

지리산 지역 차노카이트와 함티탄철석 회장암질암의 Sm-Nd 광물연대 및 성인적 관계

박계현 · 김동연 · 송용선

부경대학교 환경지질과학과, 부산시 남구 대연동 599-1

Sm-Nd mineral ages of charnockites and ilmenite-bearing anorthositic rocks of Jirisan area and their genetic relationship

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

Department of Environmental and Geosciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

요약: 지리산 지역의 차노카이트는 외국의 많은 예와 같이 고도의 변성작용을 받은 선크브리아기 지역에 나타나며 회장암과 함께 산출된다. 차노카이트 전암 및 석류석에 대한 Sm-Nd 연대측정 결과 괴상 차노카이트는 $1827 \pm 32(2\sigma)$ Ma, 엽리상 차노카이트는 $1820 \pm 22(2\sigma)$ Ma를 나타낸다. $\epsilon_{Nd}(T)$ 는 각각 -5.5 ± 0.2 와 -6.0 ± 0.5 이며, 이 연대로 계산한 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 초기치는 각각 0.71319, 0.71532이다. 괴상 및 엽리상 차노카이트가 동일한 연대와 Nd 초기치, 유사한 Sr 초기치를 가지는 것은 비록 이들의 현재 조직은 다르지만 균질한 동위원소 조성을 갖는 동일한 암체로부터 같은 시기의 변성작용에 의해 만들어진 것으로 해석된다. 차노카이트의 Nd 초기치, Sr 초기치는 맨틀의 값과는 매우 다르며 지각의 영향을 나타낸다. 회장암체 내에 배태한 함티탄늄 회장암질암체에서 분리한 석류석, 사장석 및 유색광물 부분에 대한 Sm-Nd 연대측정 결과는 $1792 \pm 90(2\sigma)$ Ma, $\epsilon_{Nd}(T)$ 는 -3.9 ± 0.2 이며, 이 연대로 계산한 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 초기치는 0.70616~0.70619이다. 인접하여 산출하는 차노카이트와 회장암의 광물연대가 오차범위 내에서 같은 점은 이들 사이에 성인적 관계가 있을 가능성을 시사한다. 그러나 차노카이트와 회장암의 화학적 조성은 분화관계로는 설명되지 않으며, 또한 Nd 동위원소 초기치 및 Sr 동위원소 초기치 역시 다르다. 이는 이들이 다른 기원물질에서 만들어졌음을 의미하며 둘 사이의 시기적 연관성은 외국 다른 지역의 연구결과들과 마찬가지로 차노카이트의 생성에 회장암이 주된 열원으로 작용하였을 가능성을 시사한다.

핵심어: 차노카이트, 회장암, Sm-Nd 연대, 영남육괴, 선크브리아

Abstract: The charnockite of Jirisan area occurs within the Precambrian high grade metamorphic terrane associated with anorthosite body as many foreign examples. Sm-Nd ages were determined from whole rock-garnet pairs, which turned out $1827 \pm 32(2\sigma)$ Ma for the massive charnockite and $1820 \pm 22(2\sigma)$ Ma for the foliated charnockite with $\epsilon_{Nd}(T)$ of -5.5 ± 0.2 and -6.0 ± 0.5 respectively. $^{87}Sr/^{86}Sr$ initial ratios calculated with these ages are 0.71319 and 0.71532 respectively. The fact that massive and foliated charnockites show identical age, identical Nd isotopic initial ratio, and similar Sr isotopic initial ratios suggest that they were generated at the same time from the same material even though their present textures are different. Initial ratios of Nd and Sr of the charnockites are quite distinct from the mantle values indicating the influence of continental crust. Sm-Nd age determined from the titanium bearing anorthositic rocks intruding the anorthosite body, using mineral separates of garnet, plagioclase, and mafic fraction, is $1792 \pm 90(2\sigma)$ Ma with $\epsilon_{Nd}(T) = -3.9 \pm 0.2$. The $^{87}Sr/^{86}Sr$ initial ratios calculated with this age are 0.70616~0.70619. The charnockites and the anorthositic rocks occurring in contact each other also reveal the same age within the error, which suggest a genetic relationship between them. However, chemical compositions of the charnockites and Hadong-Sancheong anorthosites cannot be explained by igneous differentiation. Their differences in Nd and Sr initial isotopic ratios indicate different source materials. Therefore, temporal association between them suggests the possibility of the anorthosite acting as a thermal source for the generation of the charnockite as other studies.

Key words: charnockite, anorthosite, Sm-Nd age, Yeongnam massif, Precambrian

서 언

한반도의 선크브리아 기저는 북으로부터 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴 등으로 구성된다. 최근에 이러한 한반도의 기저암체들에 대한 연구가 상당히 활발하게 진행되고 있으며 변성작용과 변성시기 등에 대해 새로운 결과들이 계속 보고되고 있다(Kim and Cho, 1994; Kim *et al.*, 1994; 권용완 외, 1995; 조윤희 외, 1996; 김기영 외, 1996; 송용선, 1999; 권용완 외, 1999; 박계현 외, 2000; 오창환 외, 2000). 북한 지역과 남한의 경기육괴 및 영남육괴 모두에서 백립암상에 이르는 강도 높은 변성작용이 보고되었으며(Glebovitsky *et al.*, 1994; 권용완 외, 1997; Lee *et al.*, 1997; 송용선, 1999), 약 30억년의 연령을 가진 저어콘이 보고되었다(조문섭 외, 1999; 이호선 외, 1999). 이와 함께 과거에 보고되지 않았던 경기육괴의 맨저라이트(권용완 외, 1997)와 영남육괴의 차노카이트(김동연 외, 1998)가 발견됨으로써 한반도의 지각진화와 관련하여 선크브리아 기저암체들이 새로이 주목을 받게 되었다.

차노카이트는 사방휘석을 함유하는 화강암질 암석으로써 고도 변성작용을 받은 선크브리아기 지각에 국한되어 나타난다. 차노카이트는 상당히 고온에서 만들어지는 것으로 알려져 있으며(Wendlandt, 1981; Bohlen, 1987) 따라서 생성환경과 성인이 흥미있는 연구과제가 되고 있다. 차노카이트는 마그마에서 정출된 조직을 갖는 등 화성기원인 것으로 밝혀진 연구결과가 많이 보고되고 있으나(Ridley, 1992; Zhou *et al.*, 1995; Duchesne and Wilmart, 1997; Zhao *et al.*, 1997) 변성기원 역시 보고되고 있다(Cooray, 1969; Janardhan *et al.*, 1982; Bohlender *et al.*, 1992). 차노카이트가 만들어지기 위해 필요한 고온의 환경을 만들 수 있는 열원에 대해서는 고온의 마그마가 지각의 밑바닥에 주입(underplating)된다거나 혹은 지구조적으로 두꺼워진 지각 등의 모델들이 제안되고 있다(Newton, 1992; Zhao *et al.*, 1997). 주입되는 마그마의 종류로는 현무암질 마그마, 회장암, 라파키피 화강암등 여러 가지 종류를 가질 수 있으며, 실제로 여러 지역의 차노카이트들이 이러한 화성암들과 연관되어 나타난다고 보고되었다(Emslie, 1978; Petersen, 1980; Hubbard, 1989). 차노카이트는 이 중에서도 특히 회장암과 자주 밀접한 공간적 분포를 보이며 산출된다(Clifford *et al.*, 1995; Higgins and van Breemen, 1996).

우리나라의 차노카이트는 지리산 지역에서 산출되며(김동연 외, 1998), 이 차노카이트 역시 하동-산청 회장암체에 접해서 산출한다. 이같이 지리산 지역에서 밀

접한 공간적 분포관계를 보이는 차노카이트와 회장암 사이의 성인적인 관계를 규명하는 것은 차노카이트의 기원뿐만 아니라 지리산 일대 선크브리아기 지각의 형성과 진화과정을 이해하는데 매우 중요하다. 지리산 지역의 차노카이트는 괴상형과 편마구조가 현저하게 발달된 엽리상 차노카이트로 구분되는데 두 암상 사이의 성인적 관계 역시 아직 밝혀지지 않고 있다(김동연 외, 1998). 이 연구에서는 이러한 두 가지 종류의 차노카이트와 함티타늄 간극누적상 회장암에 대한 Sm-Nd 연대측정과 Sr 동위원소 분석을 통해 각 암석의 기원 물질과 그 형성시기를 알아보고 괴상 및 엽리상 차노카이트의 관계, 차노카이트와 회장암의 성인적 관계에 대하여 논의하고자 한다.

지질개요

영남육괴 남서부의 지리산 일대는 여러 종류의 선크브리아 변성암류가 분포하며(이상만, 1980) 이 변성암류의 동쪽에는 하동-산청 회장암 복합체가 놓인다(Fig. 1). 이 지역의 변성암류로는 변성이질암과 반상변정질 편마암, 화강암질 편마암, 석영장석질 편마암 등이 있다. 연대측정 자료에 의하면 현재 화강암질 편마암으로 변성된 화강암질 마그마가 약 21억 1천만년 전에 관입하였으며, 현재의 반상변정질 편마암으로 변성된 마그마는 $1890 \pm 12 \sim 1945 \pm 10$ Ma(이하 모든 오차는 2σ)의 시기에 관입하였다(Turek and Kim, 1995, 1996; 박계현 외, 2000). 이 지역의 변성작용은 반상변정질 편마암 내에 들어있는 우흑질 백립암에 기록된 $800 \sim 850^\circ\text{C}$, 6 kb에 이르는 백립암상의 초기 변성작용에 다시 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 이상의 고도 변성작용이 중첩되었으며(송용선, 1999) 변성시기는 $1717 \pm 34 \sim 1819 \pm 106$ Ma(박계현 외, 2000)로 보고되었다.

차노카이트는 서쪽의 편마암류 분포지역과 그 동쪽의 회장암체 분포지역 사이에 자리잡고 있다(Fig. 1). 차노카이트의 주구성 광물은 K-장석, 사장석, 사방휘석, 석영 등이며, 사방휘석은 사방각섬석에서 각섬석으로 후퇴변성되어 반응주변부가 발달되어 나타난다. 차노카이트는 조직에 의해 다시 괴상 및 엽리상 차노카이트로 나뉜다(Fig. 2). 괴상 차노카이트는 조립질이며 K-장석과 석영은 차노카이트의 특징인 지방광택의 어두운 녹색 빛을 띠며, K-장석은 1~3 cm 정도의 반상변정을 이루기도 한다. 석류석은 산점상으로 산출하는데, 재결정의 성장조직을 보인다. 엽리상 차노카이트는 수 mm 폭으로 우흑부와 우백부가 교호하는 호상조직을 보여준다. 석류석은 석영, 사장석, 미사장석등 무색

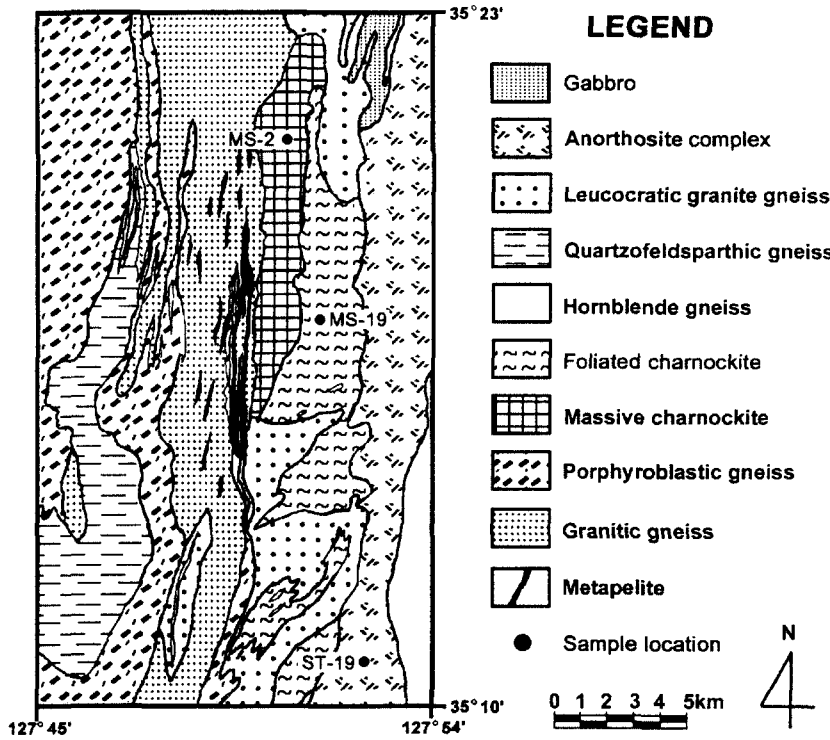


Fig. 1. Geological map of the southwest Yeongnam massif modified after Kim *et al.*(1964), Choi *et al.*(1964) and Kim(1999), showing the distribution of massive and foliated charnockites and anorthosite complex. Sampling locations are shown by solid circles.

광물로 구성된 우백부에서 주로 산출된다. 석류석-사방회석 지질온도계와 석류석-사방회석-사장석-석영 지질압력계를 통해 얻어진 괴상 차노카이트 및 엽리상 차노카이트의 변성온도-압력 조건은 시료에 따라 약 2~7 kb, 600~850°C의 큰 범위로 변화한다(김동연, 1999). 뚜렷한 누대구조를 보여주는 석류석의 경우 중심부 성분을 사용하였을 때는 3.5 kb, 800°C의 변성조건을, 주변부 성분을 사용하였을 때는 6 kb, 600°C의 변성조건을 보임으로써 반시계 방향의 진화경로를 나타낸다(김동연, 1999). 이 연구에서는 괴상 및 엽리상 차노카이트를 각각 1시료씩 분석하였다(Fig. 1에 시료 채취지점 표시).

하동-산청 회장암 복합체는 변성암류의 동측에 위치하며 남북의 두 암체로 나뉜다. 북쪽의 암체는 대체로 둥근 형태의 분포모양을 하고 있으며 그 남쪽의 암체는 좁고 긴 대상분포를 하고 있다(정지곤, 1987). 하동-산청 회장암 복합체는 괴상형, 엽상형, 간극누적형 회장암으로 분류된다(정지곤, 1987; 이종만 외, 1999). Kwon and Jeong(1990)은 하동-산청 회장암 두 시료에

대하여 1678±90Ma와 1690±220Ma의 Sm-Nd 연대를 보고하였으며 이 연대를 회장암의 관입연대로 해석하였다. 이 연구에서 연구대상으로 한 함티타늄 간극누적상 회장암질암은 남쪽에 분포하는 대상의 회장암을 남북 방향의 맥상으로 관입한 형태로 산출하며, 지구성광물은 사장석, 각섬석류, 티탄철석, 석류석, 석영 등으로, 각섬석류는 주로 휘석의 후퇴변성 산물이다. 이종만 외(1999)는 함티타늄 간극누적상 회장암질암이 기존의 회장암 모암의 잔류물을 포함하거나 절단하는 것으로부터 이 암석은 티타늄이 농집된 잔류마그마가 관입하여 만들어진 것으로 해석하였다. 이 연구에서는 회장암체를 관입한 형태로 산출하는 석류석, 티탄철석 및 사장석의 큰 결정들이 육안으로 관찰되는 함티타늄 간극누적상 회장암질암(Fig. 3)으로부터 광물들을 분리하여 하동-산청 회장암 복합체의 최소 생성연대를 구하고자 하였다.

분석방법

Sm-Nd 동위원소 계를 이용한 연대측정과 Sr 및 Pb

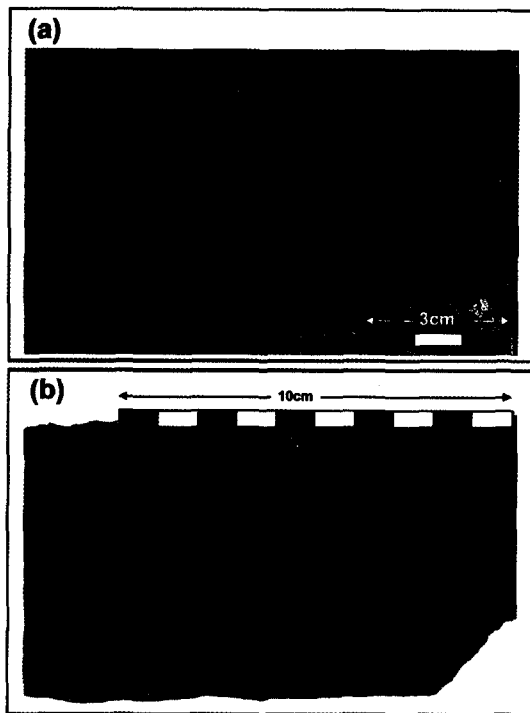


Fig. 2. Photographs of the hand specimens of (a) massive charnockite and (b) foliated charnockite.

동위원소 조성분석을 위하여 괴상과 엽리상 차노카이트 각 1개의 시료로부터 석류석을 분리하였고, 함티타늄 간극누적상 회장암질암에서는 석류석, 사장석 및 유색광물부를 분리하였으며 각 시료의 전암 분말 역시 분석하였다. 광물의 분리는 분쇄 및 체질 뒤에 필요시 자력 선별기를 이용하였고 최종적으로는 양안 실체현미경 아래에서 불순물들을 손으로 골라내었다. 동위원소 분석을 위한 시료 전처리, 동위원소 비율 분석 및 동위원소 회석법에 의한 정량분석은 한국기초과학지원 연구원에서 수행하였다. 전암 분말과 광물시료들은 테플론 용기안에 넣고 ^{150}Nd - ^{149}Sm 혼합 스파이크를 더한 뒤에 혼합산(HF:HClO₄:HNO₃=4:1:1)을 이용하여 가열판 위에서 용해시켰다. Sr은 양이온 교환 컬럼을 이용하여 분리하였으며, Sm과 Nd은 양이온 교환 컬럼을 이용하여 희토류 원소 부분을 분리한 뒤에 다시 테플론 분말에 HDEHP를 입혀 만든 컬럼을 이용해 분리하였다. 동위원소 비율은 9개의 파라데이 검출기를 장착한 VG 54-30 열이온화 질량분석기를 이용하여 측정하였다. Sr과 Nd 동위원소 비율의 측정은 역동적(dynamic) 모드로 측정하여 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비율은 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비율은 $^{146}\text{Nd}/^{142}\text{Nd} = 0.7219$ 에 맞추어 출력하였으며 시료에 더한 스파이크의 Nd부분을 감안하여 추가로 보정하였다. NIST-987표준과 La Jolla

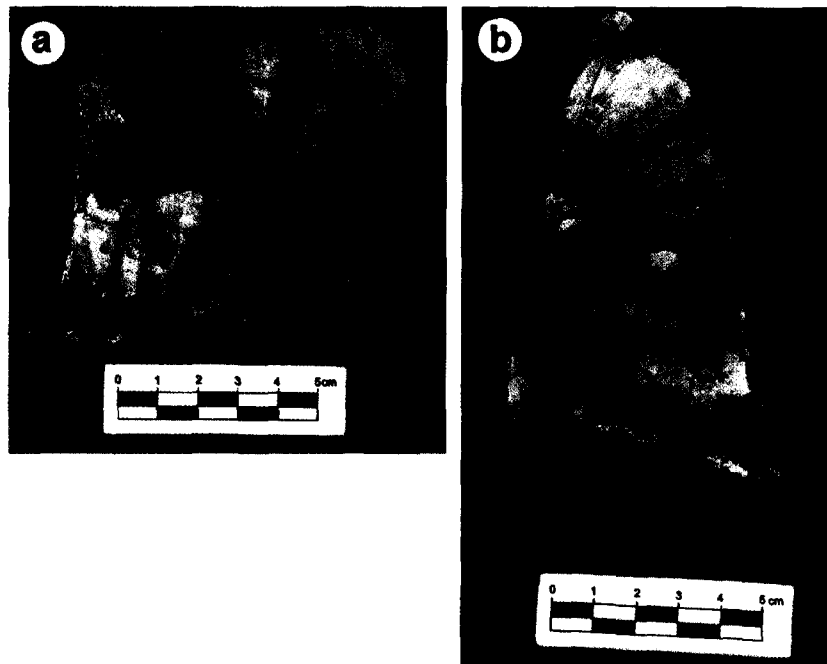


Fig. 3. Photographs of ilmenite-bearing intercumulus type anorthositic rocks; (a) ST19-1, (b) ST19-2. Plagioclase, garnet and ilmenite can be identified from the photos.

Nd 표준의 반복 측정 결과는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710230 \pm 0.000010$ ($N = 13$), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511833 \pm 0.000010$ ($N = 13$)이며 Sr, Sm 및 Nd의 전체적인 바탕값은 각각 500pg, 10pg 및 50pg으로 무시할만한 수준이다. 연대의 계산은 Ludwig(1994)를 사용하였다. 연대 계산 결과는 인용자료들과 마찬가지로 모두 95% 신뢰도의 오차(2σ)로 보고하였다.

연대측정 결과

차노카이트 전암 및 분리한 석류석에 대한 Sm-Nd 연대측정 결과 괴상 차노카이트는 $1827 \pm 32\text{Ma}$, 엽리상 차노카이트는 $1820 \pm 22\text{Ma}$ 이며 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 초기치는 각각 0.509995 ± 12 과 0.509977 ± 28 로 각각 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 값이 -5.5 ± 0.2 와 -6.0 ± 0.5 에 해당한다(Fig. 4). 이러한 연대와 초기치는 오차를 감안할 때 같은 값이라고 볼 수 있다. 인접하여 산출하는 괴상 및 엽리상 차노카이트가 이와 같이 동일한 연대 및 동일한 Nd 초기치를 갖는 것은 이들이 비록 현재 다른 조직을 갖고있긴 하지만 동일한 시기에 같은 기원물질로부터 만들어졌음을 나타낸다.

함티타늄 회장암질암에서 분리한 석류석, 사장석 및 유색광물 부분에 대한 Sm-Nd 연대측정 결과는 ST19-1 시료의 경우 $1785 \pm 52\text{Ma}$, 그리고 ST19-2 시료는 $1747 \pm 248\text{Ma}$ 로 계산된다. 각각의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 초기치는 0.510134 ± 68 과 0.510150 ± 220 이다. 만약 두 시료로부터의 자료를 모두 이용하여 계산할 경우 $1792 \pm 90\text{Ma}$ 의 연대와 0.510122 ± 10 의 초기치($\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -3.9 \pm 0.2$)가 구해진다(Fig. 4b). 두 시료가 동일한 노두에서 채취되었고 각각의 시료로부터 구한 연대와 초기치가 오차범위 내에서 동일하기 때문에 앞으로의 논의에서는 두 시료를 함께 이용하여 구한 연대와 초기치를 사용한다. Kwon and Jeong(1990)이 회장암 두 시료에 대해 실시했던 Sm-Nd 연대결과를 보면 $1678 \pm 90\text{Ma}$ 와 $1690 \pm 220\text{Ma}$ 로 큰 오차를 감안하면 이 연구의 결과와 다르지 않다고 볼 수 있다.

이 연구에서 구한 차노카이트와 함티타늄 간극누적상 회장암질암의 연대는 이미 변성작용을 받은 암석들로부터 광물들을 분리하여 측정한 것이기 때문에 변성 연대로 해석하여야 한다. 현재는 원래의 마그마 관입 및 고화 이후에 변성작용을 받을 때까지 얼마만큼의 시간이 흘렀었는지를 알 수 있는 자료가 없다. 하지만 회장암의 일부에는 원래의 휘석등이 각섬석으로 변화되지 않고 일부 남아있는 것으로 보아 변성도가 그리 높지 않았거나 혹은 변성작용의 지속기간이 비교적 짧

았을 가능성이 있다. 또한 간극누적상 회장암질암의 거정질 광물들은 회장암질 마그마의 분화후기에 잔류마그마로부터 만들어진 광물조합과 거정질 조직을 그대로 간직하고 있는 것으로 해석할 수도 있다. 따라서 변성시의 조건이 석류석등 분석대상 광물들의 Sm-Nd 동위원소계에 대한 폐쇄온도를 넘지 않았었다면 측정된 연대는 원래의 광물정출 시기를 지시할 가능성이 있다. 이 경우 함티타늄 회장암질암은 대상으로 분포하는 회장암 모암을 관입하고 있으므로 이 연대는 하동-산청 회장암체의 최소 생성연대를 나타낸다. Kwon and Jeong(1990) 및 이 연구에서 구한 회장암의 연대 측정 결과가 큰 오차를 갖는 것은 회장암이 원래 불균질한 초기치를 갖고 있었거나 혹은 변성작용시의 교란에 의한 영향일 수 있으나 현재 자료만으로는 어느 것이 더 큰 영향을 주었는지는 판단하기 곤란하다.

박계현 외(2000)가 구한 지리산 지역의 다른 편마암류의 변성연대($1717 \pm 34 \sim 1819 \pm 106\text{Ma}$)와 이 연구에서 얻은 차노카이트 및 함티타늄 간극누적상 회장암질암의 연대를 비교해 보면 서로 비슷하거나 다른 편마암류의 변성연대가 다소 젊음을 알 수 있다. 이러한 사실은 하동-산청 회장암 복합체와 차노카이트가 지리산 지역의 광역변성작용의 시작단계에 만들어졌음을 시사하며, 깊은 지각에 관입한 고온의 회장암질 마그마는 광역변성작용에 필요한 열원의 상당부분을 충족시켜주었을 가능성도 있다.

동위원소 조성

Nd 동위원소

Kwon and Jeong(1990)이 구한 회장암의 초기치 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 는 $-1.6 \sim -5.2$ 이다. Kwon and Jeong(1990)이 분석한 Sm-Nd 동위원소 자료를 이번에 구한 연대를 이용하여 Nd 동위원소 초기치를 재계산하면 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 는 $-0.6 \sim -4.1$ 로 약간 증가한다. 이 연구에서 분석한 함티타늄 회장암질암의 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 값은 -3.9 로 낮은 쪽에 가깝다. 회장암질암들이 모두 음의 값을 나타내는 것은 회장암의 기원물질이 결핍맨틀보다는 약간 부화된 맨틀이었거나 지각물질에 의한 오염이 있었음을 시사한다. 또한 이들의 값이 일정하지 않고 불균질한 양상을 보이는 것은 근원물질 자체가 불균질했거나 혹은 지각물질에 의한 오염의 정도가 달랐던 것으로 해석할 수 있다. 아직 어떤 가설이 맞는지는 알 수 없으나 하동-산청 회장암체의 북부지역에 넓은 분포를 보이는 곳에서 채취한 시료들은 비교적 높은 $-0.6 \sim -2.4$ 의 값을 보이는 반면에 그 남쪽에 좁고 긴 모양의 대상분포

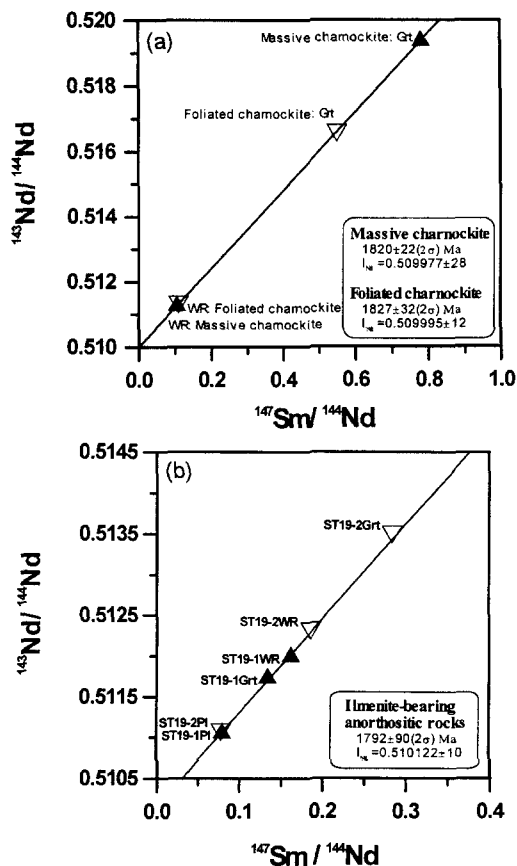


Fig. 4. Sm-Nd isochron diagrams for the (a) charnockites and (b) ilmenite-bearing anorthositic rocks. Whole rock(WR) data of the massive(solid triangles) and foliated(open triangles) charnockites are plotted on almost identical points. WR-Grt(garnet) ages of the massive and foliated charnockites are 1827 ± 32 and $1820 \pm 22(2\sigma)$ Ma, and their initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios are 0.509995 ± 12 and $0.509977 \pm 28(2\sigma)$ respectively. Ilmenite-bearing anorthositic rocks ST19-1(solid triangles) and ST19-2(open triangles) yield Wr-Grt-Pl(plagioclase) ages of 1785 ± 52 and $1747 \pm 248(2\sigma)$ Ma, and their initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios are 0.510134 ± 68 and $0.510150 \pm 220(2\sigma)$ respectively. If we combine two samples together, the isochron age of $1792 \pm 90(2\sigma)$ is obtained.

를 하는 암체로부터 채취한 시료들은 $-3.9 \sim -4.1$ 로 상대적으로 낮은 값을 보이는 현상은 지각물질에 의한 오염이 이 값을 변화시킨 주된 원인일 가능성을 높게 한다. 특히 -3.9 의 낮은 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 값을 갖는 함티타늄 회장암질암은 이중만 외(1999)의 견해대로 회장암질 마그마 분화 후기단계의 잔류마그마일 가능성이 크며 따라서 마그마의 분화지속과 함께 지각물질에 의한 오염

도 증가하였던 것으로 생각할 수 있다.

한편 차노카이트의 Nd 초기치 $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ 를 살펴보면 괴상 차노카이트와 엽리상 차노카이트가 각각 -5.5 ± 0.2 와 -6.0 ± 0.5 로 계산된다. 이 값들을 회장암질암들과 비교하면 차노카이트의 Nd 초기치 값이 약간 더 낮은 것을 알 수 있다. 이렇게 회장암에 비해 차노카이트가 더 낮은 Nd 동위원소 초기치를 갖는 것은 차노카이트를 만든 기원물질이 회장암과 동일하지는 않음을 의미한다. 만약 회장암질 마그마와 동일한 맨틀기원의 기원물질이 차노카이트를 만들려면 낮은 Nd 동위원소 값을 갖는 상당량의 지각물질에 의한 오염이 있었어야 한다. 물론 맨틀이 아닌 지각물질로부터 차노카이트가 직접 만들어진 경우에도 이러한 차이가 설명될 수 있다.

Sr 동위원소

회장암의 경우 이 연구에서는 두 시료에서 Sr 동위원소 초기치가 $0.70616 \sim 0.70619$ 로 계산된다. 한편 Kwon and Jeong(1990)의 분석자료에 이 연구에서 구한 1792Ma 의 연대를 적용하면 북쪽의 넓게 분포하는 암체에서 채취한 시료들의 Sr 초기치는 $0.70263 \sim 0.70473$ 이 된다. 남쪽의 좁고 긴 대상분포 회장암에서 채취한 시료는 전암의 Rb값이 측정되지 않아 전암의 초기치를 알 수 없으나 전암 Sr의 80%를 차지하는 사장석으로부터 구한 초기치는 0.70612 로 Kwon and Jeong(1990)의 분석자료 중에서는 가장 높은 값이며 이 연구에서 구한 값과 비슷한 값을 보인다. 이러한 초기치는 약 18억년전의 결핍맨틀 값과 비교하면 다소 높은 값이기 때문에 Nd 경우와 마찬가지로 부화된 맨틀기원 혹은 지각물질에 의한 오염 가능성을 시사한다. 또한 시료마다 다른 값을 갖는 것은 불균질한 근원물질 또는 오염정도의 차이를 나타낼 수 있다. 주목할만한 것은 Nd 동위원소 초기치와 Sr 동위원소 초기치가 잘 정의되는 상관관계를 나타낸다는 것이다(Fig. 5). 이러한 관계를 보면 이들이 불균질한 부화맨틀에서 만들어졌을 가능성보다는 두 단성분사이의 혼합에 의한 변화, 즉 맨틀기원 마그마의 지각물질에 의한 오염가능성이 더 큰 것으로 해석된다.

한편 차노카이트 전암으로부터 분석된 Sr 동위원소 값을 전암-석류석 Sm-Nd 연대와 분석된 Rb/Sr 비율로부터 구한 Sr 동위원소 초기치는 괴상 차노카이트와 엽리상 차노카이트의 값이 0.71319 와 0.71532 로 계산된다. 이러한 값은 회장암의 Sr 초기치에 비해 상당히 높은 값이며 지각의 성분을 강하게 나타낸다. 회장암과 차노카이트의 생성에 맨틀-지각물질의 혼합이 있었을 가능성을 살펴보기 위하여 Nd-Sr 동위원소 대비그

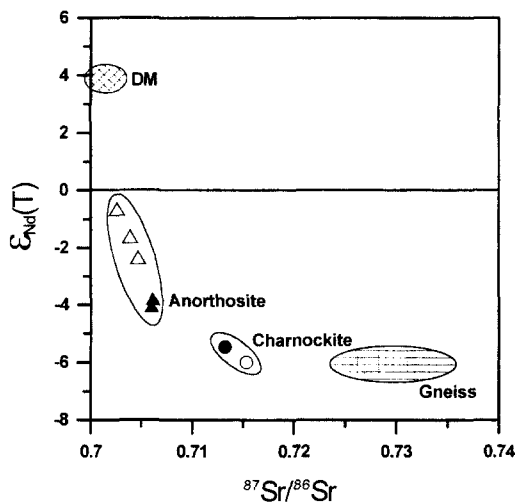


Fig. 5. Sr-Nd isotope correlation diagram at 1800Ma ago. Solid circle is massive charnockite, open circle is foliated charnockite, triangles are ilmenite-bearing anorthositic rocks, and open triangles are anorthosites studied by Kwon and Jeong(1990). 'DM' represents depleted mantle and 'Gneiss' represents the gneisses of Jirisan area studied by Park *et al.*(2000), calculated from unpublished Sr isotope data. The isotopic compositions of the charnockites and the anorthositic rocks seem to form a mixing trend between depleted mantle and crustal gneisses.

림을 그려보면(Fig. 5) 18억년전 당시의 맨틀, 회장암, 차노카이트 및 지리산 지역의 다른 편마암류들이 혼합 선으로 설명될 수도 있는 배열을 한다. 회장암은 맨틀-지각물질간의 혼합선에서 맨틀에 가까운 부분에 놓이

며, 차노카이트는 이보다 훨씬 더 지각물질의 혼합비율이 큰 위치에 놓인다. 한편 대부분이 정편마암류인 지리산 지역 편마암류 자체도 맨틀기원 물질과 편마암류보다 더 높은 Sr 동위원소 조성을 가진 지각기원 물질 사이의 혼합으로 만들어졌을 가능성도 있다.

결론

괴상 및 엽리상 차노카이트는 동일한 전암-석류석에 대한 Sm-Nd 연대측정 결과 각각 1827±32(2σ)Ma와 1820±22(2σ)Ma를 나타낸다. εNd(T)는 각각 -5.5±0.2와 -6.0±0.5이다. 이러한 연대는 오차범위 내에서 동일한 Sm-Nd 연대 및 Nd 초기치이며, 따라서 이들은 현재 다른 조직을 보이고 있지만 같은 기원물질로부터 동일한 시기에 만들어진 것으로 해석된다.

함티타늄 회장암질암에서 분리한 석류석, 사장석, 기타 유색광물부로부터 구한 Sm-Nd 연대는 1792±90(2σ) Ma로 오차범위 내에서 괴상 및 엽리상 차노카이트와 동일한 연대이며 하동-산청 회장암질암체의 최소 생성 연대를 나타낸다. 다른 지역과 마찬가지로 회장암과 차노카이트가 서로 접하여 산출되는 것은 이들 사이에 성인적 관계가 있음을 시사한다. 함티타늄 회장암질암은 잔류마그마에서 생성된 거정질 조직을 그대로 간직하고 있는 것으로 보이기 때문에 변성작용시 석류석, 티탄철석, 사장석등의 광물조합이 변화되지 않은 것으로 생각되며, 이 경우 측정된 연대는 회장암의 원래 분화시기를 지시할 가능성도 있다.

한편 함티타늄 회장암질암의 εNd(T)는 -3.9±0.2로 차노카이트에 비해 다소 높은 값을 보여준다. 또한 이 연

Table 1. Sm-Nd isotopic data for ilmenite-bearing intercumulus type anorthositic rocks and charnockites of the Jirisan area.

Sample	Sm(ppm)	Nd(ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	εNd(0)	εNd(T)
Ilmenite-bearing anorthositic rocks							
ST19-1 WR	18.666	69.519	0.1624	0.511998	0.000011	-12.49	-4.38
ST19-1 Pl	0.663	5.008	0.0801	0.511056	0.000015		
ST19-1 Grt	0.784	3.516	0.1349	0.511734	0.000011		
ST19-2 WR	8.577	27.874	0.1861	0.512310	0.000010	-6.39	-3.68
ST19-2 Pl	0.786	6.059	0.0785	0.511067	0.000016		
ST19-2 Grt	1.031	2.191	0.2846	0.513490	0.000017		
Massive charnockite							
MS-2 WR	15.129	86.704	0.1056	0.511264	0.000008	-26.81	-5.5
MS-2 Grt	21.619	16.773	0.7797	0.519366	0.000010		
Foliated charnockite							
BH3-10.1 WR	7.86	43.10	0.1103	0.511298	0.000006	-26.14	-6.0
BH3-10.1 Grt	25.62	28.25	0.5486	0.516547	0.000005		

Table 2. Rb-Sr isotopic data for ilmenite-bearing intercumulus type anorthositic rocks and charnockites of the Jirisan area.

Sample	Rb(ppm)	Sr(ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ
ST19-1 WR	0.47	50.0	0.0269	0.706164	0.000014
ST19-2 WR	3.31	220.6	0.0434	0.706194	0.000014
MS-2 WR	136.84	166.9	2.3876	0.713176	0.000015

구에서 구한 연대를 사용하여 계산한 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기치 역시 함티타늄 회장암질암은 0.70616~0.70619, 차노카이트의 경우는 0.71319와 0.71532로 계산되어 뚜렷이 다른 값을 보여준다. 이러한 경향성은 Kwon and Jeong (1990)의 분석자료에서 계산된 회장암의 Sr 초기치인 0.70263~0.70612와 비교시에도 확인된다. 이러한 Nd, Sr 동위원소 값의 차이는 지리산 지역의 차노카이트와 회장암이 서로 다른 기원물질로부터 만들어졌음을 시사한다.

이상의 결과를 종합할 때 바로 인접하여 산출하는 지리산 지역의 차노카이트와 회장암이 동일 시기의 연대를 나타냄은 이전에 연구된 다른 지역들과 마찬가지로 차노카이트의 생성에 뜨거운 회장암질 마그마의 관입이 열원으로 작용하였을 가능성을 더욱 높게 한다. 이러한 열원은 광역변성작용에도 영향을 주었을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문에 대하여 유익한 도움 말씀을 주신 한국기초과학지원연구원의 정창식 박사와 한국지질자원연구원의 이승구 박사께 깊이 감사드린다. 또한 야외조사와 실제 작업시에 도움을 준 부경대학교 암석학 연구실의 류호정, 이호선, 김남훈 석사에게도 사의를 표한다. 이 논문은 1999년도 부경대학교 학술진흥재단의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

권용완, 김형식, 이설경, 1995, 무주 구상편마암의 성인에 관한 연구. 암석학회지, 4, 186-200.
 권용완, 김형식, 오창환, 1997, 경기육괴 북동부지역에 분포하는 오대산 편마암복합체의 다변성작용. 암석학회지, 6, 226-243.
 권용완, 신의철, 오창환, 김형식, 강지훈, 1999, 풍기지역 소백산편마암복합체의 백립암상 변성작용-북부 소백산육괴의 지각진화와 환경지질. 암석학회지, 8, 183-202.
 김기영, 김형식, 오창환, 박찬수, 강지훈, 류영복, 1996, 장군봉 일대 선크브리아대-고생대 변성퇴적암류의 다변성작용-북부 소백산육괴의 중앙부 지역의 지각진화와 환경

지질. 암석학회지, 5, 168-187.
 김동연, 1999, 지리산 동부지역에 분포된 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학. 부경대학교 석사 학위논문, 79p.
 김동연, 송용선, 박계현, 1998, 지리산 동부지역에 분포된 차노카이트의 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구. 대한지질학회 제53차 학술발표회 초록집, 35-36.
 김옥준, 홍만섭, 박희인, 박양대, 김기태, 윤선, 1964, 한국 지질도 1:50,000, 산청도폭 및 설명서, 경상남도, 45p.
 박계현, 송용선, 박맹언, 이승구, 류호정, 2000, 동북아시아 지역 선크브리아 지괴에 대한 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구: 1. 지리산 지역 변성암의 변성연대. 암석학회지, 9, 29-39.
 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
 오창환, 전은영, 박배영, 안건상, 이정후, 2000, 소백산 육괴 서남부인 승주-순천 일대의 화강암질 편마암과 반상변정질 편마암의 변성진화과정. 암석학회지, 9, 121-141.
 이상만, 1980, 지리산 (하동-산청) 지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
 이종만, 정지근, 김원사, 1999, 하동지역 회장암질암의 진화 및 함티타늄광체의 성인적 관련성에 대한 예비연구. 지질학회지, 35, 321-336.
 이호선, 송용선, 박계현, 이석훈, 1999, 중부소백산육괴 선크브리아 편마암의 2950Ma CHIME 연대. 대한지질학회 제54차 추계공동학술발표회 초록집, 77-78.
 정지근, 1987, 하동-산청지역에 분포한 회장암의 분화. 지질학회지, 23, 216-228.
 조문섭, 이기욱, 이승렬, R. Stern, 1999, 남한에서 가장 오래된 지각물질의 나이: SHRIMP 연대측정. 한국광물학회 · 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 89.
 조원호, 조문섭, 이승렬, 1996, 청평-양평지역에 분포하는 근청석 편마암의 백립암상 변성작용과 P-T 진화 경로. 암석학회지, 5, 52-61.
 최유구, 정창희, 이대성, 김서운, 김수진, 1964, 한국지질도 1:50,000, 단성도폭 및 설명서, 경상남도, 48p.
 Bohlen, S.R., 1987, Pressure-temperature-time paths and a tectonic model for the evolution of granulites. J. Geology, 95, 617-632.
 Bohlender, 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, Fokiep district, 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 (hypersthene monzodiorite)-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.
- Glebovitsky, V.A., Sedova, I.S., Bushmin, S.A., Vapnik, Ye.A. and Buiko, A.K., 1994. Granulites of northern Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, 3, 196-219.
- 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.
- Hubbard, F.H., 1989. The geochemistry of the Proterozoic lower-crustal depletion in southwest Sweden. *Lithos*, 23, 101-113.
- 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, J. and Cho, M., 1994. Petrogenesis of the Precambrian Honjesa granite (Magmatism and metamorphism of the Proterozoic in the northeastern part of Korea). *J. Petrol. Soc. Korea*, 3, 76-93.
- Kim, J., Cho, M. and Kim, H.S., 1994. Metamorphism of the Hontgjesa granite and the adjacent metasedimentary rocks (magmatism and metamorphism of the Proterozoic in the northeastern part of Korea). *J. Petrol. Soc. Korea*, 3, 94-108.
- Kwon, S.-T. and Jeong, J.G., 1990. Preliminary Sr-Nd isotope study of the Hadong-Sanchung anorthositic rocks in Korea: Implication for their origin and for the Precambrian tectonics. *J. Geol. Soc. Korea*, 26, 341-349.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.S. and Park, K.H., 1997. An early Proterozoic Sm-Nd age of mafic granulite from the Hwacheon area, South Korea. *Geoscience J.*, 1, 136-142.
- Ludwig, K.R., 1994. ISOPLOT-a plotting and regression program for radiogenic isotope data, version 2.71. USGS Open File Rep., 91, 445.
- Newton, R.C., 1992. An overview of charnockite. *Precam. Research*, 55, 399-405.
- Petersen, J.S., 1980. The zoned Kleivan granite-an end member of the anorthosite suite in southwest Norway. *Lithos*, 13, 79-95.
- Ridley, J., 1992. On the origins and tectonic significance of the charnockite suite of the Archaean Limpopo Belt, Northern Marginal Zone. *Precam. Res.*, 55, 407-427.
- Turek, A. and Kim, C.-B., 1995. U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area. Ryeongnam massif, Korea. *Geochem. J.*, 29, 243-258.
- 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. Mineral.*, 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 Charles Mountains, East Antarctica: implications for charnockite petrogenesis and proterozoic crustal evolution. *Precam. Res.*, 81, 37-66.
- Zhou, X. Q., Bingen, B., Demaiffe, D., Liégeois, J.-P., Hertogen, J., Weis, D. and Michot, J., 1995. The 1160 Ma Hidderskog meta-charnockite: implications of this A-type pluton for the Sveconorwegian belt in Vest Agdar (SW Norway). *Lithos*, 36, 51-66.

(2001년 2월 5일 접수, 2001년 2월 28일 게재승인)