Mg), 강옥(Al), 인회석(P), 정장석(K), 규회석(Ca), MnTiO₃(Ti, Mn) 그리고 Cr₂O₃(Cr)와 같은 천연광물과 합성물질을 사용하였다.

회석은 괴상 차노카이트 및 엽리상 차노카이트 모두에 많이 나타난다. 회석의 분석자료는 Table 3에 나타내었고 산소 6개로 표준화하였다. 연구 지역에서 나타나는 회석은 칼슘성분이 거의 없는 Fe-Mg 고용체의 사방휘석(hypersthene)으로 X_{Mg}은 0.24~0.32 범위의 성분변화를 보이며, 괴상 차노카이트내 사방휘석이 엽리상 차노카이트내 사방휘석 보다 약간 높은 X_{Mg}값을 보인다. 회석은 주로 사장석, 흑운모, 석류석과 공생하며 주변부를 따라 대체로 사방각섬석화 되어있다. 이는 원래의 차노카이트 생성 이후 변성작용에 의해 새로운

Table 2. Modes (%) of the Massive and Foliated charnockites from the Jirisan area.

Sample	Rock Type	Qtz	Kfs	Pl	Grt	Opx	Amph	Bt	Others
MS-2	MC	22.55	33.41	22.60	8.57	3.12	6.97	1.36	1.41
MS-2(1)	"	20.75	36.28	25.45	10.74	2.35	1.87	1.84	0.72
19	"	19.90	30.73	20.21	tr	0.44	27.83	tr	0.88
16	"	30.44	29.72	9.40	tr	1.45	28.67	tr	0.32
MS-13	FC	42.13	26.41	18.31	tr	12.68	0.24	tr	0.22

MC: Massive charnockite, FC: Foliated charnockite, Qtz: quartz, Kfs: K-feldspar, Pl: Plagioclase, Opx: Orthopyroxene, Bt: Biotite, Amph: Amphibole, Grt: Garnet.

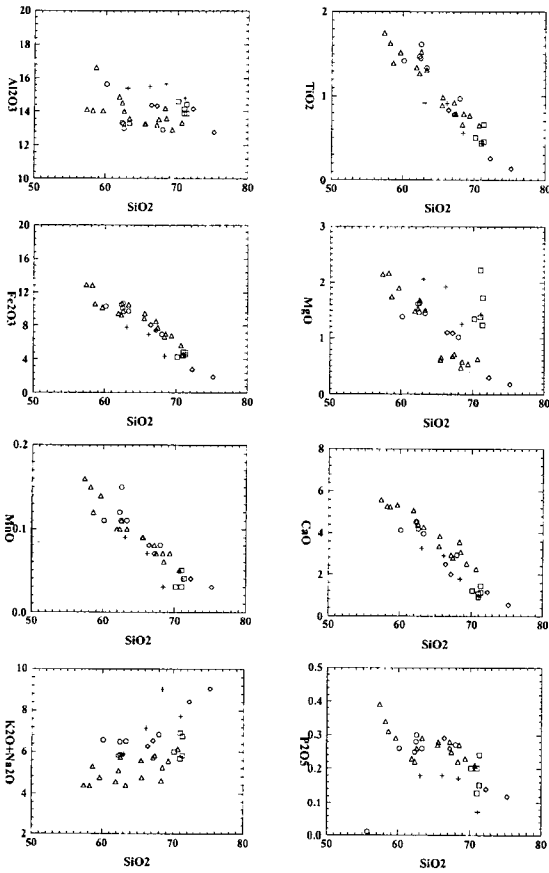


Fig. 6. The Harker diagrams for massive and foliated charnockites in the study area. Symbols are the same as Fig. 5.

광물조합이 만들어졌음을 나타낸다.

각섬석(Table 3, 산소 32개로 표준화)은 칼슘 및 칼륨 성분이 거의 없으며, 사방휘석보다 철성분이 상당히 낮다. 연구 지역에서 산출되는 각섬석류는 주로 사방휘석의 반응주변부를 이루는데, 이들 각섬석류는 사방각섬석으로써 엔소필라이트이다.

장석은 K-장석과 사장석으로 구성되며, 산소 32개로 표준화하였으며, 분석치는 Table 4와 같다. K-장석은 보통 반정으로 많이 산출하고, 정장석 단성분의 양은 약 84~94 mol%로 동일 시료내에서 11% 정도의 변화를 보여주지만, 중심부에서 주변부로 뚜렷한 성분변화는 보이지 않는다. 사장석은 An_{41-43} 의 안데신이며, 결정내에서의 조성 변화는 거의 보이지 않는다.

흑운모의 분석치는 Table 5에 나타내었고, 산소 22개로 표준화하였다. 분석위치에 따라 약간의 성분변화를 보이지만, 대체로 $Fe/Mg+Fe$ 값은 0.60~0.76이고,

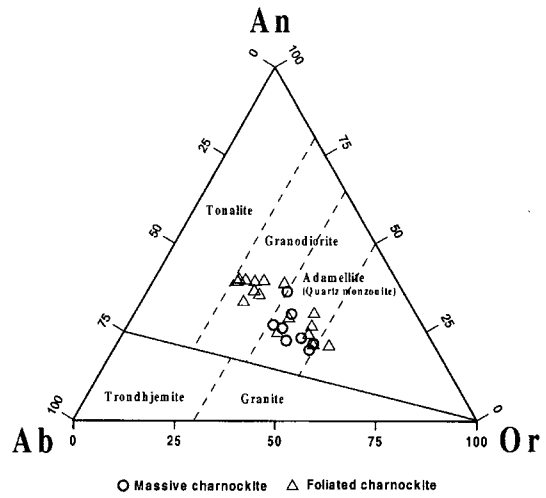


Fig. 7. Normative Anorthite(An)-Albite(Ab)-Orthoclase(Or) diagram (O'Connor, 1965) for massive and foliated charnockites in the study area. Symbols are the same as Fig. 5.

$Al(IV)$ 값은 2.42~2.56이다. MS 2-1에서 석류석과 접하고 있는 흑운모의 Ti함량은 석류석과 접촉하지 않는 흑운모보다 약간 낮은 값을 보인다. 동일 시료 내에서 Ti양이 크게 변화하는 것은 흑운모가 여러 시기에 걸쳐서 생성 또는 재결정되었음을 시사하므로 원래의 차노카이트가 만들어진 이래 흑운모의 재결정을 가져올 수 있는 변성작용을 겪었음을 시사한다.

석류석의 분석결과는 Table 6에 나타내었고, 산소 24로 표준화하였다. 괴상 차노카이트 및 엽리상 차노카이트의 석류석은 뚜렷한 누대구조를 보이는 것과 약간의 누대구조를 보이는 것으로 구분할 수는 있지만, 산상이나 광물공생관계는 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 분석된 석류석은 사방휘석이나 사장석, K-장석 및 흑운모 등과 접촉하여 산출하는 것으로 X_{alm} 이 0.74~0.83이고, X_{py} 는 0.07~0.12로 파이로프 성분은 높지 않다. X_{grs} 는 0.03~0.15로 중심부에서는 낮고 주변부로 가면서 크게 증가하는 특징적인 변화를 보인다. X_{alm} 과 X_{py} 는 모두 주변부로 가면서 감소하는데, X_{Mg} 도 0.12~0.08로 역시 감소한다. 시료 MS 2-1은 다른 시료에 비해서 뚜렷한 누대구조를 보이고, 중심부에서 주변부로 갈수록 Ca 성분이 단계적으로 크게 증가하는 경향을 보이지만(Fig. 10(a)), 시료 MS 2와 MS 23은 중심부에서 주변부로 갈수록 약간의 Ca 성분의 증가를 보인다(Fig. 10(b), (c)). 그리고 시료 MS 2와 MS 23의 Ca 성분(X_{Ca})은 약 0.1 정도에서 변화를 보인다. 이러한 결과들은 석류석이 적어도 2차례에 걸친 변성작용의 결과로 생성되었음을 나

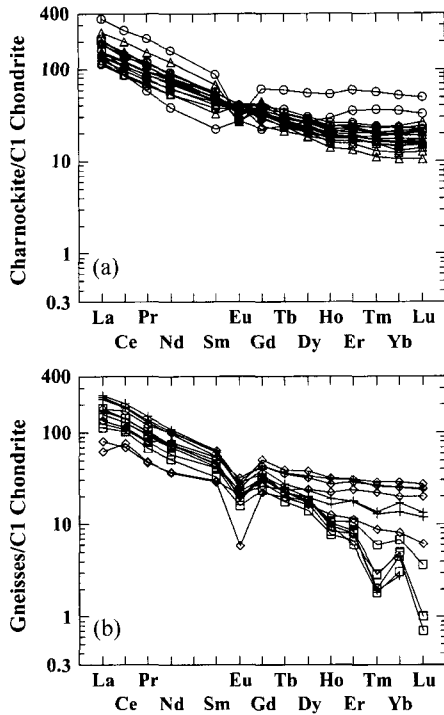


Fig. 8. Chondrite-normalized REE patterns of (a) massive and foliated charnockites with positive, no and negative Eu anomalies and (b) gneisses. Symbols are the same as Fig. 5.

타낸다. 즉, 시료 MS 2-1의 석류석은 초기부터 계속적으로 성장하였으며, MS 2와 MS 23의 석류석은 2차 변성작용시에 결정 및 재결정화된 결과로 해석된다. 석류석의 화학조성을 Ca-Mg-Fe 삼각도에 도시하면, 그로슬라 조성이 중심부에서 주변부로 감에 따라 현저하게 증가되는 것을 볼 수 있다(Fig. 11).

변성조건 및 변성경로

구성광물들에 대한 논의에서 살펴본 것처럼 지리산 지역에 분포하는 차노카이트는 광역 변성작용을 겪었으며 원래와는 다른 새로운 광물조합을 갖게 되었다. 사방회석-석류석-K-장석-사장석-흑운모-석영의 광물조합은 전형적인 백립암 변성광물군을 나타내며 이로부터 변성조건을 구하였다. 변성조건 일반적인 지질온도-압력계를 사용하였고, 계산에 사용된 공생광물군의 평형여부를 확인하고, 변성조건과 계산된 변성조건의 오차정도를 측정하기 위해 THERMOCALC(Powell et al., 1998) 프로그램(ver. 2.7)을 이용하였다. 변성조건은 석

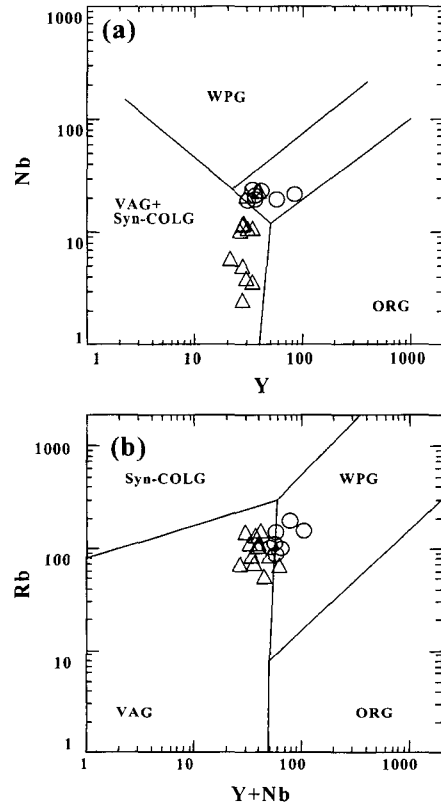


Fig. 9. Tectonic discrimination diagram (Pearce et al., 1984). (a) Log Y-Log Nb diagram. (b) Log Y+Nb-Log Rb diagram. Abbreviations; Syn-COLG-Syn-collision granites, VAG-Volcanic Arc Granites, WPG-Within Plate Granites, ORG-Ocean Ridge Granites. Symbols are the same as Fig. 5.

류석-사방회석-사장석-석영 광물군에 대하여 석류석-사방회석 지질온도계와 석류석-사방회석-사장석-석영 지질압력계를 사용하여 계산하였다. 지질온도계로는 Powell (1985)와 Lee and Ganguly(1988), Sen and Bhattacharya(1984) 및 Harley(1984)모형을 사용하였고, 지질압력계로는 Bohlen et al.(1983)와 Newton and Perkins(1982), Perkins and Chipera(1985) 등의 모형을 사용하였다.

석류석 조성은 중심부에서 주변부로 갈수록 단계적인 변화를 보이는데, 정점변성 조건을 구하는데 이용된 석류석 조성은 후퇴변성작용의 영향을 배제하기 위해 성분변화가 거의 없는 석류석의 중심부 성분을 이용하였고, 후퇴변성시의 변성조건은 석류석의 주변부 성분을 이용하였다. 사방회석과 사장석은 결정내에서 성분변화가 거의 없어 분석치의 평균값을 모든 계산에 사용하였다.

Table 3. Representative compositions of orthopyroxenes and amphiboles in the study area.

Sample	Massive Charnockite						Foliated Charnockite		Massive charnockite		Foliated Charnockite								
	Orthopyroxene						Orthopyroxene		Amphibole		Amphibole								
	MS-2		MS-2-1		MS-2-3		MS-23		MS-2		MS-23								
SiO ₂	47.53	47.57	48.02	48.08	47.83	48.55	48.52	48.87	48.53	51.11	47.90	47.29	47.50	33.18	47.40	58.78	57.40	50.53	54.51
Al ₂ O ₃	1.02	0.79	0.89	0.44	0.99	0.73	0.66	0.70	0.68	0.68	0.66	1.07	1.00	1.08	0.98	1.32	0.34	1.14	0.91
TiO ₂	0.11	0.11	0.12	0.11	0.09	0.10	0.12	0.11	0.09	0.06	0.15	0.14	0.11	0.18	0.13	0.19	0.06	0.17	0.13
FeO	40.90	41.25	40.12	41.07	40.54	41.45	41.06	40.99	41.71	35.76	40.67	42.56	42.10	41.19	41.40	28.56	32.01	34.62	32.53
MgO	8.96	8.83	9.12	9.01	8.95	8.86	8.83	8.79	8.76	9.23	8.67	7.66	7.70	8.23	8.03	6.58	7.41	9.09	8.31
MnO	0.44	0.51	0.41	0.38	0.56	0.42	0.53	0.51	0.41	0.49	0.57	0.61	0.51	0.70	0.45	0.49	0.43	0.56	0.56
Na ₂ O	0.02	0.02	0.05	0.00	0.03	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	0.03	0.05	0.03
CaO	0.73	0.65	0.70	0.66	0.72	0.64	0.63	0.60	0.61	0.76	0.69	0.67	0.83	0.72	0.65	0.39	0.16	0.89	0.38
K ₂ O	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.69	0.17	0.66	0.46
Total	99.72	99.73	99.46	99.76	99.71	100.77	100.36	100.60	100.83	98.13	99.37	100.02	99.81	85.32	99.07	97.01	98.01	97.71	97.82
	Cation per 6 oxygen																		
Si	1.956	1.962	1.972	1.977	1.964	1.975	1.980	1.986	1.976	2.065	1.976	1.957	1.966	1.706	1.969	8.713	8.574	7.867	8.269
Al	0.049	0.039	0.043	0.021	0.048	0.035	0.032	0.034	0.033	0.032	0.032	0.052	0.049	0.065	0.048	0.231	0.060	0.209	0.163
Ti	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	0.002	0.005	0.004	0.003	0.007	0.004	0.021	0.007	0.020	0.015
Fe ²⁺	1.408	1.423	1.378	1.412	1.393	1.410	1.401	1.393	1.420	1.208	1.403	1.473	1.457	1.771	1.438	3.541	3.999	4.508	4.127
Mg	0.550	0.543	0.558	0.552	0.548	0.537	0.537	0.532	0.531	0.556	0.533	0.472	0.475	0.631	0.497	1.454	1.650	2.109	1.879
Mn	0.015	0.018	0.014	0.013	0.019	0.014	0.018	0.018	0.014	0.017	0.020	0.021	0.018	0.030	0.016	0.062	0.054	0.074	0.072
Na	0.002	0.002	0.004	0.000	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.004	0.002	0.002	0.003	0.009	0.015	0.009
Ca	0.032	0.029	0.031	0.029	0.032	0.028	0.028	0.026	0.027	0.033	0.030	0.030	0.037	0.040	0.029	0.062	0.026	0.148	0.062
K	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.130	0.032	0.131	0.089
Total	4.016	4.017	4.006	4.008	4.009	4.004	4.001	3.995	4.007	3.916	4.004	4.011	4.010	4.253	4.004	14.217	14.411	15.081	14.685
X _{Mg}	0.281	0.276	0.288	0.281	0.282	0.276	0.277	0.276	0.272	0.315	0.275	0.243	0.246	0.263	0.257	0.291	0.292	0.319	0.313
X _{Ca}	0.016	0.014	0.016	0.015	0.016	0.014	0.014	0.013	0.014	0.018	0.015	0.015	0.019	0.016	0.015				
X _{Fe}	0.708	0.713	0.701	0.708	0.706	0.714	0.713	0.714	0.718	0.672	0.714	0.746	0.740	0.725	0.732				

X_{Mg}=Mg/(Mg+Fe²⁺+Ca), X_{Ca}=Ca/(Mg+Fe²⁺+Ca), X_{Fe}=Fe²⁺/(Mg+Fe²⁺+Ca).

Table 4. Representative compositions of plagioclases and K-feldspars in the study area.

Rock	Massive charnockite												Foliated charnockite														
	Mineral plagioclase						K-feldspar						Mineral plagioclase						K-feldspar								
	MS-2-1			MS-2-1			MS-2			MS-23			MS-23			MS-23			MS-23								
SiO ₂	56.68	67.75	63.58	64.05	63.52	63.54	63.14	63.66	63.73	64.27	63.87	63.82	57.27	57.75	57.41	57.35	56.81	70.95	57.58	57.58	57.58	57.43	63.84	64.13	64.05		
Al ₂ O ₃	26.47	19.71	17.13	17.36	18.09	18.38	18.45	17.97	18.57	18.08	18.14	17.80	25.75	26.20	25.90	25.71	25.41	18.11	26.25	25.75	26.05	26.05	17.56	18.07	18.22		
TiO ₂	0.00	0.01	0.01	0.05	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.00	0.03	0.04		
FeO	0.06	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.02	0.07	0.04	0.00	0.07	0.07	0.04	0.06	0.03	0.00	0.00	0.16	0.09	0.00	0.09	0.07	0.06	0.00	0.04		
MnO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.05	0.02	0.03	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.05	0.05	0.05	0.00	0.04	0.00	0.00		
Na ₂ O	6.70	11.41	0.87	0.82	0.72	0.65	1.63	0.75	0.87	0.96	0.81	0.80	6.55	6.50	6.50	6.56	6.58	4.79	6.45	6.51	6.47	6.51	0.83	0.74	0.70		
CaO	8.61	0.12	0.07	0.04	0.00	0.03	0.18	0.01	0.52	0.06	0.13	0.06	8.87	8.80	8.95	8.58	8.95	6.08	8.73	8.52	8.75	0.05	0.08	0.09			
K ₂ O	0.16	0.15	15.81	15.97	16.24	16.16	14.65	16.12	15.63	15.71	15.79	15.82	0.13	0.17	0.14	0.11	0.10	0.10	0.05	0.14	0.25	0.22	15.68	15.93	16.22		
P ₂ O ₅	0.12	0.04	0.03	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.08	0.14	0.09	0.09	0.10	0.10	0.13	0.14	0.14	0.06	0.00	0.05	0.00		
Total	98.81	99.20	97.54	98.29	98.64	98.83	98.12	98.61	99.38	99.11	98.86	98.40	98.69	99.62	99.08	98.40	98.11	100.22	99.36	98.89	99.09	98.06	99.03	99.36			
Cations per 32 oxygens																											
Si	10.288	11.929	12.070	12.060	11.941	11.915	11.878	11.969	11.875	11.985	11.958	12.003	10.400	10.381	10.387	10.428	10.392	12.240	10.372	10.427	10.385	12.040	11.977	11.948			
Al	5.664	4.091	3.834	3.854	4.009	4.063	4.092	3.983	4.079	3.975	4.004	3.947	5.513	5.552	5.524	5.512	5.480	3.683	5.575	5.497	5.554	3.904	3.979	4.007			
Ti	0.000	0.001	0.001	0.007	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001	0.003	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.000	0.005	0.000	0.004	0.006		
Fe ²⁺	0.009	0.000	0.006	0.000	0.002	0.000	0.003	0.011	0.006	0.000	0.011	0.011	0.006	0.009	0.005	0.000	0.000	0.024	0.013	0.000	0.014	0.011	0.009	0.000	0.006		
Mn	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003	0.008	0.003	0.005	0.000	0.000	0.008	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
Na	2.358	3.895	0.320	0.299	0.262	0.236	0.595	0.273	0.314	0.347	0.294	0.292	2.306	2.266	2.280	2.313	2.334	1.602	2.253	2.286	2.269	0.010	0.016	0.018			
Ca	1.674	0.023	0.014	0.008	0.000	0.006	0.036	0.002	0.104	0.012	0.026	0.012	1.726	1.695	1.735	1.672	1.754	1.124	1.685	1.653	1.695	0.304	0.268	0.253			
K	0.037	0.034	3.829	3.836	3.895	3.866	3.516	3.867	3.716	3.738	3.772	3.796	0.030	0.039	0.032	0.026	0.023	0.011	0.032	0.058	0.051	3.773	3.796	3.860			
P	0.018	0.006	0.005	0.000	0.005	0.003	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.012	0.021	0.014	0.014	0.015	0.019	0.021	0.021	0.009	0.000	0.008	0.000			
Total	20.050	19.980	20.079	20.064	20.118	20.097	20.127	20.110	20.097	20.062	20.073	20.065	19.993	19.963	19.978	19.965	20.022	18.693	19.941	19.956	19.979	20.046	20.048	20.098			
Or	0.91	0.86	91.98	92.59	93.70	94.11	84.78	93.36	89.89	91.24	92.18	92.59	0.74	0.98	0.79	0.65	0.56	0.40	0.81	1.45	1.27	92.32	93.04	93.44			
Ab	57.95	98.56	7.69	7.22	6.30	5.74	14.35	6.59	7.60	8.47	7.18	7.12	56.77	56.65	56.34	57.67	56.77	58.53	56.75	57.19	56.51	7.44	6.57	6.12			
An	41.14	0.58	0.34	0.19	0.00	0.15	0.87	0.05	2.52	0.29	0.64	0.29	42.49	42.38	42.87	41.69	42.67	41.07	42.44	41.36	42.22	0.24	0.39	0.44			

Table 5. Representative compositions of biotites in the study area.

Sample	Massive chamoockite										Foliated chamoockite										
	MS 2					MS 2-1					MS 23					MS 23					
SiO ₂	41.10	35.14	34.94	34.64	35.32	35.47	34.22	34.02	34.89	34.92	34.73	34.76	34.87	35.08	35.11	34.88	34.76	34.87	35.08	35.11	34.88
Al ₂ O ₃	16.32	13.69	14.02	14.16	13.92	13.99	13.61	13.56	12.76	13.07	13.19	13.35	13.88	14.61	13.50	13.53	13.35	13.88	14.61	13.50	13.53
TiO ₂	0.00	4.79	4.45	4.52	5.54	5.35	5.17	5.22	5.02	4.94	5.15	5.70	5.37	4.07	4.44	5.69	5.70	5.37	4.07	4.44	5.69
FeO	25.94	24.92	26.01	25.65	22.36	22.70	26.44	25.61	26.18	25.54	25.37	26.75	25.81	25.76	26.80	26.75	26.75	25.81	25.76	26.80	26.75
MgO	4.64	6.97	6.83	6.84	8.36	8.65	6.59	6.66	6.59	6.85	6.52	5.44	6.08	6.17	6.03	5.67	5.44	6.08	6.17	6.03	5.67
MnO	0.06	0.00	0.02	0.07	0.05	0.05	0.06	0.00	0.06	0.07	0.07	0.09	0.07	0.01	0.00	0.08	0.09	0.07	0.01	0.00	0.08
Na ₂ O	0.05	0.04	0.13	0.07	0.10	0.09	0.05	0.10	0.04	0.07	0.06	0.09	0.13	0.12	0.07	0.04	0.09	0.13	0.12	0.07	0.04
CaO	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	7.87	9.65	9.49	9.81	9.78	9.68	9.55	9.62	9.63	9.63	9.89	9.53	9.68	9.51	9.71	9.62	9.53	9.68	9.51	9.71	9.62
Total	96.01	95.20	95.92	95.76	95.43	95.98	95.69	94.79	95.17	95.09	94.98	95.73	95.89	95.33	95.66	96.26	95.73	95.89	95.33	95.66	96.26
formular basis on 22O																					
Si	6.244	5.557	5.509	5.477	5.506	5.496	5.438	5.445	5.568	5.556	5.541	5.524	5.504	5.548	5.577	5.507	5.524	5.504	5.548	5.577	5.507
Al(IV)	1.756	2.443	2.491	2.523	2.494	2.504	2.562	2.555	2.432	2.444	2.459	2.476	2.496	2.452	2.423	2.493	2.476	2.496	2.452	2.423	2.493
Al(VI)	1.167	0.109	0.115	0.116	0.064	0.051	-0.012	0.004	-0.031	0.008	0.022	0.025	0.087	0.272	0.105	0.026	0.025	0.087	0.272	0.105	0.026
Ti	0.000	0.570	0.528	0.537	0.650	0.623	0.618	0.628	0.603	0.591	0.618	0.681	0.637	0.484	0.530	0.676	0.681	0.637	0.484	0.530	0.676
Fe ³⁺	3.296	3.296	3.430	3.392	2.915	2.941	3.514	3.428	3.494	3.399	3.385	3.555	3.407	3.407	3.560	3.532	3.555	3.407	3.407	3.560	3.532
Mg	1.050	1.643	1.605	1.612	1.942	1.997	1.561	1.589	1.567	1.624	1.550	1.288	1.430	1.454	1.428	1.334	1.288	1.430	1.454	1.428	1.334
Mn	0.008	0.000	0.003	0.009	0.007	0.007	0.008	0.000	0.008	0.009	0.009	0.012	0.009	0.001	0.000	0.011	0.012	0.009	0.001	0.000	0.011
Na	0.015	0.012	0.040	0.021	0.030	0.027	0.015	0.031	0.012	0.022	0.019	0.028	0.040	0.037	0.022	0.012	0.028	0.040	0.037	0.022	0.012
Ca	0.005	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
K	1.525	1.947	1.909	1.979	1.945	1.913	1.936	1.964	1.961	1.955	2.013	1.932	1.949	1.919	1.968	1.938	1.932	1.949	1.919	1.968	1.938
Total	15.066	15.577	15.635	15.666	15.553	15.559	15.640	15.644	15.614	15.608	15.616	15.525	15.560	15.578	15.617	15.531	15.525	15.560	15.578	15.617	15.531
Mg/Fe	0.319	0.498	0.468	0.475	0.666	0.679	0.444	0.464	0.448	0.478	0.458	0.362	0.420	0.427	0.401	0.378	0.362	0.420	0.427	0.401	0.378
X(Ti)	0.000	0.101	0.093	0.095	0.117	0.111	0.109	0.111	0.107	0.105	0.111	0.122	0.114	0.086	0.094	0.121	0.122	0.114	0.086	0.094	0.121
X(Al(VI))	0.211	0.019	0.020	0.020	0.011	0.009	-0.002	0.001	-0.005	0.001	0.004	0.004	0.016	0.048	0.019	0.005	0.004	0.016	0.048	0.019	0.005
X _{Mg}	0.242	0.333	0.319	0.322	0.400	0.404	0.308	0.317	0.310	0.323	0.314	0.266	0.296	0.299	0.286	0.274	0.266	0.296	0.299	0.286	0.274

Table 6. Representative compositions of garnets in the study area.

Sample	Massive chamoockite																																					
	MS-2												MS-2-1																									
SiO ₂	36.91	36.46	36.86	36.77	36.88	37.14	36.04	35.94	36.22	36.11	36.23	36.35	36.24	36.42	36.34	36.14	36.25	36.36	36.01	36.91	36.46	36.86	36.77	36.88	37.14	36.04	35.94	36.22	36.11	36.23	36.35	36.24	36.42	36.34	36.14	36.25	36.36	36.01
Al ₂ O ₃	20.99	20.92	21.05	20.52	20.60	20.80	20.93	20.85	20.71	20.92	20.83	20.92	21.04	20.92	20.88	21.22	20.97	21.16	20.97	20.99	20.92	21.05	20.52	20.60	20.80	20.93	20.85	20.71	20.92	20.83	20.92	21.04	20.92	20.88	21.22	20.97	21.16	
FeO	33.72	34.19	34.76	33.71	33.86	33.91	34.85	34.96	35.53	35.58	35.37	35.18	35.46	35.85	35.86	36.35	37.16	36.85	37.25	33.72	34.19	34.76	33.71	33.86	33.91	34.85	34.96	35.53	35.58	35.37	35.18	35.46	35.85	35.86	36.35	37.16	36.85	37.25
MnO	1.05	1.09	1.05	1.02	0.98	1.01	1.07	1.13	1.22	1.17	1.29	1.24	1.20	1.21	1.31	1.13	1.30	1.27	1.22	1.05	1.09	1.05	1.02	0.98	1.01	1.07	1.13	1.22	1.17	1.29	1.24	1.20	1.21	1.31	1.13	1.30	1.27	1.22
MgO	2.96	2.84	2.91	3.06	3.20	2.88	1.71	1.89	2.15	2.17	2.20	2.22	2.39	2.50	2.70	2.83	2.95	2.92	2.96	2.96	2.84	2.91	3.06	3.20	2.88	1.71	1.89	2.15	2.17	2.20	2.22	2.39	2.50	2.70	2.83	2.95	2.92	2.96
CaO	4.42	3.66	3.42	3.62	3.45	4.68	5.10	4.21	3.72	3.60	3.50	3.40	3.18	2.75	2.12	1.89	1.48	1.25	1.09	4.42	3.66	3.42	3.62	3.45	4.68	5.10	4.21	3.72	3.60	3.50	3.40	3.18	2.75	2.12	1.89	1.48	1.25	1.09
Total	100.05	99.16	100.05	98.70	98.97	100.42	99.70	98.98	99.55	99.55	99.42	99.31	99.51	99.65	99.25	99.22	100.36	99.62	99.69	100.05	99.16	100.05	98.70	98.97	100.42	99.70	98.98	99.55	99.55	99.42	99.31	99.51	99.65	99.25	99.22	100.36	99.62	99.69
	Cations per 24 oxygens																																					
Si	5.925	5.922	5.931	5.984	5.976	5.955	5.873	5.887	5.904	5.885	5.910	5.922	5.897	5.918	5.923	5.903	5.863	5.913	5.863	5.925	5.922	5.931	5.984	5.976	5.955	5.873	5.887	5.904	5.885	5.910	5.922	5.897	5.918	5.923	5.903	5.863	5.913	5.863
Al	3.973	4.006	3.993	3.937	3.935	3.932	4.021	4.027	3.980	4.020	4.006	4.018	4.037	4.008	4.020	4.021	4.046	4.020	4.062	3.973	4.006	3.993	3.937	3.935	3.932	4.021	4.027	3.980	4.020	4.006	4.018	4.037	4.008	4.020	4.021	4.046	4.020	4.062
Fe ²⁺	4.527	4.644	4.678	4.588	4.589	4.547	4.749	4.790	4.844	4.850	4.826	4.793	4.826	4.872	4.888	4.966	5.027	5.012	5.073	4.527	4.644	4.678	4.588	4.589	4.547	4.749	4.790	4.844	4.850	4.826	4.793	4.826	4.872	4.888	4.966	5.027	5.012	5.073
Mg	0.708	0.687	0.698	0.742	0.773	0.688	0.415	0.461	0.522	0.527	0.535	0.539	0.580	0.605	0.656	0.689	0.711	0.708	0.718	0.708	0.687	0.698	0.742	0.773	0.688	0.415	0.461	0.522	0.527	0.535	0.539	0.580	0.605	0.656	0.689	0.711	0.708	0.718
Mn	0.143	0.150	0.143	0.141	0.135	0.137	0.148	0.157	0.168	0.162	0.178	0.171	0.165	0.167	0.181	0.156	0.178	0.175	0.168	0.143	0.150	0.143	0.141	0.135	0.137	0.148	0.157	0.168	0.162	0.178	0.171	0.165	0.167	0.181	0.156	0.178	0.175	0.168
Ca	0.760	0.637	0.590	0.631	0.599	0.804	0.890	0.739	0.650	0.629	0.612	0.593	0.554	0.479	0.370	0.331	0.257	0.218	0.190	0.760	0.637	0.590	0.631	0.599	0.804	0.890	0.739	0.650	0.629	0.612	0.593	0.554	0.479	0.370	0.331	0.257	0.218	0.190
Total	16.036	16.046	16.033	16.023	16.007	16.063	16.096	16.061	16.068	16.073	16.067	16.036	16.059	16.049	16.038	16.066	16.082	16.046	16.074	16.036	16.046	16.033	16.023	16.007	16.063	16.096	16.061	16.068	16.073	16.067	16.036	16.059	16.049	16.038	16.066	16.082	16.046	16.074
X _{alm}	0.738	0.759	0.766	0.752	0.753	0.736	0.766	0.779	0.783	0.786	0.785	0.786	0.788	0.796	0.802	0.809	0.814	0.820	0.825	0.738	0.759	0.766	0.752	0.753	0.736	0.766	0.779	0.783	0.786	0.785	0.786	0.788	0.796	0.802	0.809	0.814	0.820	0.825
X _{py}	0.115	0.112	0.114	0.122	0.127	0.111	0.067	0.075	0.084	0.085	0.087	0.088	0.095	0.099	0.108	0.112	0.115	0.116	0.117	0.115	0.112	0.114	0.122	0.127	0.111	0.067	0.075	0.084	0.085	0.087	0.088	0.095	0.099	0.108	0.112	0.115	0.116	0.117
X _{gr}	0.124	0.104	0.097	0.103	0.098	0.130	0.144	0.120	0.105	0.102	0.099	0.097	0.090	0.078	0.061	0.054	0.042	0.036	0.031	0.124	0.104	0.097	0.103	0.098	0.130	0.144	0.120	0.105	0.102	0.099	0.097	0.090	0.078	0.061	0.054	0.042	0.036	0.031
X _{sp}	0.023	0.025	0.023	0.023	0.022	0.022	0.024	0.026	0.027	0.026	0.029	0.028	0.027	0.027	0.030	0.025	0.029	0.029	0.027	0.023	0.025	0.023	0.023	0.022	0.022	0.024	0.026	0.027	0.026	0.029	0.028	0.027	0.027	0.030	0.025	0.029	0.029	0.027
X _{Mg}	0.135	0.129	0.130	0.139	0.144	0.131	0.080	0.088	0.097	0.098	0.100	0.101	0.107	0.111	0.118	0.122	0.124	0.124	0.124	0.135	0.129	0.130	0.139	0.144	0.131	0.080	0.088	0.097	0.098	0.100	0.101	0.107	0.111	0.118	0.122	0.124	0.124	0.124

X_{alm}=Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg+Ca+Mn), X_{py}=Mg/(Fe²⁺+Mg+Ca+Mn), X_{gr}=Ca/(Fe²⁺+Mg+Ca+Mn), X_{sp}=Mn/(Fe²⁺+Mg+Ca+Mn).

Table 6. (Continued).

Sample	Massive charnockite												Foliated charnockite																													
	MS-2-1												MS-23																													
	Cations per 24 oxygens																																									
Si	5.880	5.867	5.879	5.829	5.874	5.874	5.862	5.853	5.890	5.873	5.903	5.894	5.855	5.884	5.884	5.975	5.944	5.947	5.954	5.995	5.958	5.880	5.867	5.879	5.829	5.874	5.874	5.862	5.853	5.890	5.873	5.903	5.894	5.855	5.884	5.884	5.975	5.944	5.947	5.954	5.995	5.958
Al	4.072	4.022	4.046	4.074	4.053	4.053	4.065	4.059	4.027	4.002	3.999	4.012	4.021	4.000	4.000	3.892	3.928	3.971	3.943	3.901	3.923	4.072	4.022	4.046	4.074	4.053	4.053	4.065	4.059	4.027	4.002	3.999	4.012	4.021	4.000	3.892	3.928	3.971	3.943	3.901	3.923	
Fe ²⁺	5.053	5.142	5.131	5.172	5.113	5.088	5.073	5.073	4.792	4.717	4.686	4.697	4.740	4.734	4.734	4.562	4.600	4.570	4.556	4.537	4.571	5.053	5.142	5.131	5.172	5.113	5.088	5.073	5.073	4.792	4.717	4.686	4.697	4.740	4.734	4.562	4.600	4.570	4.556	4.537	4.571	
Mg	0.768	0.790	0.769	0.760	0.772	0.771	0.771	0.730	0.648	0.571	0.554	0.544	0.487	0.411	0.411	0.142	0.175	0.168	0.153	0.153	0.145	0.768	0.790	0.769	0.760	0.772	0.771	0.771	0.730	0.648	0.571	0.554	0.544	0.487	0.411	0.142	0.175	0.168	0.153	0.153	0.145	
Mn	0.155	0.155	0.149	0.171	0.164	0.166	0.166	0.155	0.154	0.175	0.155	0.159	0.205	0.172	0.172	0.541	0.560	0.544	0.536	0.577	0.549	0.155	0.155	0.149	0.171	0.164	0.166	0.166	0.155	0.154	0.175	0.155	0.159	0.205	0.172	0.541	0.560	0.544	0.536	0.577	0.549	
Ca	0.143	0.119	0.116	0.117	0.119	0.111	0.111	0.216	0.555	0.757	0.766	0.759	0.790	0.894	0.894	0.932	0.845	0.843	0.888	0.853	0.916	0.143	0.119	0.116	0.117	0.119	0.111	0.111	0.216	0.555	0.757	0.766	0.759	0.790	0.894	0.932	0.845	0.843	0.888	0.853	0.916	
Total	16.071	16.095	16.090	16.123	16.095	16.063	16.086	16.086	16.066	16.095	16.063	16.065	16.098	16.095	16.095	16.044	16.052	16.043	16.030	16.016	16.062	16.071	16.095	16.090	16.123	16.095	16.063	16.086	16.086	16.066	16.095	16.063	16.065	16.098	16.095	16.044	16.052	16.043	16.030	16.016	16.062	
X _{Alm}	0.826	0.829	0.832	0.832	0.829	0.829	0.829	0.822	0.779	0.758	0.761	0.763	0.762	0.762	0.762	0.739	0.744	0.746	0.743	0.741	0.740	0.826	0.829	0.832	0.832	0.829	0.829	0.829	0.822	0.779	0.758	0.761	0.763	0.762	0.762	0.739	0.744	0.746	0.743	0.741	0.740	
X _{Py}	0.126	0.127	0.125	0.122	0.125	0.126	0.126	0.118	0.105	0.092	0.090	0.088	0.078	0.066	0.066	0.088	0.091	0.089	0.087	0.094	0.089	0.126	0.127	0.125	0.122	0.125	0.126	0.126	0.118	0.105	0.092	0.090	0.088	0.078	0.066	0.088	0.091	0.089	0.087	0.094	0.089	
X _{Gr}	0.023	0.019	0.019	0.019	0.019	0.018	0.018	0.035	0.090	0.122	0.124	0.123	0.127	0.144	0.144	0.151	0.137	0.138	0.145	0.139	0.148	0.023	0.019	0.019	0.019	0.019	0.018	0.018	0.035	0.090	0.122	0.124	0.123	0.127	0.144	0.151	0.137	0.138	0.145	0.139	0.148	
X _{Sp}	0.025	0.025	0.024	0.027	0.027	0.027	0.027	0.025	0.025	0.028	0.025	0.026	0.033	0.028	0.028	0.023	0.028	0.027	0.025	0.025	0.023	0.025	0.025	0.024	0.027	0.027	0.027	0.027	0.025	0.025	0.028	0.025	0.026	0.033	0.028	0.023	0.028	0.027	0.025	0.025	0.023	
X _{Mg}	0.132	0.133	0.130	0.128	0.131	0.132	0.132	0.126	0.119	0.108	0.106	0.104	0.093	0.080	0.080	0.106	0.109	0.106	0.105	0.113	0.107	0.132	0.133	0.130	0.128	0.131	0.132	0.132	0.126	0.119	0.108	0.106	0.104	0.093	0.080	0.106	0.109	0.106	0.105	0.113	0.107	

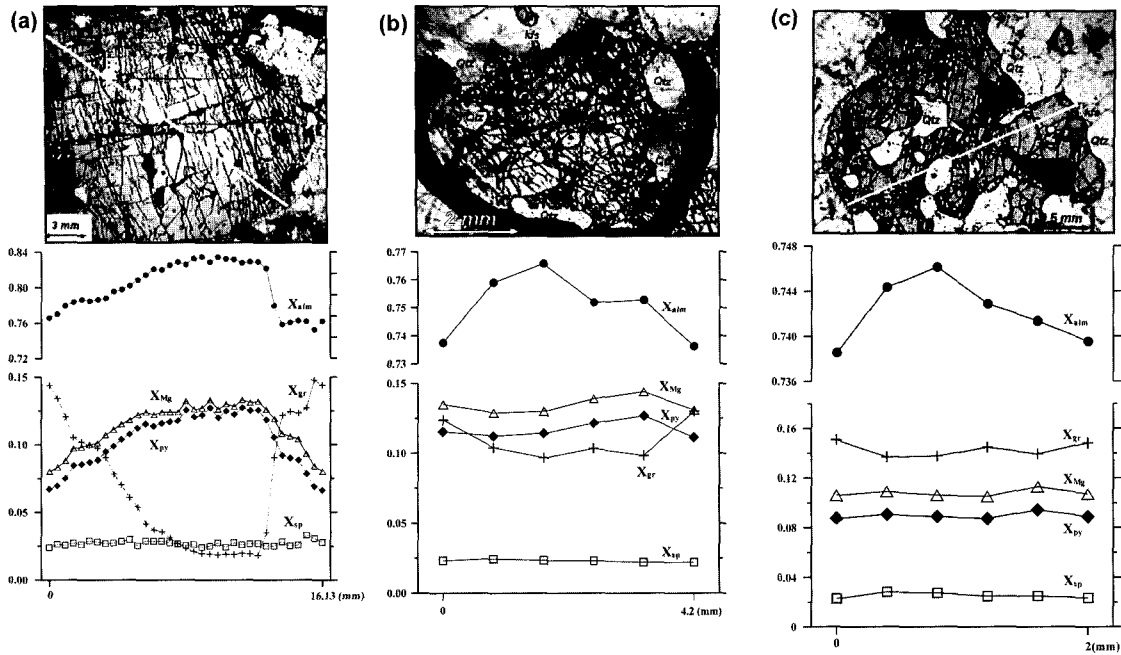


Fig. 10. Compositional zoning profile of garnet in charnockite. (a) MS 2-1 and (b) MS-2 are massive charnockite and (c) MS-23 is foliated charnockite.

석류석-사방회석 지질온도계와 석류석-사방회석-사장석-석영 지질압력계를 통해 얻어진 괴상 및 엽리상 차노카이트의 변성조건은 시료에 따라 약 600~850°C, 2~7 kb의 큰 범위로 변화하지만, 뚜렷한 누대구조를 보이는 시료 MS 2-1의 석류석 중심부 성분을 사용하였을 경우 3.5 kb, 800°C의 백립암상에 해당하는 변성조건을 보이고, 주변부 성분을 사용하였을 경우 6 kb, 600°C의 변성조건을 보여준다(Fig. 12(a)).

THERMOCALC(ver. 2.7) 프로그램 이용시에도 지질온도압력계에서 사용된 값과 동일한 광물조성을 적용하였으며, 후퇴변성의 경우에만 사방각섬석을 고려하여 계산하였다. 계산 결과는 석류석의 중심부 성분을 이용한 경우, 약 2.2~7.8kb, 600~750°C, 주변부 성분을 이용한 경우에는 약 400~600°C, 3.5~5.2 kb이다(Fig. 12(b)).

석류석의 주변부와 사방각섬석과의 뚜렷한 접촉관계를 확인할 수 없어 정확한 후퇴변성조건을 설명하기는 어렵지만, 사방회석의 주변부가 뚜렷하게 사방각섬석화되어 있고, 광물조직과 광물성분을 통해서 적어도 두 번 이상의 변성작용을 받았음을 확인할 수 있다. 점점 변성작용 시기에 압력이 급상승하고 후퇴변성작용 시기에 온도-압력 조건이 서서히 감소한 것으로 추정되는데, 점점 변성작용시의 압력 상승은 석류석의 중심

부에서 주변부로 갈수록 그로슬라 함량이 크게 증가하는 것으로도 확인된다. 또한, 각 시료에 나타나는 석류석의 크기와 성분 함량을 고려해볼 때, MS 2-1 시료의 석류석은 초기부터 계속적으로 성장하였고, MS 2와 MS 23 시료의 석류석은 이차적인 변성작용시에 결정 및 재결정화되었음을 지시한다. 이러한 결과는 초기 고변성 작용이 일어난 후 저변성 작용에 의해 재형성이 이루어졌음을 지시하는 것이며, 반시계 방향으로 후퇴한 진화경로를 보여준다.

최근에는 선캠브리아기 소백산 육괴의 생성 및 변성 시기와 관련된 연대 자료들이 자주 보고되고 있다. 먼저 주승환과 김성재(1986)는 영남 육괴의 화강암질 편마암류에 대해서 1.8 Ga의 Rb-Sr 연대를 보고하였고, Kim and Turek(1996)와 Turek and Kim(1996)은 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암에 대한 저어콘 U-Pb 연대 측정 결과 각각 2.1과 1.9 Ga의 생성연대를 얻었다. 박계현 외(2001)는 괴상 및 엽리상 차노카이트의 변성시기를 구하기 위해 전암과 석류석에 대한 Sm-Nd 동위원소 분석을 실시하여 각각에 대해 1.83 ± 0.03 Ga와 1.82 ± 0.2 Ga의 결과를 보고하였다. 이들은 또한 차노카이트의 동편에 위치한 하동-산청 회장암 복합체 중 함티타늄 회장암질암에서 분리한 석류석, 사장석 및 기타 유색광물들에 대한 Sm-Nd 동위원소 분석을 통해

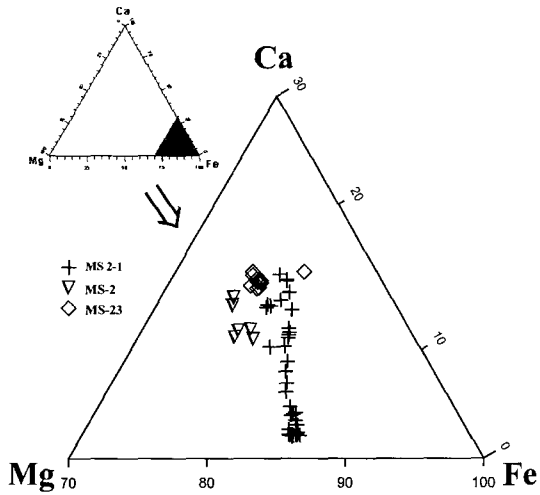


Fig. 11. Chemical composition of garnet plotted in the Ca-Mg-Fe ternary diagram.

1.79 ± 0.09 Ga의 최소 생성연대를 구하였다. 이러한 결과를 종합하면 차노카이트가 처음 생성된 시기는 아직 확실치 않으나 18억 년을 전후하여 조산운동과 관련된 강한 변성작용을 받았고, 이후에 지각의 융기를 통해 후퇴된 경로를 거쳤음을 지시한다. 차노카이트와 회장암질암에서 구한 연대가 유사한 것은 두 암체가 동일한 시기에 광역변성작용을 받은 결과라고 해석될 수 있다. 그러나 차노카이트의 경우 백립암상에 이르는 고도의 변성작용을 받았음에 비해 바로 인접한 회장암체는 원래의 휘석들이 각섬석 등으로 바뀌는 비교적 낮은 변성도만을 보이는 것을 감안하면 동일한 변성작용에 의해 두 암체가 같은 동위원소 연령이 갖게 된 것으로 판단되지 않는다. 이보다는 백립암상에 이르는 차노카이트의 변성작용은 지각 내 깊은 곳에 고온의 회장암질 마그마가 관입하면서 이에 수반되어 일어났던 것으로 보는 것이 보다 논리적이라고 생각한다. 이후 다시 지각이 서서히 융기되는 과정에서 재평형과 저변성작용이 중첩된 것으로 해석된다.

결 론

소백산 육괴 남서부의 지리산 지역에 분포하는 하동산청 회장암 복합체 서편에 대상으로 분포하는 사방휘석을 함유하는 화강암질 암석은 전형적인 차노카이트인 것으로 밝혀졌다. 이 차노카이트는 지리산 지역에 인접하여 분포하는 화강암질 편마암, 반상변정질 편마암, 석영장석질 편마암과는 구분되는 전암 화학조성

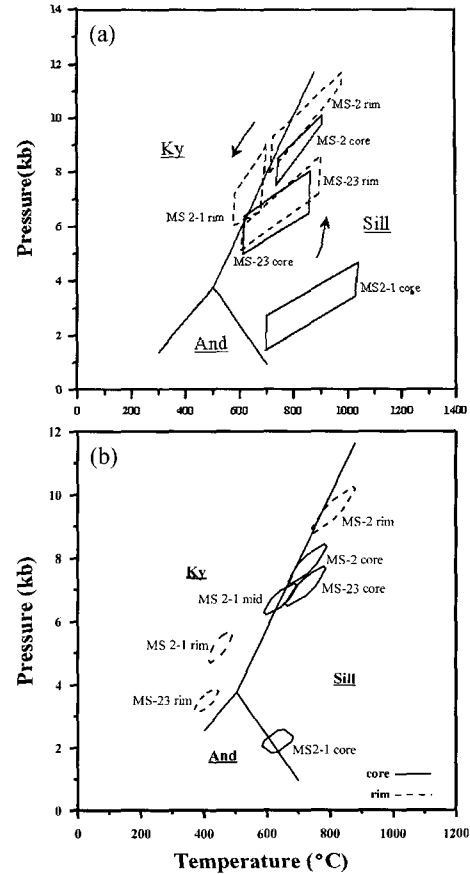


Fig. 12. (a) P-T condition of the study area inferred from Geothermobarometric data. (b) P-T condition and anticlockwise P-T path of the study area. All reactions are calculated by the THERMOCALC program(ver. 2.7).

을 갖는다. 따라서 기존의 암석들이 단지 변성도가 높아지면서 사방휘석을 함유하는 차노카이트가 만들어진 것이 아니며 이 암체는 원래부터 독립적인 암체였음을 알 수 있다. 괴상과 염리상으로 산출되는 차노카이트 모두 비교적 균질한 희토류원소 패턴을 보이며 AFM 삼각도에서 모두가 솔레아이트의 분화경로를 따라 변화하는 것으로 볼 때 이들은 동일한 기원물질에서 화성기원으로 만들어진 암체로 판단된다.

한편 구성 광물들에 대한 관찰과 화학분석을 실시한 결과 여러 차례에 다른 생성시기에 만들어진 광물들이 존재하며 석류석 역시 누대구조를 보이는 것 등은 지리산 지역의 차노카이트가 변성작용을 겪었음을 나타낸다. 전체적인 광물조합은 사방휘석-석류석-K-장석-사장석-흑운모-석영의 전형적인 백립암상의 변성광물군

을 이루고 있으며, 지질온도-압력계와 THERMOCALC 프로그램(ver. 2.7)에 의해 계산된 변성온도-압력 조건 역시 백립암 변성상의 높은 변성온도-압력조건을 나타낸다. 또한 연구 지역의 차노카이트에서 나타나는 광물군을 이용하여 얻어진 변성경로는 후퇴된 반시계 방향의 변성진화과정을 겪었음을 지시한다. 측정된 압력 조건은 연구 지역의 차노카이트가 적어도 7 kbar 이상(약 25 km 이상; 1 kbar/3.5 km, Hess, 1989)의 깊이에서 형성되었음을 지시한다.

백립암상에 이르는 차노카이트의 변성작용은 지각 내 깊은 곳에 고온의 회장암질 마그마가 관입하면서 이에 수반되어 일어났던 것으로 판단되며 이후 다시 지각이 서서히 융기되는 과정에서 재평형과 저변성작용이 중첩된 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 송용선에 대한 부경대학교의 학술연구비 지원으로 수행되었다. 야외조사와 시료준비, 자료정리에 많은 도움을 주신 류호정, 김남훈, 이호선 등 암석학 실험실원들에게 깊은 감사를 드린다. 또한, 이 논문의 심사과정동안 많은 문제점을 지적하고 수정하여 주신 오창환 박사님과 안건상 박사님께 감사를 드린다.

참고문헌

김남장, 강필중, 1965, 진교도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 김옥준, 홍만섭, 박희인, 박양대, 김기태, 윤선, 1964a, 산청도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 김옥준, 홍만섭, 윤석규, 박희인, 박양대, 김기태, 이하영, 윤선, 1964b, 운봉도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 김동연, 송용선, 박계현, 1998, 지리산 동부지역에 분포된 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구. 대한지질학회 제 53차 학술발표회 초록집, 35-36.
 남기양, 류환수, 이종덕, 1989, 하동도폭 지질보고서, 한국동력자원연구소.
 박계현, 김동연, 송용선, 2001, 지리산 지역 차노카이트와 합티탄철석 회장암질암의 Sm-Nd 광물연대 및 성인적 관계. 암석학회지, 10, 27-35.
 송용선, 1997, 소백산 육괴 남부 지리산 편마암 복합체의 변성진화에 관한 연구. 한국과학재단 연구보고서, 39p.
 송용선, 1999, 소백산 육괴 서남부 지리산지역의 반상변질질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
 이상만, 1980, 지리산(하동-산청) 지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
 이종만, 정지곤, 김원사, 1999, 하동지역 회장암질암의 진화 및 합티탄늄광체와 성인적 관련성에 대한 예비연구.

지질학회지, 35, 321-336.
 정지곤, 1987, 하동-산청지역에 분포한 회장암질암의 분화. 지질학회지, 23, 216-228.
 주승환, 김성재, 1986, 영남육괴 Rb-Sr 연대측정 연구(II): 지리산 남서부일대 회장암질암 및 편마상화강암류, 조사보고서, 7-33.
 Bohlen, S.R., Wall, V.J. and Boettcher, A.L., 1983, Experimental investigations and geological applications of equilibria in the system FeO-TiO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. Am. Min., 68, 1049-1058.
 Bohlen, S.R., 1987, Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. J. Geology, 95, 617-632.
 Bohlander, F., Van Reenen, D.D. and Barton, J.M., Jr., 1992, Evidence for metamorphic and igneous charnockites in the Southern Marginal Zone of the Limpopo Belt. Precam. Res., 55, 429-449.
 Clifford, T.N., Barton, E.S., Retief, E.A., Rex, D.C. and Fanning, C.M., 1995, A crustal progenitor for the intrusive anorthosite-charnockite kindered of the cupriferous koperberg suite l'okiep distric, Namaqualand, South Africa: new isotope data for the country rocks and the intrusives. J. Petrology, 36, 231-258.
 Cooray, P.G., 1969, Charnockites as metamorphic rocks. Am. J. Sci., 267, 969-982.
 Duchesne, J.C. and Wilmart, E., 1997, Igneous Charnockites and Related Rocks from the Bjerkreim-Sokndal Layered Intrusion (Southwest Norway): a Jotunite (Hyperthene Monzodite)-Derived A-type Granitoid Suite. J. Petrology, 38, 337-369.
 Emslie, R.F., 1978, Anorthosite massifs, rapakivi granites, and late Proterozoic rifting of North America. Precam. Res., 7, 61-98.
 Harley, S.L., 1984, An experimental study of partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. Contrib. Mineral. Petrol., 86, 359-373.
 Hess, P.C., 1989, Origins of Igneous Rocks. Harvard University Press. Cambridge, 336p.
 Higgins, M.D. and van Breemen, O., 1996, Three generations of anorthosite-mangerite-charnockite-granite (AMCG) magmatism, contact metamorphism and tectonism in the Saguenay-Lac-Saint-Jean region of the Grenville Province, Canada. Precam. Res., 79, 327-346.
 Holland, TJB. and Powell, R., 1998, An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. J. meta. Geol., 16, 309-343.
 Irvine, T.N. and Barager, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian J. Earth Sciences, 8, 523-548.
 Janardhan, A.S., Newton, R.C. and Hansen, E.C., 1982, The transformation of amphibolite facies gneiss to charnockite in southern Karnataka and Northern Tamil Nadu, India. Contrib. Mineral. Petrol., 79, 130-149.

- Kim, C.B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochem. J.*, 30, 323-338.
- Kwon, S.T. and Jeong, J.G., 1990, Preliminary Sr-Nd isotope study of the Hadong- Sanchung Anorthositic rocks in Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 26, 341-349.
- Lee, H.Y. and Ganguly, J., 1988, Equilibrium compositions of coexisting garnet and orthopyroxene: reversed experimental determinations in the system FeO-MgO-Al₂O-SiO₂ and applications. *J. Petrology*, 29, 93-114.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Sci. Am. Bulletin*, 101, 635-643.
- Newton, R.C., 1992, An overview of charnockite. *Precam. Res.*, 55, 399-405.
- Newton, R.C. and Perkins, D.I., 1982, Thermodynamic calibration of geobarometers based on the assemblages garnet-plagioclase-orthopyroxene(clinopyroxene)-quartz. *Am. Min.*, 67, 203-222.
- O'Connor, J.T., 1965, A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 525-B*, 79p.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrology*, 25, 956-983.
- Perkins, D. and Chipera, S.J., 1985, Garnet-orthopyroxene-plagioclase-quartz barometry: Refinement and application to the English River subprovince and the Minnesota River Valley. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 89, 69-80.
- Powell, R., 1985, Geothermometry and geobarometry: a discussion. *J. Geol. Soc.*, London, 142, 29-38.
- Powell, R., Holland, T.J.B. and Worley, B., 1998, Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC. *J. Meta. Geol.*, 16, 575-586.
- Ridley, J., 1992, On the origins and tectonic significance of the charnockite suite of the Archaean Limpopo Belt, Northern Marginal Zone, Zimbabwe. *Precam. Res.*, 55, 407-427.
- Sen, S.K. and Bhattacharya, A., 1984, An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88, 64-71.
- Streckeisen, A., 1976, To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, 12, 1-33.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1996, U-Pb zircon ages for Precambrian rocks in southwestern Ryeongnam and southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochem. J.*, 30, 231-249.
- Wendlandt, R.F., 1981, Influence of CO₂ on melting of model granulite facies assemblages: a model for the genesis of charnockites. *Am. Min.*, 66, 1164-1174.
- Zhao, J-X., Ellis, D.J., Kilpatrick, J.A. and McCulloch, M.T., 1997, Geochemical and Sr-Nd isotopic study of charnockites and related rocks in the northern Prince Chales Mountains, East Antarctica: implications for charnockite petrogenesis and proterozoic crustal evolution. *Precam. Res.*, 81, 37-66.
- Zhou, X.Q., Bingen, B., Demaiffe, D., Liegeois, J.P., Hertogen, J., Weis, D. and Michot, J., 1995, The 1160Ma Hidderskog meta-charnockite: implications of this A-type pluton for the Sveconorwegian belt in Vest Agdar (SW Norway). *Lithos*, 36, 51-66.

(2002년 10월 7일 접수, 2002년 11월 9일 채택)