

산청지역에 분포하는 차노카이트의 암석학적 연구

이영택^{1,*} · 이상원² · 옥수석³

¹성도고등학교, 616-093, 부산광역시 북구 구포3동 산48-56

²부산대학교 지구과학교육과, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 50

³경성대학교 자연과학부, 608-020, 부산광역시 남구 대연동 110-1

Petrology of Charnockite in Sancheong Area

Young-Taek Lee^{1,*}, Sang-Won Lee², and Soo-Seck Ock³

¹Sung Do High School, Pusan, 616-093, Korea

²Department of Earth Sciences, Pusan National University, Pusan, 608-020, Korea

³Division of Natural Science, Kyungsung University, Pusan, 608-020, Korea

Abstract: The Charnockite in Sancheong region is quartzofeldspathic rock containing orthopyroxene and garnet with a color dark than common granitic rocks. The Charnockite are mostly massive and medium to coarse-grained with K-feldspar phenocryst, but reveal weak foliation. The rock consist mainly of quartz, K-feldspar, plagioclase and orthopyroxene, with biotite, garnet, and anthophyllite. In petrochemistry, the Charnockite has 61-65% SiO₂ contents, varying gradually into the margin contacted with orthogneiss, which have compositions of felsic igneous rocks. Major element show almost systematical variation with those of the marginal orthogneisses, except the hornblende gneiss and anorthosite. The Charnockite and orthogneisses show the tholeiitic differentional trend. Trace and rare earth element abundance patterns in the Charnockite show remarkable negative Sr and Eu anomalies similar to orthogneisses, but different from the hornblende gneiss and anorthosite. Eu contents of the Charnockite are richer than that of orthogneisses. The metamorphic condition of the Charnockite were tested by an orthopyroxene-garnet geothermometer and a plagioclase-garnet geobarometer. Estimated P-T conditions are about 761°C and 7 kbar at peak metamorphism, but 653°C and 6.4 kbar at retrograde metamorphism. This suggests that the Charnockite have from an early stage of high-grade metamorphism to represent the granulite facies and then to a late stage medium-grade metamorphism belonging to the amphibolite facies.

Keywords: Charnockite, quartzofeldspathic rock, orthopyroxene, granulite facies

요 약: 연구지역의 차노카이트는 일반 화강암질암에 비해 암색을 띠고, 사방휘석과 석류석을 함유하는 석영-장석질암이다. 일부 지역에서 엽리가 발달하나 대체로 미약한 편이며 산상의 특징, 구성광물의 종류와 암석의 변형 정도 등에 의해 암상의 변화를 보인다. 주 구성광물은 석영, 사장석, K-장석, 사방휘석이며, 흑운모, 석류석, 앤소필라이트 등을 부분적으로 포함한다. 암석화학적 분석 결과, SiO₂의 함량이 61~65%에 해당되었으며, 주위의 규장질 화성암 조성의 편마암류들과 연속적인 변화 경향성을 보인다. 주성분 산화물들의 변화 경향을 살펴본 결과, 각섬석 편마암, 회장질암을 제외한 주위의 편마암류들과 거의 동일한 체계성을 보였다. 차노카이트의 변성조건을 고찰하기 위하여 사방휘석-석류석 지온계와 사장석-석류석 지압계를 적용해 본 결과 석류석의 중심부의 경우 761°C 내외의 온도와 약 7 kbar의 압력 조건, 주변부의 경우 653°C 내외의 온도와 약 6.4 kbar의 압력조건을 지시하였다. 이는 차노카이트가 초기의 고변성작용을 받은 후 보다 후기의 저변성작용에 의해 재평형이 이루어졌음을 암시한다.

주요어: 차노카이트, 석영장석질암, 사방휘석, 백립암상

*Correponding author: taekdo2000@yahoo.co.kr

Tel: 82-51-335-4189

Fax: 82-51-332-9951

서 론

산청 지역은 여러 종류의 편마암류로 구성되어 있는 곳으로 최근 연구에 의해 상당 부분이 화성기원 의 정편마암으로 밝혀졌으며, 차노카이트 등 지금까지 지리산 편마암복합체 내에서 기재되지 않았던 암 석들이 확인되었다(이상원, 1997). 본 연구의 목적은 야외 지질조사를 통해 차노카이트의 암석학적인 특징 을 기재하고, 야외 산상에서 주변 편마암류와의 접촉 관계를 밝히고자 하였으며, 광물화학과 암석화학적 특성을 분석하여 주변 편마암류와의 화학적 관련성, 변성작용의 특성을 규명하는 것이다. 본 역에 대한 기존 조사자료인 1:50,000 산청도폭(김옥준 외, 1964)과 단성도폭(최유구 외, 1964)에서는 차노카이 트를 괴상 화강편마암이나 흑운모 편마암으로 기재하 였다. 그러나 이상원(1997)에 의해 연구지역에서 차 노카이트의 분포에 대해 최초로 보고가 되었으며, 이 후 김동연(1999)에 의해 차노카이트의 광물화학적 특 징과 지질연대에 대한 연구가 수행된 바 있다.

지질 개요

연구지역의 지질은 한반도 선캄브리아 이언의 변성 암류인 소백산육괴 남서부 지리산 편마암복합체가 기 지가 되며, 이들을 후기에 회장암질암이 관입하였다. 연구지역의 지질도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 들은 크게 선캄브리아 이언 편마암류와 차노카이트 그리고 회장암질암 등으로 구분된다. 연구 지역의 기저를 이루는 선캄브리아 이언의 편마암류는 변성니질암과 이 를 관입한 편마암류로 구분된다. 변성니질암은 연구 지역내의 암석 중 최고기의 암석으로 추정되며 주로 잔류반상 화강편마암과 화강암질 편마암에 포획되어 산출된다. 편마암류로는 화강암질 편마암, 잔류반상 화강편마암, 흑운모 편마암, 우백질 화강편마암, 각섬 석 편마암으로 분대된다. 이들은 전체적으로 남북 방 향의 대상 분포를 하고 있다. 주 연구대상 암체인 차 노카이트는 사방회석을 함유하는 화강암질암으로 알 려져 있으며, 외관상 화강암질암에 비해 우흑질이고 광택을 보여주는 특이한 암석이다. 이 암체는 연구지

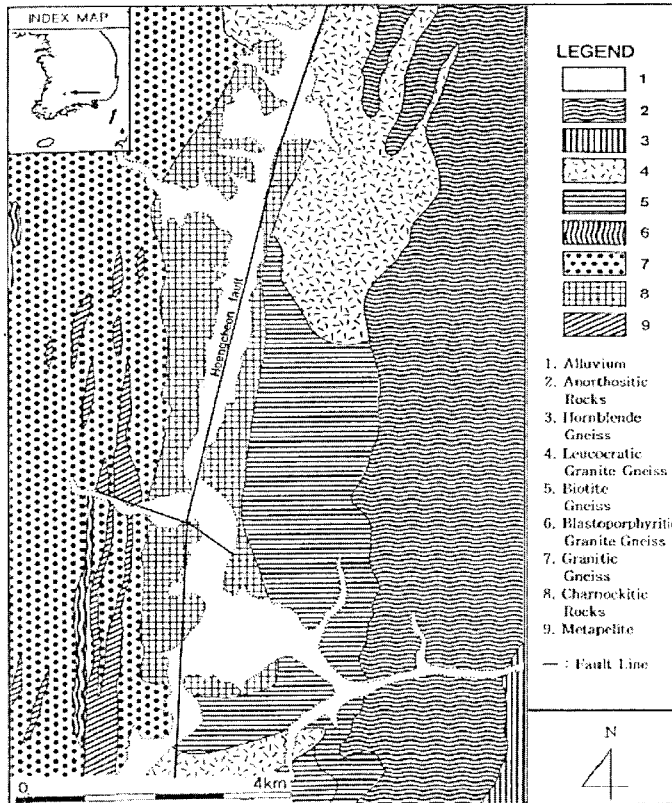


Fig. 1. Simplified geological map of the study area.

역의 중심부에서 편마암류와 나란히 남북방향으로 분포한다. 차노카이트는 서편에서 화강암질 편마암이, 동편은 흑운모 편마암과 접하고 있으며, 암상에서 이들과 뚜렷한 차이를 보인다. 이 암체는 휘석, 석류석, 흑운모 등의 광물조성을 가지는 중 내지 조립의 화강암과 유사한 암석으로 알려져 있다. 야외 노두상의 특징으로는, 화강암질암에 비해 암색을 띠며 거정의 K-장석(주로 미사장석) 반정을 함유한다(Fig. 2).

차노카이트의 기재

정의 및 기원

차노카이트에 대한 최초의 정의는 Holland(1893)에 의해 이루어졌다. 그는 'Job Charnock'의 묘비로 사용되어진 하이퍼어신-화강암(hypersthene-granite)에 차노카이트라는 명칭을 제안하였으며, 인도 마드라스(Madras) 지방의 하이퍼어신-그래놀라이트의 산출에 대한 기재를 하면서 이를 "차노카이트"라고 명명하였다. 또한 그는 초엽기성에서 산성까지의 성분적으로 분화된 화성암 산출물임을 나타내기 위하여 포괄적인 의미의 "차노카이트 계열(charnockite series)"을 정의하고, 그 중 하이퍼어신, 미사장석, 석영 등의 성분으로 구성된 하이퍼어신-화강암을 산성계열의 차노카이트 암석군(charnockite unit)으로 명명하였다. 일반적인 의미에서의 차노카이트는 사방휘석을 함유하는 석영-장석질 암석으로 정의된다(Pichamuthu, 1969; Ridley, 1992; Newton, 1992). 차노카이트의 산출에 대한 보고는 다른 암석류에 비해 흔치 않다. 현재까지 보고된 세계적 주요 산출지를 보면, 인도 남부의 마드라스 지방, 유럽의 스웨덴, 노르웨이, 북미 등지이다. 세계적 산출지에서 차노카이트의 기원과 그 산상의 특징을 종합해 보면, 대부분 선캄브리아 이언 백립암상에 이르는 고변성을 받은 점과 괴상의 회장 암체가 수반하여 산출된다는 점 등이다. 따라서 회장 암질암과 관련하여 마그마 기원에 대한 논의도 분분하다. 대체로 동일 기원으로서 동원 마그마(comagmatic) 분별결정화 작용의 산물로 기재된 경우도 있으나 (DemaiFFE and Hertogen, 1981), 그 기원을 다양하게 해석하는 경우가 보편적이다. 연구지역의 산청 차노카이트의 경우도 마찬가지로, 암상의 동편에서 흑운모 편마암에 의해 격리되어 회장암체가 수반하고 있으며, 차노카이트가 그래놀라이트상에 이르는 고도의 변성작용을 거친 것으로 밝혀졌다.

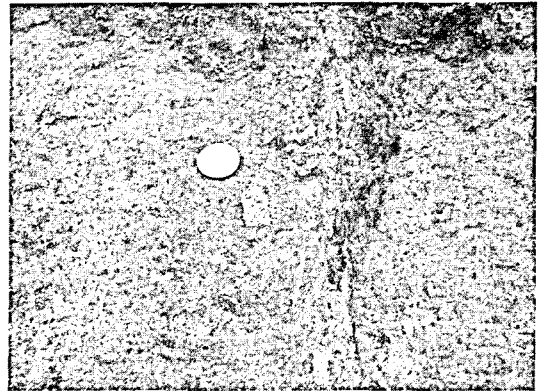


Fig. 2. Photographs of K-feldspar phenocrysts in charnockite at Pyeongchon-ri, Sancheong.

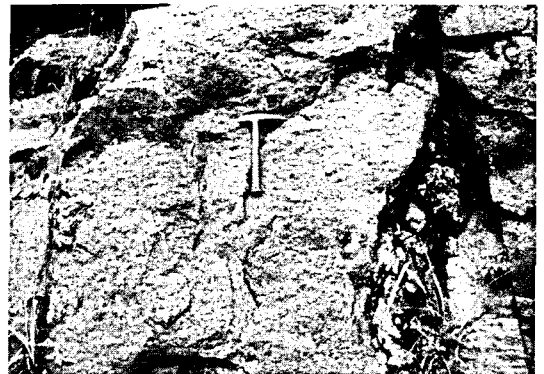


Fig. 3. The outcrop of charnockitic rock showing waxy luster and dark gray or green colors.

야외 산상

연구지역의 중심부에서 북쪽의 삼장면 평촌리로부터 남쪽으로 석남리, 덕교리, 대포리를 거쳐 시천면의 사리까지 남북방향으로 연장 약 10 km, 폭 1 km 내지 1.5 km의 규모로 분포한다. 서쪽 연변으로는 화강암질 편마암과, 동측으로는 흑운모 편마암과 접하며, 중심부로 횡천 단층과 더불어 덕천강이 지난다. 야외 산상에서 일반적인 화강암질암에 비해 암색을 띠며 K-장석 반정을 함유하는 괴상의 암체이다(Fig. 2). 이 암체의 동쪽 연변부에서 동력적 힘에 의한 듯한 부분적인 엽리구조를 보여주기도 하지만, 그 외 대부분의 지역에서 엽리의 발달을 볼 수 없다. 신선한 표면을 육안으로 관찰하면 기름을 칠한 듯한 매끈한 느낌의 광택을 보이며, 암회색 내지 암록색을 띤다(Fig. 3).



Fig. 4. Photomicrograph of charnockitic rock showing mineral assemblage with plagioclase-K-feldspar-orthopyroxene-quartz-garnet (under crossed polars). (Opx: orthopyroxene, Grt: garnet, Kfs: K-feldspar Pl: plagioclase)

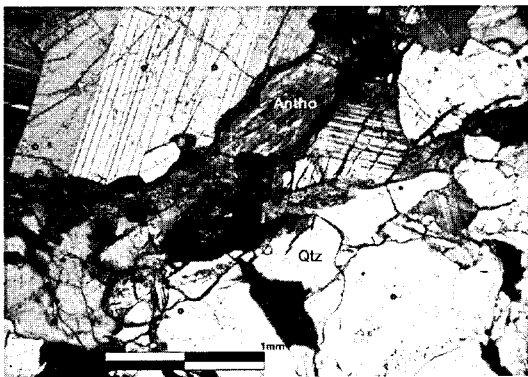


Fig. 5. Photomicrograph of orthopyroxene replaced to anthophyllite.

광물 조성

차노카이트의 주 구성광물은 석영, 사장석, K-장석, 사방휘석 등이며, 흑운모, 석류석, 앤소필라이트 등을 소량 함유한다(Fig. 4). 석영은 주로 주변 암체와의 접촉부나 연변부에서 파동소광을 보이며, 흑운모가 교대되어 비미컬러 석영의 형태로 나타나기도 한다. 사장석은 전체적으로 조립질이며 칼스바드 쌍정, 알바이트 쌍정을 보이거나 혹은 페리클린 쌍정을 보인다. 연변부의 시료에서는 사장석이 심하게 굴곡된 모습을 보이고 있는데, 이는 보다 후기에 동력적인 힘을 받았음을 지시한다. K-장석은 주로 격자쌍정을 나타내는 미사장석으로, 장방향 내지 원형의 반정이며 일부는 퍼다이트로 출현한다. 사방휘석은 앤소필라이트로 후퇴 변성되어 반응 주변부(reaction rim)가 발

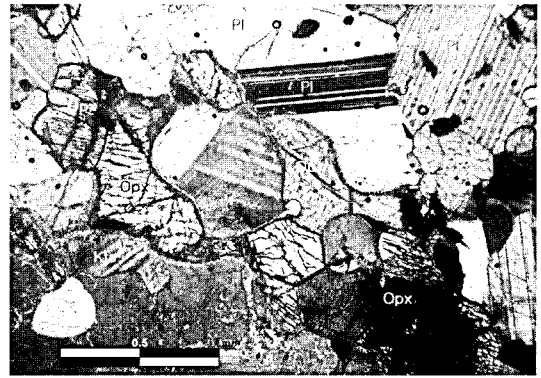


Fig. 6. Photomicrograph of orthopyroxene with polygonal texture (under crossed polars).

달하고, 일부는 결정의 전체가 앤소필라이트로 교대된 경우도 있으며(Fig. 5), 현저한 다각형(polygonal) 조직을 보임으로써 고온의 변성작용이 있었음을 알려준다(Fig. 6). 석류석은 거정의 결정부터 세립까지 결정의 크기가 다양하다. 또한 심하게 균열이 발달된 경우가 많고 일부는 내부에 석영이나 흑운모를 포함하며, 균열부를 따라 이차적 광물이 교대되어 있다. 대체로 사방휘석의 함량이 증가하면 석류석은 다소 감소하는 경향이 있다.

차노카이트의 광물 화학

차노카이트의 주 구성광물에 대한 주성분과 미량성분의 화학분석을 기초과학지원연구원(KBSI) 대전분소의 전자현미분석기를 이용하여 실시하였다. 시료는 지질도상에서의 위치, 공생 광물조합, 변질, 그리고 풍화정도 등을 고려하여 선별하였으며, 연마 편을 제작하여 사용하였다. 분석 시 측정강도를 얻기 위한 가속전압은 10 kV이었으며, 빔 직경은 2 μm, 가속 전류는 20 nA로 설정하였다.

사방휘석

사방휘석은 두 개의 박편시료(G58, G45)에 대해 분석을 실시하였으며, 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 사방휘석에서 성분상 누대구조의 형성 여부를 알아보기 위하여 중심부에서 주변부까지 횡단선을 따라 탐침 분석하였다. 그 결과 뚜렷한 누대구조의 모습을 볼 수가 없었으며, 용리의 증거도 찾아 볼 수가 없었다. 연구지역 내 차노카이트에 나타나는 사방휘석은 대체로 자형의 다각형 구조를 가지며, 일부는

Table 1. Representative composition of orthopyroxene of the charnockite in the study area

No.	G58			G45			
	An. Point	rim	core	rim	rim	core	rim
SiO ₂		47.44	47.62	47.59	47.88	48.00	47.68
Al ₂ O ₃		0.58	0.57	0.46	0.81	0.82	0.69
TiO ₂		0.13	0.13	0.13	0.10	0.11	0.12
FeO		42.68	43.41	43.18	40.61	40.01	41.37
MgO		7.43	7.48	7.82	9.10	9.13	8.92
MnO		0.70	0.57	0.79	0.52	0.54	0.56
Na ₂ O		0.07	0.04	0.06	0.01	0.01	0.00
CaO		0.86	0.77	0.50	0.84	0.70	0.65
K ₂ O		0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.00
Total		99.89	100.61	100.57	99.86	99.35	100.00

Cations on the basis of 6 oxygens						
Si	1.970	1.975	1.973	1.972	1.981	1.969
Al	0.028	0.028	0.023	0.039	0.040	0.034
Ti	0.004	0.004	0.004	0.003	0.004	0.004
Fe	1.468	1.485	1.477	1.380	1.362	1.409
Mg	0.462	0.463	0.484	0.559	0.562	0.549
Mn	0.025	0.020	0.028	0.018	0.019	0.019
Na	0.003	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000
Ca	0.039	0.034	0.022	0.037	0.031	0.029
K	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000
Total	3.998	4.012	4.015	4.009	4.000	4.013

XMg	0.235	0.233	0.244	0.283	0.287	0.276
XCa	0.020	0.017	0.011	0.019	0.016	0.015
XFe	0.751	0.755	0.743	0.705	0.701	0.712

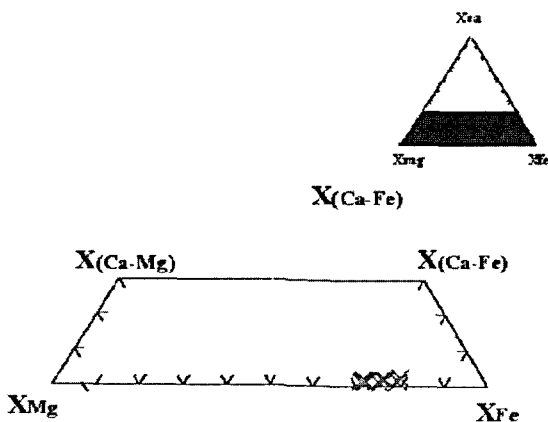


Fig. 7. Compositions of orthopyroxene plotted in triangular diagram of Wo-En-Fs system.

주변부를 따라 엔소필라이트로 교대되어 있다. Wo-En-Fs의 확장된 3성분 도표계에 점시하면 Mg-Fe 고용체의 사방휘석에 도시된다(Fig. 7). 공생 광물조합으로는 석영 + 사장석 + K-장석 + 사방휘석(±흑운모

±석류석±금속광물)이다.

석류석

연구지역의 차노카이트에 나타나는 석류석은 세립에서 조립까지 그 크기가 다양하다. 일부 결정은 미약한 누대구조를 보인다. 석류석에 대한 분석(S3과 G68) 결과를 Table 2에 나타내었다. 차노카이트를 구성하는 석류석 결정에 대한 성분상의 누대구조의 형성 여부를 알아보기 위하여 시료(G68)를 선정하여 각 성분의 함량 값을 도시하였다(Fig. 8). 그 결과 알만던 성분은 중심에서 주변부로 갈수록 감소하며 그로슬라 조성은 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 이와 같이 성분상의 누대구조를 보이는 결정은 암석의 형성 초기부터 계속적으로 성장한 것으로 사료된다.

차노카이트의 암석화학

주 원소

주성분 원소의 분석은 한국 기초과학지원연구소 서

Table 2. Representative composition of garnet of the charnockite in the study area

No.	S3			G68			
	An. Point	rim	core	rim	rim	core	rim
SiO ₂		36.84	36.83	37.38	36.97	35.05	37.21
Al ₂ O ₃		21.21	20.87	21.40	20.60	19.63	20.52
TiO ₂		0.00	0.01	0.03	0.12	0.13	0.05
FeO		36.83	36.77	32.56	33.06	33.37	32.75
MnO		0.79	0.58	0.68	0.84	0.85	0.89
MgO		3.28	3.20	5.22	1.34	1.71	1.31
Na ₂ O		1.53	1.43	2.24	7017	5.91	7.48
CaO		0.04	0.01	0.03	0.05	0.01	0.01
K ₂ O		0.00	0.00	0.00	0.00	1.45	0.01
Total		100.52	99.70	99.54	100.15	98.11	100.23
Cations on the basis of 24 oxygens							
Si		5.925	5.967	5.954	5.969	5.864	5.997
Al		4.022	3.986	4.019	3.921	3.872	3.899
Ti		0.000	0.001	0.004	0.015	0.016	0.006
Fe ²⁺		4.954	4.982	4.338	4.464	4.669	4.414
Mn		0.108	0.080	0.092	0.115	0.120	0.122
Mg		0.786	0.773	1.239	0.322	0.426	0.315
Ca		0.264	0.248	0.382	1.240	1.059	1.292
Na		0.012	0.003	0.009	0.016	0.003	0.003
K		0.000	0.000	0.000	0.000	0.309	0.002
Total		16.071	16.040	16.037	16.062	16.338	16.050
Xalm		0.811	0.819	0.717	0.727	0.744	0.719
Xpy		0.129	0.127	0.205	0.052	0.068	0.051
Xgr		0.043	0.041	0.063	0.202	0.169	0.210
Xsp		0.018	0.013	0.015	0.19	0.019	0.020

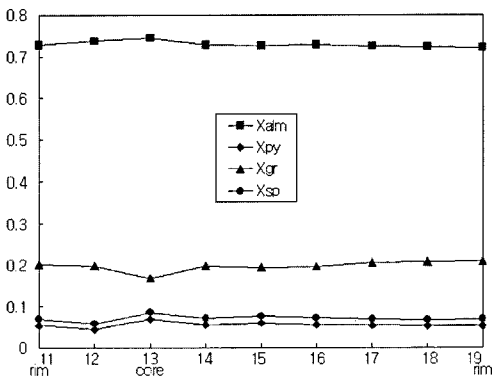


Fig. 8. Compositional zoning profile of garnet (G68) of the charnockitic rock in the study area.

울분소의 Philips사의 PW 2404 X선 형광분광분석기를 이용하였다. 분석된 주성분 원소들의 산화물 형태의 화학조성과 분석치를 토대로 계산된 CIPW 노움 값을 Table 3에 나타내었으며, 주위 편마암류와 암석 화학적 특징을 비교하기 위하여 기존 문헌의 분석자

료(Appendix 1)를 활용하였다. 차노카이트의 SiO₂ 함량은 전체 성분의 61%에서 65%의 범위를 보인 반면 주변의 편마암류는 67%에서 76%까지의 산성암 범위에 해당하며, 각섬석 편마암과 회장암질암은 전술한 편마암류나 차노카이트에 비해 현저하게 낮은 SiO₂ 함량값을 보여주고 있다(Appendix 1). 분석치로부터 계산된 노움 값을 O'Connor(1965)의 노움 Ab-An-Or 성분도에 도시하면 회장섬록암과 아다멜라이트 영역에(Fig. 9-A), Cox et al.(1979)이 제시한 총알칼리-실리카(TAS) 도표에서는 섬록암과 회장섬록암의 경계에 도시되며(Fig. 9-B) 전체적으로 주변의 편마암류와 함께 연속적인 경향성을 보이고 있다. 차노카이트와 편마암류에 대하여 Harker의 성분 변화도에서 주성분원소의 전체적인 변화경향을 살펴보았다(Fig. 10). 이 도표상에서 차노카이트는 각섬석 편마암, 회장암질암을 제외한 나머지 편마암류들과 SiO₂ 변화에 따른 주성분 산화물의 증감에 있어서 거의 체계적인 변화경향을 보이면서 증가 또는 감소하고

Table 3. Major element composition and CIPW normative mineral composition of the charnockite in the study area

sample	S1	D12	G45	G68	J13	G58	G69
SiO ₂	63.25	61.56	63.50	65.01	61.42	62.32	60.64
TiO ₂	1.17	1.34	1.12	0.98	1.46	1.39	1.37
Al ₂ O ₃	14.64	13.90	14.95	13.07	12.89	14.45	14.65
Fe ₂ O ₃ ^T	9.11	11.61	9.17	9.97	13.97	9.91	11.51
MnO	0.09	0.10	0.08	0.10	0.12	0.11	0.12
MgO	1.41	1.50	1.71	1.18	1.66	1.34	1.44
CaO	4.30	4.77	2.92	3.46	3.39	4.55	4.91
Na ₂ O	2.20	2.09	1.98	1.63	2.11	2.02	1.90
K ₂ O	3.05	2.23	4.09	3.81	2.20	3.22	2.47
P ₂ O ₅	0.24	0.28	0.19	0.28	0.22	0.28	0.24
L.O.I	0.50	-0.24	0.23	0.00	0.20	-0.04	0.08
Total	99.46	99.38	99.71	99.49	99.44	99.59	99.25
Q	25.9	26.3	27.2	30.1	27.9	24.9	25.3
Or	18.2	13.3	24.3	22.6	13.2	19.2	14.8
Ab	18.8	17.9	16.8	13.8	18.1	17.2	16.3
An	20.1	22.2	13.4	15.6	15.7	21.0	23.3
C	0.4	-	2.3	0.5	1.3	-	0.4
Di	-	0.1	-	-	-	0.1	-
Hy	9.0	10.9	6.4	8.4	13.1	9.0	10.7
Mt	4.6	5.9	6.7	6.1	7.2	5.1	5.9
Il	2.2	2.5	2.1	1.8	2.8	2.6	2.6
Ap	0.5	0.6	0.4	0.6	0.5	0.6	0.5

있다. 한편 각섬석 편마암과 회장암질암은 Harker의 성분 변화도에서 차노카이트를 비롯한 그 외의 편마암류들과는 다른 영역에 도시되어 하나의 균을 형성하는 모습을 보여준다.

미량 원소와 희토류 원소

차노카이트에 대한 미량 원소와 희토류 원소에 대한 분석은 한국기초과학지원연구원의 ICP-Mass Spectrometer를 이용하였으며, 분석의 정확성을 위해서 각 시료에 대해 3회씩분석한 평균치를 이용하였다. 차노카이트의 미량 원소와 희토류 원소의 분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 또한 차노카이트의 분석치와 비교하기 위하여 기존 문헌에 의한 주위 편마암류의 분석치를 이용하였다(Appendix 2). 미량 원소의 값을 초기 맨틀(primitive mantle) 값에 표준화한 거미그림에 도시해 본 결과 차노카이트는 회장암질암과 각섬석 편마암의 경향과 뚜렷이 구분되는 반면에, 그 외의 편마암류와는 유사한 경향을 보이고 있다(Fig. 12). 또한 회장암질암과 각섬석 편마암은 차노카이트를 비롯한 다른 암석들에 비해 미량 원소 함량에서 상당한 결핍 현상을 보이면서 부화 정도는 비슷한 양상을 나타낸다. 그리고 회장암과 각섬석 편

마암은 모두 현저한 Sr, Eu 정(positive) 이상을 보인다. 이는 사장석의 부화에 기인한 것으로 해석된다. CI 콘드라이트 값(Sun and McDonough, 1989)으로 표준화한 희토류 원소 분포패턴을 고찰해 본 결과, 희토류 원소의 패턴에서도 회장암질암과 각섬석 편마암은 차노카이트와 그 경향성에 있어서 차이를 보이며, 그 외 편마암류는 차노카이트와 유사한 경향을 보이고 있다(Fig. 13). 이상에서 살펴본 바와 같이, 미량 성분의 불호정정도, 희토류 원소의 분포 경향에서 차노카이트가 회장암, 각섬석 편마암과는 상당부분 변화 경향을 달리하고 있으며, 흑운모 편마암, 흑운모각섬석 편마암, 그라노블라스타이트, 우백질 화강편마암과는 유사한 경향성을 보인다.

변성 작용

연구지역의 편마암류들은 초기의 정점 변성작용으로서 그레놀라이트상 내지 상부 앵피블라이트상 변성작용과 각섬석류를 생성하는 2차 후퇴변성작용이 인지되고, 압쇄작용과 열수변성작용에 의해 녹니석과 백운모를 생성하는 3차의 변성작용을 거친 것으로 보고되고 있다(이상만, 1980; 이상만 외, 1981; 이상원, 1984a, 1984b, 1985). 초기의 정점 변성작용에서

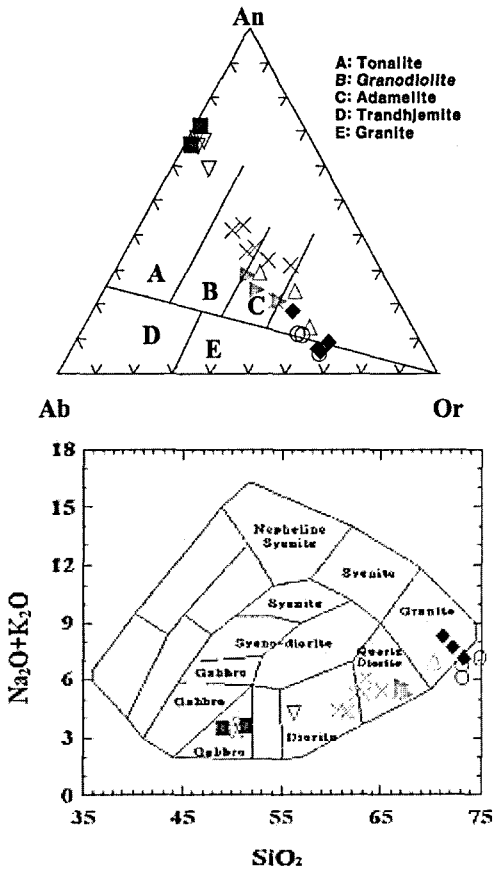


Fig. 9. (A) Norm An-Ab-Or ternary diagram (from O'Connor, 1965) and (B) plots of composition in the total alkali vs. SiO₂ diagram (from Cox et al., 1987). Symbols are the same as those in the appendix 1 and crosses represent charnockite.

평형을 이룬 광물군은 사방휘석-석류석-K-장석-사장석(±흑운모±자철석±티탄철석±황철석)으로 확인된다. 2차 후퇴변성작용에서 안정한 광물군은 사방휘석-석류석-흑운모-앤쏘필라이트-K-장석-사장석-석영(±자철석±티탄철석±황철석)이다. 3차 변성작용시의 광물군은 녹니석-백운모-흑운모-각섬석-K-장석-사장석-석영±자철석±티탄철석±황철석으로, 압쇄작용과 열수변성작용에 의해 사방휘석이 녹색의 각섬석으로 후퇴변성된 양상을 보인다. 이는 녹염석-앤쏘필라이트 상 내지 녹색편암상에 이르는 후퇴변성작용이었음을 지시한다

지질 온도-압력계의 적용

차노카이트의 변성온도와 압력을 추정하기 위하여

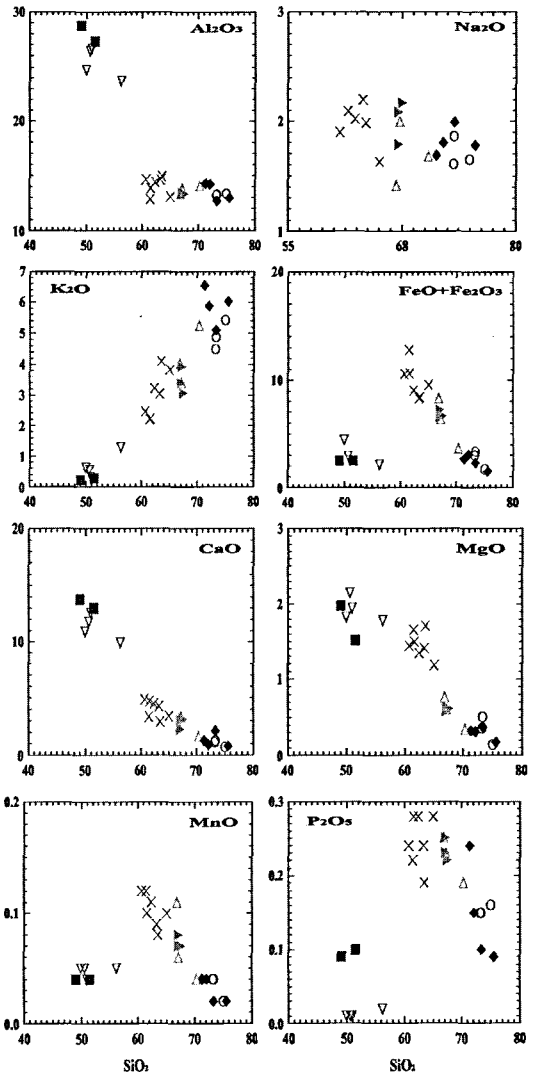


Fig. 10. Harker variation diagrams of major oxides in charnockites and gneisses in the study area. Symbols are the same as those in the Fig. 9.

Sen and Bhattacharya(1984)의 사방휘석-석류석 지온계와 Ghent(1976)에 의한 사장석-석류석 지온계를 이용하였다. 상기의 지온계는 그레놀라이트상에 해당하는 석영-장석질과 염기성 암체에서 사방휘석과 석류석의 Mg²⁺-Fe²⁺의 교환반응을 이용한 것으로서, 이때 사방휘석 용액은 그레놀라이트상에 대한 온도범위에서 이상적이라고 간주되었으며, 석류석에 대해서는 3성분의 대칭용액 모델이 채택되었다. 이 지온계의 Mg 단성분에 대한 엔트로피와 엔탈피의 값들은 이미 발표된 열화학적 자료들로부터 주어졌다. 본 역에서

Table 4. Trace element and rare earth element abundances (ppm) of the charnockite in the study area

sample	S1	D12	G45	G68	J13	G58	G69
Ba	623.2	835.0	1020.3	784.0	428.5	727.9	839.0
Rb	109.0	66.8	226.7	159.7	129.3	119.6	76.1
Sr	-	193.6	183.7	134.8	90.9	163.7	185.2
Cs	0.4	0.4	1.2	1.4	4.6	0.5	0.5
Ga	55.6	62.7	117.8	65.3	50.3	55.1	60.2
Nb	1.8	4.6	1.7	2.7	1.2	3.9	5.2
Hf	0.5	0.6	0.7	0.8	2.2	0.5	0.6
Zr	9.6	12.5	13.2	20.1	48.9	10.5	12.1
Y	32.0	8.7	28.7	32.5	212.9	32.7	35.5
Th	29.9	4.6	14.6	3.0	21.2	1.1	2.1
U	0.5	0.3	0.4	0.6	1.2	0.5	0.3
Cr	4.6	1.3	38.8	0.0	51.3	29.0	6.1
Ni	17.7	20.6	25.7	6.4	58.6	32.1	19.8
Co	94.2	124.1	82.1	95.0	156.2	88.6	103.8
Sc	15.1	15.0	11.0	12.3	25.4	15.0	25.1
Cu	35.7	44.1	39.4	32.5	79.2	154.5	50.2
Pb	47.6	45.2	68.3	49.7	30.5	62.0	42.3
Zn	109.9	160.0	133.6	156.5	178.9	128.5	137.5
La	101.6	65.8	61.9	56.1	48.6	35.6	41.8
Ce	201.4	120.1	118.8	109.3	83.1	68.0	78.5
Pr	22.6	14.6	13.7	14.2	9.2	7.9	10.3
Nd	82.6	52.8	47.0	48.6	29.0	32.5	35.0
Sm	14.1	8.6	8.8	9.4	6.5	7.0	6.9
Eu	2.0	3.1	2.2	2.2	1.4	2.2	2.7
Gd	11.9	5.6	7.9	8.6	14.1	7.4	7.0
Tb	1.5	0.6	1.1	1.2	3.1	1.1	1.0
Dy	7.8	2.5	6.1	6.6	28.1	6.5	6.6
Ho	1.2	0.3	1.1	1.2	7.8	1.3	1.3
Er	3.1	1.0	3.1	3.5	29.2	3.9	4.0
Tm	0.3	0.1	0.4	0.5	4.8	0.5	0.6
Yb	2.3	1.0	3.0	3.2	33.5	4.0	4.1
Lu	0.3	0.1	0.4	0.4	4.9	0.6	0.6

의 온도 추정시 기준 압력으로는 기존문헌(김동연, 1999)에서 밝혀진 압력과 본 연구의 사장석-석류석 지압계(Ghent, 1976)에 의해 계산된 최고압력인 7 kbar를 적용하였다. 위의 지온계를 사용하여, 본 역의 차노카이트로부터 얻어진 변성온도 조건은, 석류석의 중심부근의 성분을 사용하였을 경우 761°C 내외의 정점 변성온도를 보이며, 주변부의 성분을 사용하였을 경우 653°C 내외의 변성온도를 보여준다 (Table 5). 이러한 계산 결과는 연구지역이 초기의 고 변성작용(그래놀라이트상)이 일어난 후 저변성작용에 의해 재평형이 이루어졌음을 암시한다. 연구지역의 암석에 대해 적용한 지압계는 Ghent(1976)에 의한 열역학적 자료를 적용한 것이다. 이 방법은 공생하는 석류석과 사장석 사이의 Ca의 분포에 기초한다. 이때

석류석의 그로슬라 성분은 모든 Ca을 그로슬라에 할당하여 계산되어졌는데, 따라서 이 방법은 최대 압력 값을 지시한다(Ghent, 1976). 그로슬라는 석류석에서 하나의 단성분을 이루고 있으며, 아노르사이트는 사장석의 한 단성분인데, 일반적으로는 알바이트가 풍부하다. 이 지온계에 대한 표현식은 다음과 같이 두 광물내에서 이들 성분의 활동도 항으로써 기술되어질 수 있다.

$$\ln \frac{a_{Gt}^{Gt}}{(a_{Anor}^{Pl})^3} = -\left(\frac{62,640}{R}\right)\frac{1}{T} + \frac{160.76}{R} - (P - 10^5) \times \frac{24.07 \times 10^{-5}}{RT}$$

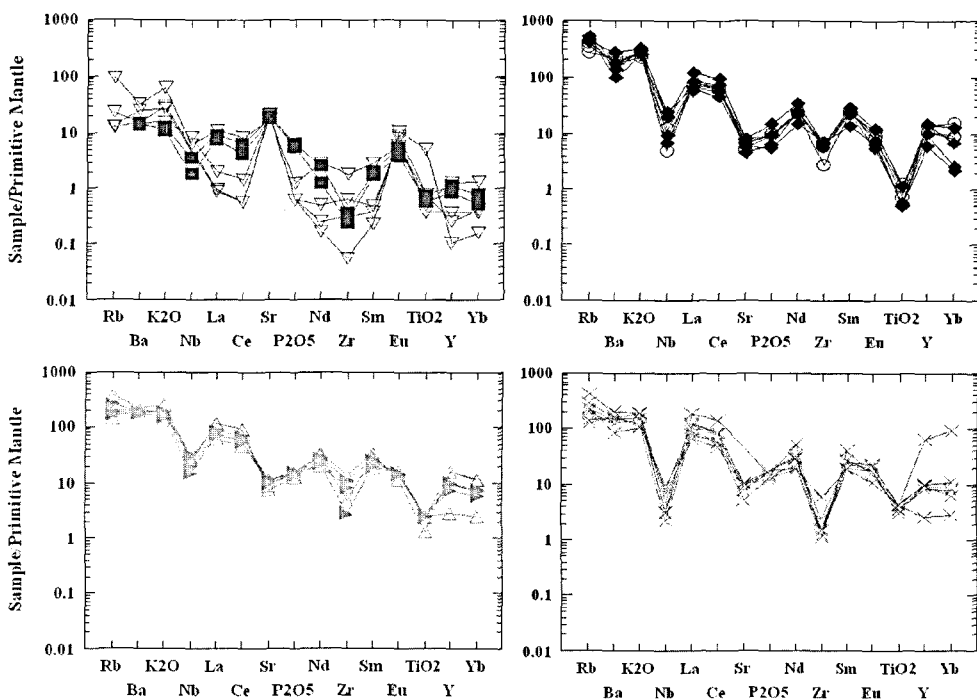


Fig. 11. Spider diagrams of primitive mantle-normalized trace element abundances for the rocks in the study area. Symbols are the same as those in the Fig. 9. (A) anorthositic rock and hornblende gneiss (B) leucocratic granite gneiss and granoblastite (C) biotite gneiss and biotite-hornblende gneiss (D) charnockite

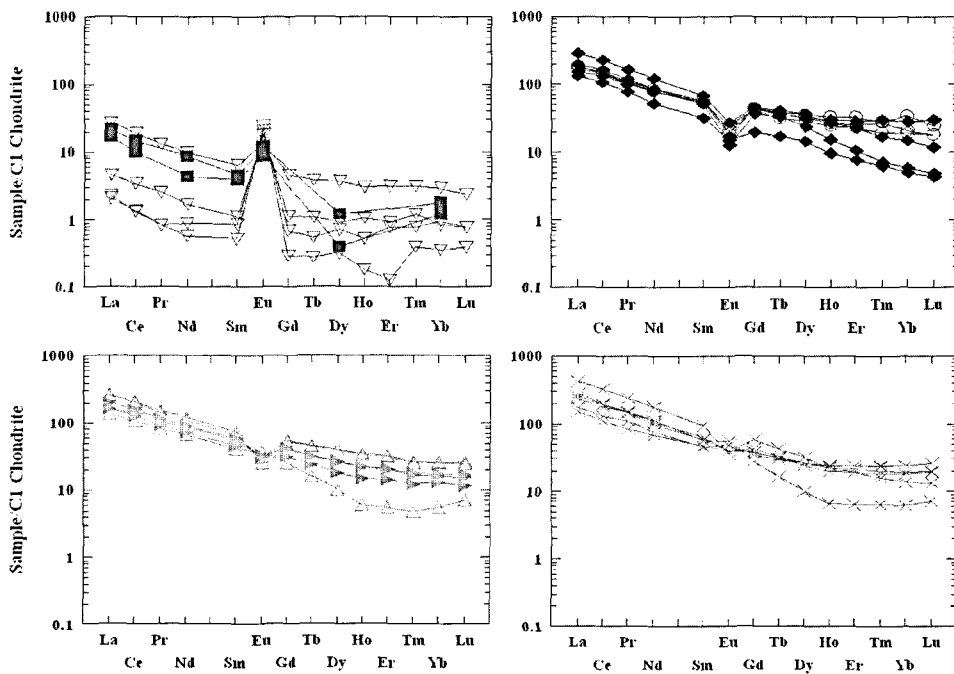


Fig. 12. Chondrite-normalized rare earth element abundance patterns for the rocks in the study area. Symbols are the same as those in the Fig. 9. (A) anorthositic rock and hornblende gneiss (B) leucocratic granite gneiss and granoblastite (C) biotite gneiss and biotite-hornblende gneiss (D) charnockite

Table 5. Estimated metamorphic temperatures (°C) calculated from orthopyroxene-garnet geothermometer (G68) of the charnockite in the study area

Point No	9 (rim)	11	13 (core)	14	15	16	17	18	19 (rim)	
Gt	X _{Ca}	0.206	0.202	0.169	0.198	0.194	0.196	0.206	0.207	0.210
	X _{Fe}	0.723	0.727	0.744	0.728	0.726	0.727	0.723	0.722	0.719
	X _{Mg}	0.050	0.052	0.068	0.055	0.058	0.055	0.052	0.051	0.051
	(X _{Fe} /X _{Mg})	14.460	13.981	10.941	13.236	12.517	13.218	13.904	14.157	14.098
Opx	X _{Fe}	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789	0.789
	X _{Mg}	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199	0.199
	(X _{Fe} /X _{Mg})	3.963	3.963	3.963	3.963	3.963	3.963	3.963	3.963	3.963
K _D	0.280	0.257	0.322	0.300	0.308	0.292	0.285	0.280	0.281	
ln(K _D)	-1.275	-1.362	-1.138	-1.205	-1.178	-1.230	-1.255	-1.273	-1.269	
T(°C)	698.3	653.5	761.3	732.3	745.7	717.2	708.4	699.2	702.8	

Table 6. Estimated metamorphic pressure (Kbar) calculated from plagioclase-garnet geobarometer (G68) of the charnockite in the study area.

Point No	10 (rim)	11	12	13 (core)	15	16	17	18	19 (rim)	
Gt	X _{gr}	0.207	0.202	0.198	0.169	0.194	0.196	0.206	0.207	0.21
	Ca	1.94	1.94	1.755	1.755	1.94	1.94	1.755	1.94	1.755
Pl	Na	2.116	2.116	2.236	2.236	2.116	2.116	2.236	2.116	2.236
	X _{an}	0.48	0.48	0.44	0.44	0.48	0.48	0.44	0.48	0.44
X _{gr} /X _{an}	0.43	0.42	0.45	0.38	0.41	0.41	0.47	0.43	0.48	
P(kbar)	6.6	6.7	6.8	6.9	7.0	6.9	6.5	6.6	6.4	

위의 반응식은 흑운모-석류석 교환 방정식에 비해 좀 더 정밀한 값을 얻을 수가 있으며, 따라서 이 반응식은 훌륭한 지압계를 구성하고 있다고 볼 수 있다. 기존의 열역학적 실험 결과에 따르면, 활동도의 비는 온도에 강하게 의존된다. 따라서 본 지압계를 사용하기 위하여 위에서 독립적으로 알아낸 지온계 값들을 적용한다. 석류석내의 그로슬라와 사장석내의 아노르사이트의 활동도 값을 고려하기 위하여

$$a_{gross}^{Gt} = (X_{gross}^{Gt})^3, a_{anor}^{Pl} = X_{anor}^{Pl}$$

가정을 하면, 위 표현식의 좌변은 다음과 같이 기술되어진다.

$$\ln \frac{a_{gross}^{Gt}}{(a_{anor}^{Pl})^3} = \ln \frac{(X_{gross}^{Gt})^3}{(X_{anor}^{Pl})^3}$$

이때 적용한 온도값은 석류석의 중심부에서의 761°C, 주변부에서의 653°C의 변성온도 값을 사용하였다. 위 지압계를 적용해 본 결과, 석류석 중심부의 성분인 경우 약 7.0 kbar, 주변부 성분인 경우는 약 6.4 kb의 압력조건을 보이고 있다(Table 6).

요약 및 결론

연구지역은 소백산 육괴의 남서부에 해당하는 곳으로 다양한 편마암류들이 지리산 편마암복합체를 이루고 있을 뿐만 아니라 국내의 주요 회장암질암이 분포하며 또한 차노카이트가 산출되는 지질학적으로 중요한 암석구이다. 산청지역의 차노카이트는 일반 회장암질암에 비해 암색을 띠고, 사방회석과 석류석을 함유하는 석영-장석질암이다. 일부 지역에서 엽리가 발달하나 대체로 미약한 편이며 산상의 특징, 구성광물의 종류와 암석의 변형 정도 등에 의해 암상의 변화를 보인다. 전체적으로 구성광물의 파쇄 변질이 심한 것으로 보아 후기의 단층작용과 관련된 압쇄작용과 동력변성작용의 영향을 받았을 것으로 사료된다. 현미경 관찰 결과, 주 구성광물은 석영, 사장석, K-장석, 사방회석이며, 흑운모, 석류석, 앤썸필라이트 등을 부분적으로 포함한다. 주성분 산화물들의 변화 경향을 살펴본 결과, 각섬석 편마암, 회장암을 제외한 주위의 편마암류들과 거의 동일한 체계성을 보였다. 미량 원소와 희토류 원소의 분화경향, 불호정성도, 그리고 함량도를 분석해 본 결과, 각섬석 편마암

과 회장질암류와는 달리 현저한 부의 Sr, Eu 이상을 보였으며, Eu의 함량이 편마암류에 비해 높았다. 차노카이트의 변성조건을 고찰하기 위하여 사방회석-석류석 지온계와 사장석-석류석 지압계를 적용해 본 결과 석류석의 중심부의 경우 761°C 내외의 온도와 약 7 kbar의 압력 조건, 주변부의 경우 653°C 내외의 온도와 약 6.4 kbar의 압력조건을 지시하였다. 이는 차노카이트가 초기의 고변성작용을 받은 후 보다 후기의 저변성작용에 의해 재평형이 이루어졌음을 암시한다.

참고 문헌

- 김동연, 1999, 지리산 동부지역에 분포하는 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학. 부경대학교 대학원 석사학위 논문, 79 p.
- 김옥준, 홍만섭, 박희인, 박양대, 김기태, 윤선, 1964, 산청 지질도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 22 p.
- 김옥준, 홍만섭, 윤석규, 박희인, 박양대, 김기태, 이하영, 윤선, 1964, 운봉 지질도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 19 p.
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청) 지역의 변성니질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16 (1), 79 p.
- 이상만, 나기창, 이상현, 박배영, 이상원, 1981, 소백산 육괴(동남부)의 변성암 복합체에 대한 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 17 (3), 169-188.
- 이상원, 1984a, 소백산 육괴 서남부(구례-곡성-남원)의 편마암 복합체의 변성작용에 관한 연구. 부산대학교 사대논문집, 8, 285-303.
- 이상원, 1984b, 지리산지역 편마암류의 변성작용에 관한 연구. 부산대학교 사대논문집, 10, 229-255.
- 이상원, 1985, 소백산 육괴 서남부의 편마암 복합체의 변성작용에 관한 연구. 부산대학교 사대 논문집, 10, 229-225.
- 이상원, 1997, 소백산육괴 서남부의 변성암복합체에 대한 광역변성작용과 동위원소연대에 관한 연구. 늘원문화재단, 학술연구지원 연구보고서, 46 p.
- 최유구, 정창희, 이대성, 김서운, 김수진, 1964, 단성 지질도폭(1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 28 p.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J. 1979, The interpretation of igneous rocks and associations. Transactions Royal Society of Edinburgh, Earth Science, 73, 135-149.
- DemaiFFE, D. and Hertogen, J., 1981, Rare earth element geochemistry and strontium isotopic composition of a massif-type anorthositic- charnockitic body: the Hydra massif (Rogaland, SW Norway). Geochimica et Cosmochimica Acta, 45, 1545-1561.
- Ghent, E.D., 1976, Pagioclase-garnet-Al₂SiO₅-quartz: a potential geobarometer-geothermometer. American Mineralogist, 61, 710-714.
- Holland, T.H., 1893, The petrology of Job Charnock's tombstone. Journal of Asiatic Society of Bengal, 62, 162-164.
- Newton, R. C., 1992, An overview of charnockite. Precambrian Research, 55, 399-405.
- O'Connor, J.T., 1965, A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratio. U.S. Geological Survey Professional Paper, 528B, 79-84.
- Pichamuthu, C.S., 1969, Nomenclature of charnockites. Indian Mineralogy, 10, 23-25.
- Ridley, J., 1992, On the origins and tectonic significance of the charnockite suite of the Archaean Limpopo Belt, northern marginal zone, Zimbabwe. Precambrian Research, 55, 407-427.
- Sen, S.K. and Bhattacharya, A., 1984, An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites. Contribution to Mineralogy and Petrology, 88, 64-71.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes in magmatism in the ocean basins. Geological Society, Special Publication, 42, 313-345.

2003년 12월 2일 원고 접수
2004년 3월 18일 수정원고 접수
2004년 3월 20일 원고 채택

Appendix 1. Major element composition and calculated CIPW normative mineral composition of gneisses around the study area

sample	J4	J5	J15	J7-2	J24	J28	102	112-2	118	121
SiO ₂	66.84	67.19	70.33	73.25	74.93	73.17	71.25	73.30	75.52	72.05
TiO ₂	0.76	0.79	0.41	0.40	0.23	0.36	0.37	0.18	0.17	0.16
Al ₂ O ₃	13.36	13.79	14.12	13.30	13.40	13.24	14.30	12.74	13.03	14.25
Fe ₂ O ₃ *	9.09	7.03	4.05	3.73	1.88	3.29	2.91	2.52	1.65	3.39
MnO	0.11	0.06	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.02	0.04
MgO	0.76	0.60	0.35	0.51	0.14	0.36	0.32	0.38	0.17	0.31
CaO	2.54	3.37	1.63	1.33	0.76	1.17	1.31	2.19	0.81	0.93
Na ₂ O	1.42	2.00	1.68	1.86	1.65	1.61	1.69	1.99	1.78	1.80
K ₂ O	4.01	3.40	5.24	4.86	5.43	4.48	6.55	5.09	6.01	5.88
P ₂ O ₅	0.25	0.23	0.19	0.15	0.16	0.15	0.24	0.10	0.09	0.15
Total	99.92	99.57	99.44	100.18	99.49	99.12	99.43	98.69	99.72	99.42
Q	35.54	34.12	36.84	40.48	43.58	44.64	33.76	37.49	40.54	36.90
Or	24.06	20.51	31.69	28.97	32.61	27.12	39.20	30.60	35.85	35.21
Ab	12.17	17.24	14.52	15.84	14.16	13.93	14.45	17.09	15.17	15.40
An	11.30	15.69	7.13	5.77	2.88	5.04	5.15	10.45	3.52	3.78
C	2.62	1.19	3.18	2.89	3.81	4.01	2.57	0.17	2.32	3.58
Di	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	6.95	5.05	3.01	2.24	0.80	1.78	1.48	1.78	0.87	2.00
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	5.35	4.16	2.40	2.72	1.38	2.44	2.13	1.86	1.21	2.49
He	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Il	1.46	1.53	0.80	0.77	0.44	0.70	0.71	0.35	0.33	0.31
Ap	0.55	0.51	0.42	0.33	0.35	0.34	0.53	0.22	0.20	0.33
symbol	△	△	△	○	○	○	◆	◆	◆	◆
sample	J2-2	J18-2	J16	J54	J39	J42	J43	An1	An2	sample
SiO ₂	49.97	56.21	50.60	50.97	67.05	67.09	67.47	51.44	49.03	SiO ₂
TiO ₂	1.66	0.17	0.25	0.12	0.79	0.85	0.78	0.24	0.18	TiO ₂
Al ₂ O ₃	24.77	23.68	26.39	26.63	13.42	13.41	13.39	27.26	28.71	Al ₂ O ₃
Fe ₂ O ₃ *	4.87	2.37	3.21	2.75	7.26	7.95	7.28	2.76	2.73	Fe ₂ O ₃ *
MnO	0.05	0.05	0.05	0.04	0.07	0.08	0.07	0.04	0.04	MnO
MgO	1.83	1.79	2.15	1.95	0.58	0.64	0.61	1.52	1.98	MgO
CaO	10.91	9.87	11.77	12.52	3.06	2.31	3.17	12.98	13.73	CaO
Na ₂ O	2.68	2.93	3.08	3.02	2.08	1.79	2.17	3.35	3.25	Na ₂ O
K ₂ O	0.63	1.31	0.56	0.33	3.39	3.91	3.06	0.27	0.22	K ₂ O
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.01	0.23	0.25	0.22	0.10	0.09	P ₂ O ₅
Total	99.14	99.51	99.36	99.08	99.93	99.20	99.16	99.96	99.96	Total
Q	4.79	9.97	1.05	1.96	34.36	35.41	35.12	0.97	0.00	Q
Or	3.84	7.89	3.39	1.99	20.57	23.65	18.51	1.60	1.30	Or
Ab	23.35	25.21	26.61	26.01	18.03	15.47	18.76	28.39	24.19	Ab
An	55.29	48.38	57.72	59.18	14.20	10.22	14.77	58.63	63.19	An
C	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	2.61	1.23	0.00	0.00	C
Di	0.40	0.53	1.60	2.39	0.00	0.00	0.00	4.41	3.76	Di
Hy	7.59	6.01	8.18	6.54	5.20	5.72	5.29	4.52	0.00	Hy
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.42	Ol
Mt	1.46	1.05	0.95	0.81	4.32	4.71	4.32	0.80	0.79	Mt
He	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	He
Il	3.25	0.33	0.49	0.23	1.54	1.65	1.52	0.46	0.34	Il
Ap	0.02	0.04	0.02	0.02	0.52	0.56	0.49	0.22	0.20	Ap
symbol	▽	▽	▽	▽	▶	▶	▶	■	■	■

△: Biotite gneiss ○: Leucocratic granite gneiss
 ◆: Granoblastite ▽: Hornblende gneiss
 ▶: Biotite-hornblende gneiss ■: Anorthositic rocks

Appendix 2. Trace element and rare earth element abundance(ppm) of gneisses around the study area

sample	J4	J5	J15	J7-2	J24	J28	102	112-2	118	121
Ba	975.90	1101.0	1086.0	1089.4	905.10	900.00	1374.0	512.40	700.70	906.30
Rb	114.6	76.10	206.8	138.4	211.8	183.5	219.6	242.3	247.1	283.9
Sr	155.4	198.3	129.2	134.1	115.6	90.40	140.9	79.50	100.6	116.5
Cs	0.75	0.35	0.91	0.64	0.91	0.60	1.05	0.57	0.95	1.43
Ga	41.00	41.50	42.00	38.50	32.30	32.80	39.80	25.20	27.20	37.60
Ta	2.80	1.60	1.50		0.56	1.83	8.29		1.88	1.10
Nb	13.75	16.11	14.96	2.76	6.64	10.91	11.30	3.80	5.35	13.43
Hf	0.92	2.28	3.70	0.59	1.57	1.69	1.56	1.28	1.57	1.65
Zr	38.71	70.34	115.66	23.10	48.09	56.72	54.17	48.45	59.36	57.21
Y	55.24	9.86	54.00	36.70	46.43	35.92	47.52	32.96	20.07	49.82
Th	9.86	0.64	19.78	8.27	16.50	16.68	22.99	19.31	11.24	13.65
U	0.26	0.22	0.79	0.28	1.22	0.91	0.87	0.73	1.20	2.06
Cr	22.96	18.57	15.42	21.40	7.28	11.88	8.50	8.21	9.54	9.87
Ni	4.09	3.53	2.03	3.76	2.39	1.82			0.47	
Co	109.20	201.50	162.90	249.60	311.60	534.80	213.00	320.90	500.80	321.70
Sc	19.92	12.58	6.74	7.14	2.97	4.97	7.24	2.50	1.93	5.88
Cu	1.47	1.68	4.49		10.11	0.93	0.52	1.06	0.82	0.85
Pb	26.85	22.94	27.81	31.20	34.00	31.97	40.58	28.81	28.60	27.14
Zn	127.20	124.90	65.30	54.00	56.00	70.90	27.20	36.20	22.30	63.20
La	63.65	33.15	61.72	43.29	39.97	42.28	67.54	45.74	31.58	35.67
Ce	123.60	65.41	128.27	85.17	85.85	92.29	139.19	100.63	65.07	81.02
Pr	13.39	7.74	14.50	9.59	10.19	10.36	15.25	11.16	7.17	9.36
Nd	50.67	31.28	55.59	36.49	38.80	39.71	55.51	39.25	24.17	35.06
Sm	9.85	6.23	11.23	7.88	8.68	8.79	10.16	7.86	4.71	8.30
Eu	1.76	2.13	1.46	1.45	1.17	1.06	1.56	0.72	0.86	0.98
Gd	10.71	5.14	11.37	7.99	9.05	8.65	8.92	7.28	3.98	8.81
Tb	1.62	0.58	1.67	1.12	1.40	1.30	1.34	1.21	0.63	1.48
Dy	9.93	2.54	9.94	7.21	8.86	7.83	7.80	5.99	3.57	8.79
Ho	1.89	0.34	1.93	1.36	1.82	1.47	1.63	0.87	0.54	1.49
Er	5.09	0.91	5.26	3.70	5.28	4.10	4.76	1.73	1.27	3.72
Tm	0.63	0.12	0.68	0.48	0.70	0.67	0.74	0.18	0.16	0.43
Yb	4.17	0.94	4.29	3.17	5.67	3.43	4.67	0.98	0.83	2.52
Lu	0.67	0.18	0.61	0.45	0.60	0.46	0.75	0.12	0.11	0.30
symbol	△	△	△	○	○	○	◆	◆	◆	◆