

전주 및 순창지역에 분포하는 엽리상 화강암류의
성인에 대한 연구 (II)
- Sr 및 Nd 동위원소적 특성을 중심으로 -

나춘기* · 이인성** · 정재일***

Petrogenetic Study on the Foliated Granitoids in the
Chonju and the Sunchang area (II)
- In the Light of Sr and Nd Isotopic Properties -

Choon-Ki Na*, In-Seong Lee** and Jae-Il Chung***

ABSTRACT: The Sr and Nd isotopic compositions of two foliated granitic plutons located in the Chonju and Sunchang area were determined in order to reconfirm the intrusion ages of granitoids and to study the sources of granitic magmas. The best defined Rb-Sr isochron for the whole rock samples of the Chonju foliated granite (CFGR) give an age of 284 ± 12 Ma, suggesting early Permian intrusion age. In contrast, the whole rock Rb-Sr data of the Sunchang foliated granite (SFGR) scatter widely on the isochron diagram with very little variation in the $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ratios and, therefore, yield no reliable age information. Furthermore they show the concordance of mineral and whole rock Rb-Sr isochron and divide into two linear groups with roughly the same slopes and significantly different $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, indicating some kind of Rb-Sr distortion in whole rock scale and a difference in source material and/or magmatic evolution between two subsets. The reconstructed isochrons of 243 Ma, which was defined from the proposed data by the omission of one sample point with significantly higher $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ratio than the others, and 252 Ma, from the combined data of it and some of this study, strongly suggest the possibility that the SFGR was intruded appreciably earlier than had previously been proposed, although the reliability of these ages is still questionable owing to high scatter of data points and, therefore, further study is necessary. All mineral isochrons for the investigated granites show the Jurassic to early Cretaceous thermal episode ranging from 160 Ma to 120 Ma. Their corresponding initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios correlate well with their whole rock data, indicating that the mineral Rb-Sr system of the investigated granites was redistributed by the postmagmatic thermal event during Jurassic to early Cretaceous. The initial ϵSr values for the CFGR (64.27 to 94.81) tend to be significantly lower than those for the SFGR (125.43 to 167.09). Thus it is likely that there is a marked difference in the magma source characteristics between the CFGR and the SFGR, although the possibility of an isotopic resetting event giving rise to a high apparent initial ϵSr in the SFGR can not be ruled out. In contrast to ϵSr , both batholiths show a highly restricted and negative values of initial ϵNd , which is -14.73 to -19.53 with an average -16.13 ± 1.47 in the CFGR and -14.78 to -18.59 with an average -17.17 ± 1.01 in the SFGR. The highly negative initial ϵNd values in the investigated granitoids strongly suggest that large amounts of recycled old continental components have taken part in their evolution. Furthermore, this highly restricted variation in ϵNd is significant because it requires that the old crustal source material, from which the granitoid-producing melts were generated, should have a reasonably uniform Nd isotopic composition and also quite similar age. Calculated T2DM model ages give an average of 1.83 ± 0.25 Ga for CFGR and 1.96 ± 0.19 Ga for SFGR, suggesting the importance of a mid-Proterozoic episode for the genesis of two foliated granites. Although it is not possible to determine precisely the source rock compositions for the investigated foliated granites, the Sr-Nd isotopic evidences indicate that midcrustal or less probably, a lower crustal granulitic source could be the most likely candidate.

* 목포대학교 환경공학과 (Department of Environmental Eng., Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea)

** 기초과학지원 연구소 (Korea Basic Science Institute, Taejon 303-333, Korea)

*** 전북대학교 지질학과 (Department of Geology, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea)

서 론

한반도 남부에 위치하는 일부의 엽리상 화강암류는 그 관입년대가 선쥬라기로 추정되고 있어 (주승환, 김성재, 1986; 김용준 등, 1994) 그 동안 쥬라기의 대보운동과 백악기의 불국사 변동으로 양분되어 왔던 남한의 화성 활동 시기를 트라이아스기의 송림 변동까지 확대시키는데 매우 중요한 역할을 하였다. 따라서 이들 화강암류의 성인에 대한 정확한 이해는 남한의 선쥬라기 화성활동사는 물론 지구조사, 지각진화사 등을 규명하는데 있어 매우 유용한 자료로서 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 이들 암류는 관입정지 후 쥬라기의 대보운동과 백악기의 불국사 화성활동으로 이어지는 일련의 후기 화성 활동에 의해 영향을 받아 엽리구조를 발달시킬 정도로 변형되어 있어 정확한 관입년대 및 성인을 추적하는데 있어 많은 어려움이 뒤따르고 있다. 그럼에도 불구하고 이들 암류의 암석 성인에 대한 연구가 대부분 원소 화학적이며 관입년대에 대한 연구 역시 후기 변성작용에 영향을 받기 쉬운 광물년대에 집중되어 있을 뿐으로 (김옥준, 1971; 김정민, 김용준, 1984; 김용준, 1986; 김용준, 이창신, 1988; 김용준 등, 1989, 1994; 박재봉 등, 1990; Turek, Kim, 1993), 관입년대 추정에 보다 신뢰성을 부여하고 근원 마그마에 대한 정보를 얻을 수 있는 전암에 대한 Sr, Nd 동위원소적 연구는 주승환과 김성재 (1986)의 Sr동위원소 연구를 제외하고는 거의 이루어진 바 없다.

이 연구의 목적은 엽리상 화강암류의 동위원소적 특성을 파악하고 이를 바탕으로 관입정지시기를 재조명하고 이들 화강암류를 형성시킨 근원 마그마의 유형을 고찰하는데 있다. 이를 위해서 전주 및 순창 엽리상 화강암체를 대상으로 23개의 시료를 채취하여 전암 및 광물에 대한 Sr 및 Nd동위원소 분석을 수행하고, Rb-Sr동위원소계를 이용하여 화강암체의 관입시기를 고찰하였으며 Sr, Nd의 동위원소적 진화 특성을 이용하여 마그마의 근원을 추적하였다.

일반지질 및 기존 연구결과

엽리상 화강암류는 한반도의 옥천대 및 영남육괴내에 대략 남한의 주구조선의 하나인 북동-남서방향과 거의 평행선을 이루며 3조(條)로 대상 분포되어 있다. 이들 암류는 쥬라기의 대보운동에 의해 변형운동을 받아 암석 내의 유색광물이 특정 방향으로 재배열되어 뚜렷한 엽리구조를 보이는 암쇄암류로서, 조성광물 및 조직에 따라 엽리

상 반상 화강섬록암, 엽리상 각섬석 흑운모 화강섬록암, 엽리상 흑운모 화강섬록암, 엽리상 우백질 화강섬록암, 엽리상 복운모 화강암 등의 암형으로 나누어지고 있다 (김용준 등, 1994). 이들 암류의 동위원소 연대 측정에 대한 연구는 K/Ar법 (김옥준, 1971; 김용준, 1986; 김용준, 이창신, 1988; 김용준 등, 1989; 1994), Rb-Sr법 (주승환, 김성재, 1986) 및 U/Pb법 (Turek, Kim, 1993)에 의해 전암과 광물을 대상으로 수행되어 백악기 초에서 중기 페름기에 해당하는 148~258 Ma의 동위원소 연대가 보고되어 있다. 김용준 등 (1994)은 이들 연대 측정 결과를 종합하여 엽리상 화강암류의 관입시기를 258~198.7 Ma로 대부분 트라이아스기 말이나 쥬라기 초기라고 보고 이들 암류가 트라이아스기의 송림 변동기에 관입되었으며 쥬라기의 대보운동시 암쇄작용을 받아 엽리가 발달되었다고 해석하였다.

본 연구의 대상이 되는 전주 엽리상 화강암체와 순창 엽리상 화강암체는 각각 옥천대 중안대와 남동대에 대략 서로 평행한 2조(條)를 이루며 북동-남서방향으로 대상 분포되어 있다 (Fig. 1).

전주 엽리상 화강암은 전주시를 중심으로 북동-남서방향으로 분포하는 저반상의 중립 내지 조립질의 화강암체로서 암상은 주로 엽리상 흑운모 화강암으로 이루어져 있으나 일부 엽리상 반상 화강암도 존재하고 있다. 이들은 지리산 편마암 복합체와 옥천층군을 관입하고 쥬라기 대보 화강암류와 반암류에 의해 관입되고 백악기의 능주층군, 진안층군 및 신라층군에 의해 부정합으로 덮여 있다 (Simamura, 1925). 이 화강암의 주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석과 흑운모이며 부성분광물로는 녹염석, 견운모, 스펀, 저어콘, 인회석과 불투명 광물 등이다. 본 암은 지화학적으로 칼크-알칼리 계열, I-type, 자철석 계열의 화강암에 속한다 (김용준 등, 1994). 전주 엽리상 화강암의 동위원소 연령자료는 현재까지 김옥준 (1971)에 의한 K/Ar 흑운모 연령 148~166 Ma, 김용준 등 (1994)에 의한 K/Ar 백운모 연령 164 ± 4 Ma가 보고되어 있어 쥬라기 말기를 나타내고 있다. 그러나 이 연대는 전주 엽리상 화강암을 중심으로 그 북서부를 폭넓게 관입하고 있는 대보화강암의 동위원소 연령 153~163 Ma (김옥준, 1971; 김용준 등, 1994)와 중복되고 있어 관입시기가 보다는 오히려 대보 화성활동의 영향에 의한 변성년대를 나타내고 있는 것으로 생각된다.

순창 엽리상 화강암은 순창지질도폭 (박희인, 1966)에서 순창 편상 화강암으로 명명된 암체의 북동 연장부에 속하는 암체로서 순창을 중심으로 북동-남서방향으로 대상 분포되어 있는 조립질 화강암질암이다. 암상은 흑운모

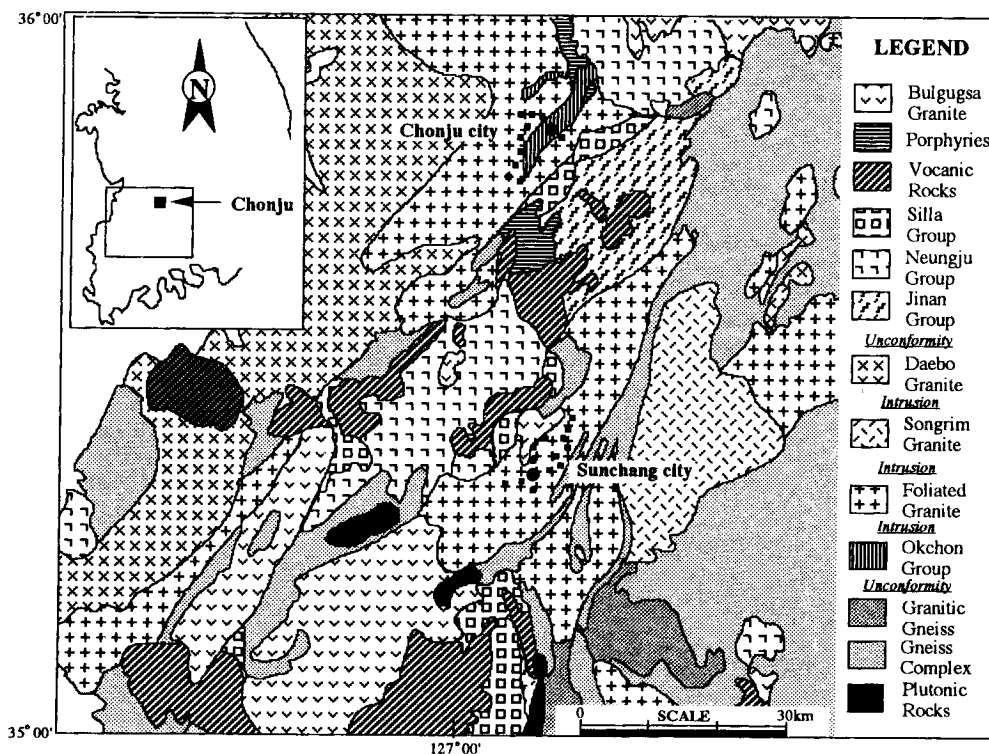


Fig. 1. Geologic map of the Chonju-Sunchang area (1:250,000 Chonju Geologic Map, 1973).

화강암질이 대부분을 차지하고 있으나 부분적으로 유백색의 장석반정을 불균질하게 함유하기도 하고 각섬석을 포함하기도 한다. 이 암체의 주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석과 흑운모이며 부성분광물로서 각섬석, 녹니석, 견운모, 스펀, 저어콘 및 불투명 광물 등을 포함하고 있다. 이들은 선캄브리아기의 흑운모 편마암, 고생대의 변성 퇴적암과 화강편마암을 관입하고 트라이아스기의 복운모 열리상 화강암, 남원 화강암, 주라기의 섬록암, 흑운모 화강암 및 백악기의 석영반암 등 화성암류에 의해 관입 당하고 있으며, 그 북부와 북서연부는 백악기의 퇴적암류에 의해 부정합으로 덮여 있다 (김용준 등, 1994). 순창 열리상 화강암 역시 전주 암체와 마찬가지로 칼크-알칼리계 열, I-type, 자철석 계열에 해당하는 지화학적 특성을 보였다 (김용준, 이창신, 1988; 김용준 등, 1989, 1994). 본암의 동위원소 연대는 주승환, 김성재 (1986)에 의한 Rb-Sr 전암연령 222 ± 5 Ma, Turek, Kim (1993)에 의한 U-Pb 저어콘 연령 183 ± 8 Ma, 김옥준 (1971), 김용준 (1986) 등에 의한 K/Ar 광물연령 $159 \sim 198.7 \pm 9.9$ Ma 등으로 트라이아스기 중기에서 주라기 말기까지의 분포를 보이고 있으나 관입시기는 트라이아스기의 송림 변동기로 보고 있다 (김용준 등, 1994).

시료준비 및 동위원소분석

전주 및 순창 지역에서 채취된 시료 중 가장 신선한 23개 (전주: 10개, 순창: 13개)의 시료를 대상으로 전암에 대해 Sm, Nd, Rb, 및 Sr의 정량분석과 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 및 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 동위원소 분석을 실시하였다. 또한 열변성사를 검토하기 위하여 일부 시료로부터 조암광물을 분리하고 각 광물의 Rb-Sr 동위원소 조성을 측정하였다. 각 시료의 채취 위치 및 암상 등을 Fig. 1과 Table 1에 나타냈다. 시료 채취는 도로의 절개지나 채석장 등에서 드러나 있는 신선한 노두만을 대상으로 하였으며, 전암의 동위원소 조성을 왜곡시킬 수 있는 국부적인 오염과 불균일성을 가능한 최소화하기 위해 한 지점의 시료는 1 m² 이상의 노두면에서 고르게 수개의 암편을 채취한 후 이를 혼합하는 방식으로 채취하였다.

전암시료는 채취된 암편을 증류수와 초음파 세척기로 수회 세척하고 건조한 다음, 입경 0.5 cm 이하로 파쇄하고 사분법에 의해 200 g 정도를 분취하여 아게이트 볼밀을 이용하여 200 mesh 이하로 분말화하여 준비하였다. 광물분리는 나머지 파쇄시료를 다시 10 mesh 이하로 파쇄한 다음 자선법과 수선법을 이용하여 수행하였다. 대부분의 운

Table 1. Rock type and map locations of the samples used in this study

No.	Rock type	Sheet name (1:50,000)	National Grid	Location**
CJ-1	FBGr.*	Chonju	260.3/231.8	Chonju-city/Inhu-dong
CJ-2	FBGr.	Chonju	261.5/241.0	Chonju-city/Ua-dong
CJ-3	FBGr.	Chonju	260.9/214.3	Chonju-city/Inhu-dong
CJ-4	FBGr.	Chonju	261.2/214.2	Chonju-city/Inhu-dong
CJ-5	FBGr. (pophyritic)	Chonju	249.3/204.4	Gimje-gun/Geumsan/
CJ-6	FBGr.	Chonju	245.8/205.2	Gimje-gun/Geumsan/
CJ-7	FBGr.	Chonju	247.3/205.9	Gimje-gun/Geumsan/
CJ-8	FBGr.	Chonju	251.4/205.9	Gimje-gun/Geumsan/Dogbae
CJ-9	FBGr. (weathered)	Chonju	255.8/209.8	Chonju-city/Samchon-dong
CJ-10	FBGr.	Chonju	246.5/204.5	Chonju-city/Samchon-dong
SC-1	FBGr.	Sunchang	216.4/210.7	Sunchang/Ingye/Jisan-ri
SC-2	FBGr.	Sunchang	216.5/210.2	Sunchang/Ingye/Oggyo-ri
SC-3	FBGr.	Sunchang	217.2/210.4	Sunchang/Jugseong/Jibuk-ri
SC-4	FBGr.	Sunchang	216.8/211.5	Sunchang/Jugseong/Jibuk-ri
SC-5	FBGr. (green)	Sunchang	217.0/213.2	Sunchang/Jugseong/Daesan-ri
SC-6	FBGr. (green)	Sunchang	218.2/214.0	Sunchang/Jugseong/Naewol-ri
SC-7	FBGr.	Sunchang	218.4/215.5	Sunchang/Jugseong/Suksan-ri
SC-8	FBGr.	Sunchang	215.5/210.3	Sunchang/Ingye/Jisan-ri
SC-9	FBGr.	Sunchang	210.1/208.2	Suchang-up/Backsan-ri
SC-10	FBGr.	Sunchang	213.7/214.3	Sunchang/Ingye/Magon-ri
SC-11	FBGr.	Sunchang	213.1/211.8	Sunchang/Ingye/Gabdong-ri
SC-12	FBGr.	Sunchang	212.5/210.8	Sunchang-up/Bogsil-ri
SC-13	FBGr. (lucco)	Sunchang	212.0/212.6	Suchang/Ingye/Doryong-ri

* FBGr.; foliated biotite granite, ** Gun (City)/Myeon (Dong)/Ri

모류는 견운모 혹은 녹염석 등의 열수변질 산물들과 공존하고 있어 이들을 완전히 분리하기는 어려웠다. 분리된 광물은 증류수와 초음파 세척기로 수회 세척하고 아게이트 몰타르로 분말화하였다.

전암 및 광물 분말시료의 용해는 혼합산 (HF + HNO₃ + HClO₄)를 용해법에 의해 수행되었으며, 각 원소의 분리는 일반적으로 이용되고 있는 양이온 교환 수지법 (Rb, Sr 및 REE그룹의 1차 분리)과 HPLC법 (Sm과 Nd분리)을 조합하는 방법으로 수행되었다 (Na *et al.*, 1995). 시료의 용해 및 원소의 분리과정은 오염의 가능성을 극소화하기 위하여 크린벤치 내에서 수행되었으며, 모든 산은 증류시켜 얻은 순수한 것만을 이용하였다.

⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 및 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd의 동위원소 조성은 표면 전리형 질량분석기 (Finnigan MAT262RPQ, nine Faraday cup collectors)를 이용하여 static mode로 분석하였다. Sr (Rb)은 인산염 형태로 Ta single filament에, Nd (Sm)는 질산염 형태로 Re double filaments에 각각 부착시켜 분석하였다. 측정된 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 및 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd비는 ⁸⁶Sr/⁸⁶Sr비 8.375209와 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd비 0.7219로 각각 표준화하였다. 분석 기간 중 반복 측정된 NBS987SRM 표준시료의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비는 0.710237±10 (2σM), LaJolla Nd 표준시료의 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd비는 0.511854±9 (2σM)이었다. Rb과 Sr 및

Sm과 Nd의 정량은 각각 XRF (Philips, Cu-target tube, LiF220 crystal) 및 HPLC로 일차 분석한 후 그 결과를 토대로 동위원소 회석법 (DePaolo, 1981)에 의해 재분석되었다. 각각의 분석오차는 Sm/Nd 및 Rb/Sr비가 ±0.3%, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비가 ±0.005% (1σ), ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd비가 ±0.003% (1σ)로 평가되었다.

분석결과

Rb-Sr 동위원소 조성

전암과 그들로부터 분리한 광물의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비 및 Rb과 Sr의 정량분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 전주 엽리상 화강암과 순창 엽리상 화강암의 전암에 대한 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 분석치는 각각 0.7112~0.7173과 0.7157~0.7194의 범위로 순창암체가 전주암체에 비해 높은 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비를 보였다. 한편 Rb과 Sr의 정량분석 결과로부터 계산된 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr비는 전주가 0.481~1.919, 순창이 0.546~1.146의 범위를 보여 오히려 순창암체가 전주암체에 비해 낮고 한정된 분포경향을 보였다. 각 암체의 전암 및 각 시료의 전암과 분리된 광물로부터 얻어진 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr과 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr의 관계도를 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 직선

Table 2. Rb-Sr analytical results for the Chonju and Sunchang foliated granites.

No.	Sample Type	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr±2σ (m)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr
Chonju Foliated granite					
CJ-1	Whole-rock	0.711201±0.000006	88.2	530.4	0.481
CJ-2	Whole-rock	0.711401±0.000008	103.2	558.8	0.535
CJ-3	Whole-rock	0.711199±0.000012	93.0	553.2	0.492
	Biotite	0.713418±0.000012	210.4	347.8	1.752
CJ-4	Feld.+Qtz.	0.710702±0.000016	57.1	770.0	0.215
	Whole-rock	0.711244±0.000010	91.9	512.4	0.519
CJ-5	Whole-rock	0.717227±0.000010	164.9	302.0	1.581
CJ-6	Whole-rock	0.715470±0.000007	184.0	348.6	1.537
CJ-7	Whole-rock	0.717087±0.000009	191.8	289.4	1.919
CJ-8	Whole-rock	0.713105±0.000007	130.9	407.6	0.930
	Biotite	0.739119±0.000014	595.0	123.6	13.968
CJ-9	Whole-rock	0.713392±0.000009	156.3	388.6	1.165
	Biotite	0.721834±0.000010	445.9	229.1	5.639
CJ-10	Whole-rock	0.713259±0.000008	138.3	437.2	0.916
	Biotite	0.723680±0.000012	471.9	215.4	6.348
	Feld.+Qtz.	0.712163±0.000011	73.8	415.6	0.514
Sunchang Foliated granite					
SC-1	Whole-rock	0.716176±0.000009	123.1	460.5	0.774
SC-2	Whole-rock	0.715753±0.000008	113.5	602.1	0.546
	Biotite	0.718759±0.000009	276.9	427.6	1.876
	Feldspar	0.716409±0.000009	235.1	724.8	0.939
SC-3	Whole-rock	0.715700±0.000007	112.4	544.4	0.598
SC-4	Whole-rock	0.716079±0.000009	106.4	493.3	0.625
	Biotite	0.722586±0.000007	421.1	318.4	3.832
SC-5	Whole-rock	0.716192±0.000008	124.3	535.0	0.673
	Biotite	0.726105±0.000009	461.5	239.9	5.575
SC-6	Whole-rock	0.717178±0.000011	155.4	398.6	1.129
SC-7	Whole-rock	0.716464±0.000010	142.5	517.8	0.797
	Biotite	0.730543±0.000006	479.7	184.1	7.556
	Feldspar	0.716451±0.000007	230.5	850.8	0.785
SC-8	Whole-rock	0.716397±0.000009	157.8	500.5	0.913
SC-9	Whole-rock	0.718154±0.000010	114.8	457.9	0.726
SC-10	Whole-rock	0.717663±0.000009	85.3	521.5	0.474
	Biotite	0.718726±0.000011	133.7	365.6	1.059
	Feldspar	0.720268±0.000007	300.7	568.6	1.532
SC-11	Whole-rock	0.717476±0.000014	107.8	530.3	0.589
SC-12	Whole-rock	0.718717±0.000009	139.7	431.5	0.939
	Biotite	0.728880±0.000006	428.9	183.8	6.767
	Feld.+Qtz.	0.725585±0.000007	234.1	175.1	3.875
SC-13	Whole-rock	0.719382±0.000011	138.1	349.2	1.146

* Ratios are normalized to ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr=8.375209.

적 배열로부터 기울기와 Y축절편은 York (1969)와 Kullerud (1991)에 의해 제시된 직선회귀방정식을 이용하여 계산했으며, 각 회귀직선의 기울기로부터 87Rb의 붕괴상수 $1.42 \times 10^{-11}/\text{yr}$ (Steiger and Jager, 1977)를 이용하여 연령을 산출하였다.

진주 엽리상 화강암에 대한 전암등시선 (whole-rock isochron)은 10개의 전체 시료 중 직선적 배열로부터 뚜렷하게 벗어나는 2개의 시료 (CJ-5와 CJ-9)를 제외한 나머지

를 이용하여 작성되었다. 이 등시선으로부터 $284 \pm 12 \text{ Ma}$ 의 연령과 0.7092 ± 8 의 초기 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비 (이하 Sr초생값이라 함)가 얻어졌다. 만일 제외된 두 개의 시료가 보여주는 편차를 무시하고 이를 포함시킬 경우는 $300 \pm 17 \text{ Ma}$ 와 0.7093 ± 23 의 연령과 Sr초생값이 얻어진다. 그러나 이 연령은 뚜렷하게 벗어나는 두 개의 시료에 의해 왜곡되었기 때문에 어떠한 지질학적 의미도 부여하기 어렵다. 또한 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비가 서로 다른 4개의 전암에서 분리된 장석류 및

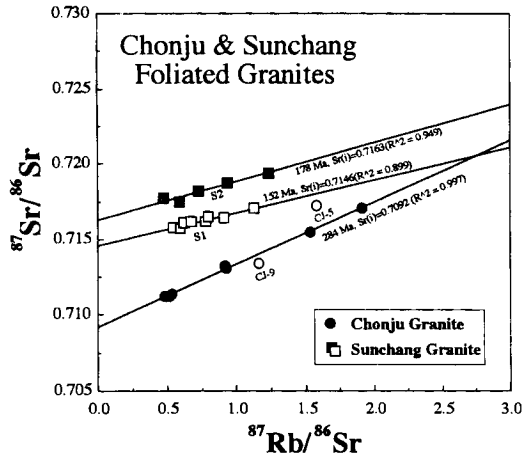


Fig. 2. Rb-Sr isochron diagram including all whole-rock analyses for the Chonju and Sunchang foliated granites. Open circles represent data not used. Errors do not exceed size of symbols.

운모류의 Sr동위원소 조성을 각 시료별로 전암과 조합시켜 얻어진 광물등시선 (mineral isochron)들은 각 전암의 Sr동위원소비와 매우 조화적으로 전암등시선에 비해 낮은 기울기를 가지고 서로 대략 평행하게 배열되는 경향을 보였다 (Fig. 3 (a~c)). 이들로부터 계산된 광물연대는 112~140 Ma로 김옥준 (1971)에 의해 제시된 K-Ar 혹은 운모 연령에 비해 다소 낮은 연령범위를 보였다. 또한 각각의 광물등시선으로부터 산출된 Sr 초생값은 0.7103에서 0.7113으로 시료에 따라 다양하였으며 각 시료의 전암에서 보여지는 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비 및 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비와 정의 상관성을 보이는 특성을 보였다 (Fig. 4). 이러한 특성은 전주 열리상 화강암의 Rb-Sr계가 추라기의 대보 화성활동에 의한 영향으로 광물적 차원에서 재평형화되었음을 시사하고 있다.

순창암체는 동일암체에서 채취된 시료임에도 불구하고 두 집단으로 나누어짐이 특징적이다. 즉 순창암체의 전암 등시선은 거의 같은 범위의 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비와 20오차 한계 내에서 중복되는 기울기, 그러나 뚜렷이 다른 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비를 갖는 두 집단으로 나누어진다 (Fig. 2). 각 집단을 구성하는 시료의 공간적 분포는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 양 집단은 순창시를 중심으로 동서로 나뉘어 분포하는 공간적 분포특성을 보였다. 즉 동쪽지역의 시료는 집단 I에, 서쪽지역의 시료는 집단 II에 속하는 Sr동위원소적 특성을 보였다. 각 집단의 Sr 초생값과 연령은 0.7146과 152 ± 17 Ma (집단 I), 0.7163과 178 ± 16 Ma (집단 II)로 계산되어 대략 거의 유사한 전암연령과 매우 다른 Sr초생값을 갖는다. 이들 두 집단간에 보여지는 Sr초생값의 차이를 설명하기 위해서는 보다 세밀한 지질조사 및 Sr동위

원소적 자료가 요구되고 있지만 일반론에 비추어 볼 때에는 아마 근원물질 혹은 오염원에 의해 야기될 수 있는 성인적 차이 또는 불균질성을 반영한 결과일 것으로 추측된다. 또한 집단 I과 집단 II로부터 각각의 전암과 분리된 광물에 의해 작성된 광물등시선은 Sr초생값과 광물연령에서 각각 0.7144~0.7148, 142~162 Ma와 0.7164~0.7171, 123~171 Ma로 나타나 (Fig. 3d~e) 각 집단의 전암등시선과 거의 중복되었다. 따라서 순창암체의 전암과 광물의 Rb-Sr계는 대체로 일단계적 ^{87}Sr 진화 (one-stage ^{87}Sr evolution)의 경향에 가까운 거동을 보인다. 순창 열리상 화강암체에서 채취된 모든 전암과 광물들을 조합하여 등시선을 작성할 경우 (Fig. 3f), 집단 I은 Sr초생값 0.7147과 연령 146 Ma의 등시선을, 집단 II는 0.7166과 164 Ma의 등시선을 각각 형성하였다.

Sm-Nd 동위원소 조성

전주 및 순창 열리상 화강암에 대한 전암의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비, Sm과 Nd의 함량 그리고 각 함량과 동위원소 조성으로부터 계산된 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 비를 Table 3에 나타냈으며, 각 암체에 대한 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 대 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 관계를 Fig. 6에 나타냈다. Rb-Sr계와는 달리, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 대 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 관계는 모두 분산되는 경향을 보여 양자간의 직선적 관계를 찾기 어려웠다. 따라서 Sm-Nd계를 이용한 관입연대의 추정은 불가능하였다. 대상암체에서 볼 수 있는 Nd동위원소 조성의 불균질성은 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비가 대상암체가 형성되는 동안 동위원소적으로 균질화되지 않았음을 의미하며 또한 대상암체를 형성한 마그마가 마그마 챔버에서 동위원소적으로 충분히 균질화될 수 있을 정도로 긴 시간 동안 체류하지 않았거나 마그마의 이동시 주변모암의 국부적인 재용융에 의한 오염원의 유입이 일어났을 가능성을 강하게 시사한다. 또 하나의 특징은 양 암체가 매우 한정적인 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 비를 가지고 있다는 점이다. 즉 전주 및 순창암체에서의 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 비는 최소 0.086에서 최대 0.135로 매우 좁은 변화 폭을 보여 마그마가 분화되는 과정에서 Sm과 Nd가 유의하게 분별되지 않았음을 보인다. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비에서는 전주암체가 0.51150~0.51168의 범위로 평균과 표준편차가 0.511627 ± 0.000058 인 반면 순창암체는 0.51153~0.51170의 범위와 0.511605 ± 0.000047 의 평균과 표준편차를 보여 전주암체와 대부분 중복되면서도 약간 낮은 경향을 보였다. 양 암체에서 보여주는 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 순창 열리상 화강암에서 제시된 Sr 전암연령 220 Ma (주승환, 김성재, 1986)의 CHUR 및 DM (depleted mantle)의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비 0.512355와 0.512794에 비해 훨씬 낮은

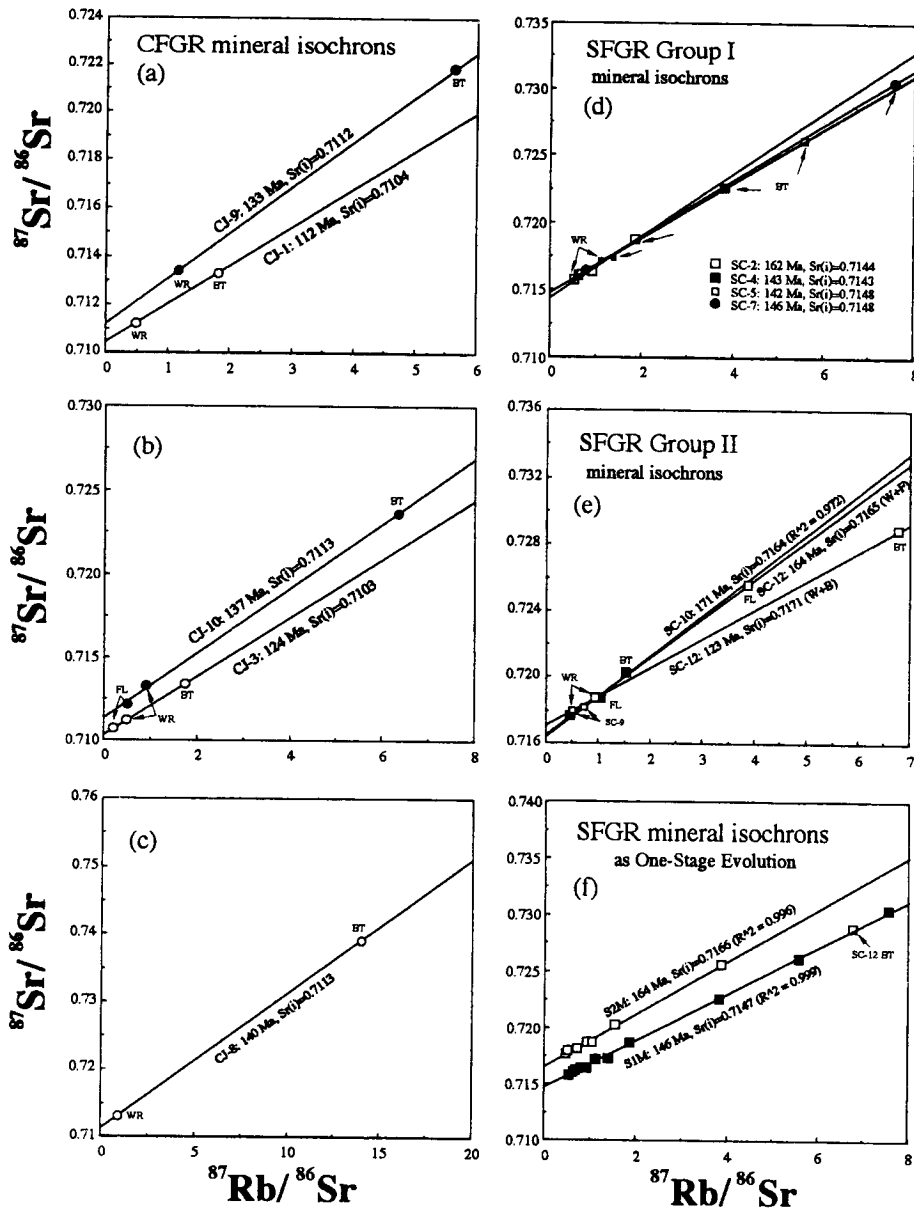


Fig. 3. Mineral isochron diagrams for the Chonju and Sunchang foliated granites.

값으로 양 암체를 형성한 근원 마그마가 직접 맨틀로부터 유래하지 않았음을 강하게 시사하고 있다.

고찰 및 토의

열리상 화강암의 관입시기

일반적으로 Rb-Sr 등시선이라고 일컫는 전암의 직선적

배열로부터 추산되는 Rb-Sr 연령은 그 암체가 동원 마그마로부터 분화되었고 관입고결후 전암적 차원에서 폐쇄계가 유지되어야 한다는 전제조건을 만족시킨다면 그 암체의 관입연령으로 해석된다. 그러나 비록 이러한 전제조건이 충분히 만족되었다 할지라도 동일 마그마의 분별결정화 과정에서 생성된 각각의 광물로부터 얻어진 연령이 광물간은 물론 전암연령과도 서로 일치되어야 할 필요는 없다. 이러한 불일치는 단순히 각 광물의 고결온도의

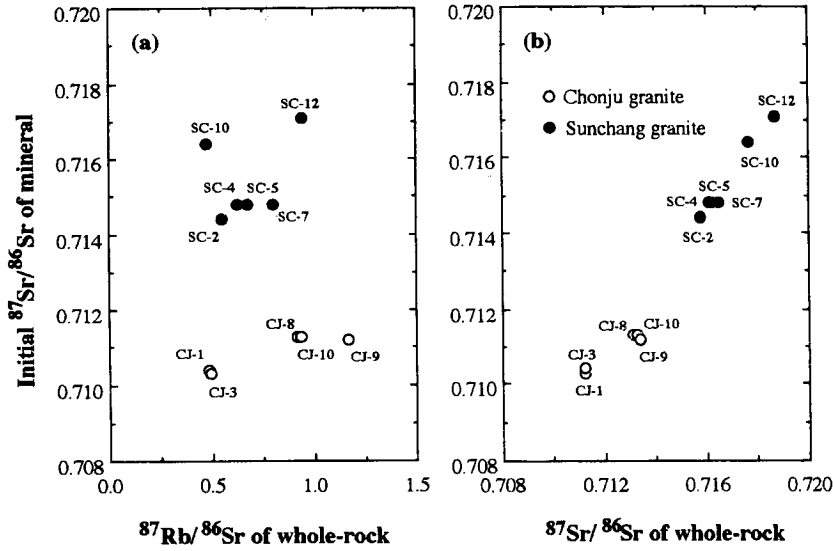


Fig. 4. Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of mineral isochrons versus $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ratios (a) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (b) of each corresponding whole rock. The good correlation is characteristic of metamorphic rocks in which two-stage Sr isotopic evolution occurs.

차를 반영한 결과 (cooling age)이거나 혹은 관입후 일어난 여러 가지 변성작용에 의해 기인될 수 있다 (metamorphic age).

전주 엽리상 화강암에서 보여지는 Rb-Sr 전암등시선과 사장석-전암-흑운모의 조합에 의한 광물등시선에 보여지는 연령차이는 상기의 일반적 이론을 극단적으로 보여주고 있다. 전주암체에 상기의 이론을 그대로 적용한다면 전주암체는 폐름기 (284 Ma)에 관입되었으며 주라기 및 백악기 초기 (112~140 Ma)의 열변성작용과 열수변질작

용 등의 영향으로 광물의 Rb-Sr계가 재평형화되었다고 해석할 수 있다. 이러한 해석은 본 암에 녹니석이나 견운모 등 열수변질 광물들이 다량 존재하고 있다는 사실과 잘 부합된다. 즉, 이러한 열수변질과정은 그 과정에서 관여되는 열 또는 열수용액에 의해 각 광물들이 가지고 있던 원래의 Rb-Sr계를 교란시켰을 것이며 또한 적정 범위의 전암과 재평형이 이루어지므로써 광물의 Rb-Sr계를 왜곡 (distortion)시켰을 것으로 추측된다. 이렇게 후기 화성활동에 의해 광물적 차원에서만 재평형화가 이루어진 암체의 Rb-Sr 광물등시선의 Sr 초생값은 이론적으로 변질 당시 각 전암의 평균 Sr동위원소비를 나타낼 것이다. 따라서 각 전암시료의 Sr동위원소비 또는 Rb/Sr비와 각 시료의 광물등시선에서 얻은 Sr 초생값은 서로 양의 상관관계를 갖게 될 것이다. 이러한 관계는 이미 언급한 바와 같이 전주암체에서 매우 잘 나타나고 있어 (Fig. 4) 전주 엽리상 화강암에서 얻어진 광물의 Rb-Sr 연령은 후기 화성활동의 영향으로 재평형화된 연령임을 입증하고 있다.

한편 순창 엽리상 화강암의 경우, 분리된 광물의 대부분이 전주암체에 비해 보다 더 변질된 특징을 보일 뿐만 아니라 기존 엽리구조를 가로질러 관입되어 있는 석영세맥이 관찰되는 등 후기 열수변질작용에 의해 심하게 영향을 받았을 것으로 예상됨에도 불구하고 전암과 광물의 Rb-Sr등시선이 거의 일치하는 경향을 보이고 있어 광물적 차원뿐만 아니라 전암적 차원에서도 Rb-Sr계가 교란되었음을 시사하고 있다. 많은 기존 연구 결과에서 Rb-

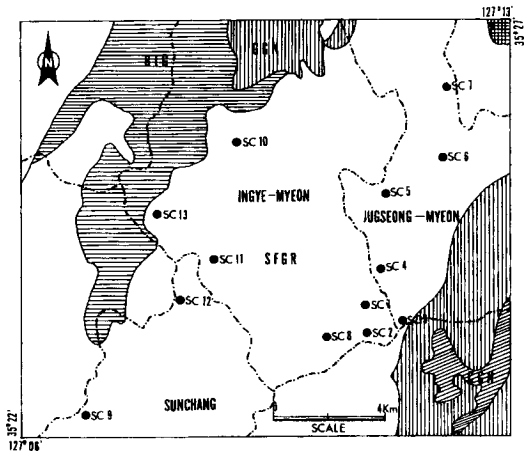


Fig. 5. Detailed sample locations of group I and group II in the Sunchang foliated granitic area. SFGR; Sunchang foliated granite, BIG; Biotite granite, GGN; Granitic gneiss, CGN; Contaminated granitic gneiss (Park, 1966).

Table 3. Sm-Nd analytical results for the Chonju and Sunchang foliated granites.

No.	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma(m)$	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$
Chonju Foliated Granite				
CJ-1	0.511674 ± 0.000009	3.41	23.41	0.089
CJ-2	0.511680 ± 0.000009	3.43	23.89	0.087
CJ-3	0.511630 ± 0.000006	3.19	22.30	0.087
CJ-4	0.511717 ± 0.000007	3.15	20.68	0.093
CJ-5	0.511502 ± 0.000009	4.11	20.21	0.124
CJ-6	0.511599 ± 0.000008	3.70	23.89	0.094
CJ-7	0.511625 ± 0.000009	3.78	21.40	0.108
CJ-8	0.511601 ± 0.000009	3.42	22.44	0.093
CJ-9	0.511633 ± 0.000009	3.24	18.41	0.107
CJ-10	0.511609 ± 0.000009	2.51	16.75	0.091
Sunchang Foliated Granite				
SC-1	0.511625 ± 0.000006	3.46	19.05	0.111
SC-2	0.511636 ± 0.000010	2.16	12.43	0.106
SC-3	0.511618 ± 0.000009	4.78	29.11	0.100
SC-4	0.511701 ± 0.000008	3.33	23.14	0.088
SC-5	0.511654 ± 0.000009	2.69	16.63	0.098
SC-6	0.511616 ± 0.000008	5.04	25.56	0.120
SC-7	0.511592 ± 0.000008	5.47	32.32	0.103
SC-8	0.511603 ± 0.000007	11.09	72.65	0.092
SC-9	0.511544 ± 0.000008	3.61	25.55	0.086
SC-10	0.511546 ± 0.000008	4.69	27.60	0.103
SC-11	0.511621 ± 0.000010	3.05	13.71	0.135
SC-12	0.511535 ± 0.000009	3.74	21.57	0.106
SC-13	0.511580 ± 0.000008	2.65	15.22	0.106

* Ratios are normalized to $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$

Sr법에 의해 측정된 전암연령이 그들의 관입연령에 비해 매우 젊은 연령을 나타내고 있음이 지적된 바 있다. Rb-Sr계에 의한 전암연령을 체계적으로 낮출 수 있는 메커니즘은 아직 명확히 밝혀지지 않고 있지만, 이러한 현상에 대한 원인으로서는 풍화작용과 후 마그마 작용이 제시되고 있다. 즉, 풍화를 받은 화강암의 Rb-Sr 전암연령은 신선한 암체에 비해 20%이상 낮아질 수 있음이 보고된바 있다 (Fullagar, Ragland, 1975; Clauer *et al.*, 1982). 그러나 풍화작용에 의한 연령 감소 현상은 불규칙하고 분산되는 경향을 보이는 것이 일반적인 특징이다. 한편 후 마그마 작용 (late or post magmatic processes)에 의한 연령 감소 현상은 Brooks *et al.* (1968), Wendt *et al.* (1970), Darch (1978), Compston *et al.* (1982), Schleicher *et al.* (1983) 등에 의해 지적되었으며 풍화작용과는 달리 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 대 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 관계를 여전히 직선적으로 유지시키면서 기울기는 낮아지고 초기값은 높아지는 경향으로 Rb-Sr계를 왜곡시킴이 특징적이다. 이 같은 경향을 "Rotating of the isochron"이라 하며 그 주된 메커니즘으로서 Brooks (1968)는 사장석의 변질산물과 K-장석사이

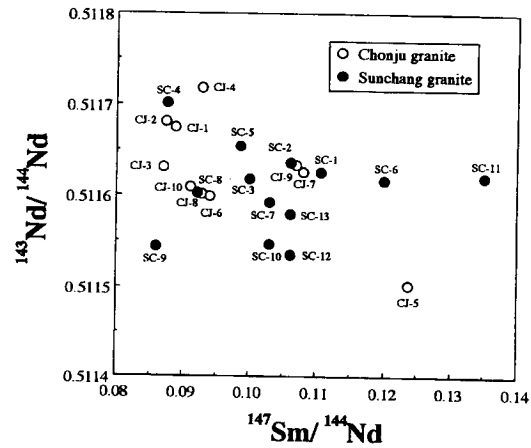


Fig. 6. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ correlation diagram for the Chonju and Sunchang foliated granites. No isochron can be drawn from the experimental data.

서 일어나는 Rb과 Sr의 교대작용을, Schleicher *et al.* (1983)은 암석 내에서의 autohydrothermal transformations, 또는 장기간에 걸쳐 암석-지하수간에 일어나는 교대작용으로 인한 ^{86}Sr 의 손실 등을 들고 있다. 순창암체에서 보여지는 낮은 전암연령 역시, 비록 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비가 매우 좁은 범위를 보여 불분명하지만, 상기와 같은 과정에 의해 왜곡된 결과일 가능성을 배제하기 어렵다. 결과적으로 본 연구에서 구한 순창암체의 전암연령에 어떠한 지질학적 의미를 부여하기는 매우 어려울 것으로 판단된다. 따라서 순창 엽리상 화강암의 전암 및 팽몰을 대상으로 수행한 Rb-Sr연대측정법에 의해 관입연대를 추정하는 데는 실패하였다. 하나 주목할 만한 사실은 순창암체의 관입연대로 널리 받아들여지고 있는 주승환, 김성재 (1986)의 Rb-Sr 전암분석값이 본 연구의 대상시료중 높은 Sr동위원소비를 갖는 집단 II와 거의 동일 선상에 도시된다는 점이다 (Fig. 7). 주승환, 김성재 (1986)의 Rb-Sr 자료 중 타 시료에 비해 매우 큰 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비를 보여 직선 회귀에 많은 영향을 미치는 한 개의 시료를 제외하고 나머지 시료를 이용하여 등시선을 재작성한 결과 243 Ma의 연령이, 이 자료를 본 연구에서 얻은 집단 II 자료와 조합시켜 등시선을 작성한 결과 252 Ma의 연령이 각각 얻어졌다. 또한 조합등시선을 높은 Sr동위원소비 집단과 낮은 동위원소 집단으로 세분한 후 집단별로 직선회귀시킨 바 각각 237 Ma와 226 Ma에 상응하는 등시선이 얻어졌다 (Fig. 7). 그러나 이들 연령 역시 자료의 높은 분산도 때문에 신뢰성 있는 지질연대로서 받아들이기는 어려울 것으로 판단되지만, 이상의 자료를 종합해 볼 때 순창 엽리상 화강암은 관입 후 수차례에 걸친 후기 화성활동에 의

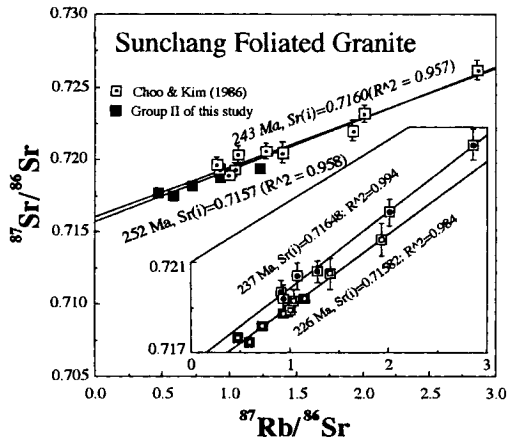


Fig. 7. Reconstructed Rb-Sr isochrons for the Sunchang foliated granites. 243 Ma is reestablished with data from Choo, Kim (1986) by omission of one sample point with significantly higher $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ than the others. 252 Ma is calculated with combined data from Choo, Kim (1986) and group II in this study.

해 매우 강하게 영향을 받아 광물은 물론 일부 전암의 Rb-Sr계조차 교란되었을 것으로 판단되며, 관입연대는 적어도 전주암체 (284 Ma)나 청산암체 (258 Ma)와 유사한 시기로 재조정되어야 할 것으로 생각된다.

화강암질 마그마의 기원

전주 및 순창 엽리상 화강암류는 기존의 모든 암석지화학 연구에서 주성분 원소 화학적으로 I-type로 분류되고 있어 (김정빈, 김용준, 1988; 김용준, 이창신, 1988; 김용준 등, 1989, 1994), 이들 화강암류를 형성시킨 마그마의 기원이 화성 기원임을 나타내고 있다. 한편 주승환과 김성재 (1986)의 연구나 본 연구에서 얻어진 엽리상 화강암류의 Sr 초생값은, 비록 각 암체의 정확한 관입연대에 대해 논란의 여지는 있지만, 전주암체가 0.7092, 순창암체가 >0.7157로 모두 I/S-type 분류기준인 0.708 (Chappell and White, 1974)보다 높은 값을 보여 S-type으로 분류되었다. 이처럼 주성분 원소 화학적으로는 화성 기원적 특성을, 동위원소 화학적으로는 퇴적 기원적 특성을 보인다는 사실은 이들 화강암류가 화성암질 지각물질의 재용융 또는 부분용융작용에 의해 형성된 마그마로부터 유래되었으며 마그마의 생성과정에서 Sr동위원소 조성이 재평형화되었음을 시사하고 있다.

엽리상 화강암류의 성인을 고찰하는데 있어, 높은 Sr 초생값과 함께 또 하나 주목할 만한 사실은 이들 암류가 매우 낮은 Nd 동위원소비를 가지고 있다는 점이다. 일반적인

으로 지각물질의 Sr동위원소 조성은, 마그마 분화 과정은 물론 지각 내에서 일어나는 모든 진화과정에서 Rb이 Sr에 비해 다양하게 부화될 수 있기 때문에, 시간보다는 오히려 암석학적 차이나 지각내 수직적 위치 등에 의해 지배된다. 반면 희토류 원소 (REE)에 속하는 Sm과 Nd는 서로 유사한 화학적 성질과 매우 낮은 이동성을 가지고 있어 정상적인 지각내 진화과정에서 거의 분별작용이 일어나지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 지각물질의 Sm-Nd계는 거의 시간만을 함수로 하여 진화하므로 지각물질이 맨틀로부터 최초로 분리된 시기를 추정하는데 있어 매우 유용한 척도로 이용되고 있다 (McClulloch, Wasserburg, 1978; DePaolo, Wasserburg, 1979). 즉 암석의 Nd 동위원소 조성은 지각물질로서 진화시간이 길어지면 길어질수록 점차 낮아지며 맨틀과의 상대적인 값은 점차 커진다. 전주 및 순창 엽리상 화강암에서 측정되어진 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 및 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비를 맨틀에 대한 상대값 (ϵ)으로 환산하여 Table 4에 나타냈다. ϵ 계산에서 현재 맨틀의 평균값으로는 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)UR=0.7045, ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)UR=0.0839, ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)CHUR=0.512638, ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)CHUR=0.1967을 (Wasserburg *et al.*, 1981; Jacobsen and Wasserburg, 1980), 87Rb 및 ^{147}Sm 의 붕괴상수로는 $1.42 \times 10^{-11}/\text{yr}$ (Steiger and Jager, 1977)과 $6.54 \times 10^{-12}/\text{yr}$ (Lugmair and Marti, 1978)을 각각 이용하였다. Table 4에서 볼 수 있듯이 전주 및 순창암체의 ϵ_{Nd} 는 각각 -16.13 ± 1.47 과 -17.17 ± 1.01 의 범위로 매우 크고 한정된 음의 값을 가지고 있어 이들의 성인에 비교적 균질하고 매우 진화된 Nd 동위원소 조성을 갖는 고지각물질이 주된 근원암으로 작용했음을 나타내고 있다. 각 암체의 지각 진화 시간을 추정하기 위하여, 각 암체에서 측정된 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비를 상부 맨틀 (depleted mantle)의 진화곡선에 회귀시키는 Sm-Nd 모델연대 (TDM)를 계산해 본 결과, 전주암체가 1.62~2.49 Ga (1.83 ± 0.25 Ga), 순창암체가 1.60~2.22 Ga (1.96 ± 0.19 Ga)의 지각연령을 보였다. 여기서 상부 맨틀의 진화곡선은 현재 상부맨틀의 평균값으로 제시된 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)DM=0.513114과 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$)DM=0.222를 이용하여 작성하였다 (Turpin *et al.*, 1990). 이 모델연령은 지각이 맨틀로부터 분리된 후 Sm과 Nd가 거의 분별을 일으키지 않고 지각진화 초기의 Sm/Nd비가 현재까지 유지되어 왔다는 가정 하에서 이루어진 일단계 모델연령 (one-stage model age)이다. 그러나 Farmer, DePaolo (1983)는 지각물질의 부분용융에 의해 생성된 화강암질 마그마의 경우 상당한 Sm-Nd 분별작용이 일어날 수 있기 때문에 측정치만을 이용하는 TDM은 실제 지각연령과 상당히 다를 수 있음을 지적하였다. 본 연구의 대상인 엽리상

Table 4. Calculated ϵ values and Sm-Nd model ages for the Chonju and Sunchang foliated granites.

	$\epsilon_{Sr}(0)$	$\epsilon_{Sr}(t)$	$\epsilon_{Nd}(0)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	$f_{(Sm/Nd)}$	Model age (Ma)	
						T_{DM}	T_{2DM}
Chonju Foliated Granite (t=284 Ma)							
CJ-1	95.12	72.37	-18.80	-14.90	-0.55	1642	1898
CJ-2	97.96	72.14	-18.69	-14.73	-0.56	1620	1888
CJ-3	95.09	71.73	-19.66	-15.70	-0.56	1673	1930
CJ-4	95.73	70.81	-17.97	-14.20	-0.53	1643	1828
CJ-5	180.65	94.81	-22.16	-19.53	-0.37	2489	2187
CJ-6	155.72	72.42	-20.27	-16.56	-0.52	1803	1989
CJ-7	178.67	73.43	-19.76	-16.54	-0.45	1976	1986
CJ-8	122.14	73.66	-20.23	-16.47	-0.53	1780	1982
CJ-9	126.22	64.27	-19.60	-16.36	-0.46	1956	1974
CJ-10	124.32	76.65	-20.07	-16.26	-0.54	1746	1968
Sunchang Foliated Granite (t=252 Ma)							
SC-1	165.73	130.66	-19.76	-17.00	-0.44	2029	1992
SC-2	159.73	136.29	-19.55	-16.63	-0.46	2200	2241
SC-3	158.98	132.89	-19.90	-16.79	-0.49	1863	1979
SC-4	164.36	136.90	-18.28	-14.78	-0.55	1599	1843
SC-5	165.96	136.06	-19.19	-16.04	-0.50	1796	1928
SC-6	178.54	125.43	-19.94	-17.48	-0.49	2230	2024
SC-7	169.82	133.59	-20.40	-17.40	-0.48	1943	2020
SC-8	168.87	126.73	-20.19	-16.82	-0.53	1762	1982
SC-9	193.81	161.21	-21.34	-17.79	-0.56	1755	2048
SC-10	186.85	167.09	-21.30	-18.31	-0.47	2009	2082
SC-11	184.19	158.57	-19.84	-17.87	-0.31	2222	1755
SC-12	201.89	158.41	-21.52	-18.59	-0.46	2059	2101
SC-13	211.24	155.82	-20.64	-17.73	-0.46	2008	2042

$$* \epsilon_{Sr}(t) = \left(\frac{(^{87}Sr/^{86}Sr)^t}{(^{87}Sr/^{86}Sr)^0} - 1 \right) \times 10^4, \quad \epsilon_{Nd}(t) = \left(\frac{(^{143}Nd/^{144}Nd)^t}{(^{143}Nd/^{144}Nd)^0} - 1 \right) \times 100$$

$$* f_{Sm/Nd} = \left(\frac{(^{147}Sm/^{144}Nd)_{meas}}{(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR}} \right) - 1$$

$$* T_{DM} = \frac{1}{\lambda_{Sm}} \cdot \left(+ \left(\frac{(^{143}Nd/^{144}Nd)_{meas} - (^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM}}{(^{147}Sm/^{144}Nd)_{meas} - (^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM}} \right) \right)$$

$$* T_{2DM} = T_{DM} - \left\{ (T_{DM} - T_{melting}) \cdot \left(\frac{f_{crust} - f_{meas}}{f_{crust} - f_{DM}} \right) \right\}, \quad f_{crust} = -0.39, f_{DM} = 0.12862$$

화강암류 역시 지각물질의 부분용융 또는 재용융에 의해 생성된 마그마에 그 기원을 두고 있고 계산된 T_{DM} 이 넓은 연령분포를 보인다는 점으로 미루어 상기와 같은 영향력을 전적으로 배제할 수 없을 것으로 생각된다. 따라서 모델연령을 계산하는데 있어 부분용융으로 인한 Sm-Nd 분별작용의 영향을 가능한 최소화할 수 있는 T_{2DM} 식, 즉 관입시기를 기준으로 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 비를 관입 이전은 지각의 평균값 0.12 (Peucat *et al.*, 1988; Liew, Hofmann, 1988) 를, 관입후부터는 실제 측정값을 각각 이용하는 이단계 모

델연령식 (Jacobsen, 1988)에 의해 각 암체의 지각연령을 추정해 본 바, 전주 엽리상 화강암 (284 Ma)이 1.83~2.19 Ga (1.96 ± 0.09 Ga), 순창 엽리상 화강암 (252 Ma)이 1.76~2.24 Ga (2.00 ± 0.12 Ga)의 연령분포를 보여 TDM에 비해 보다 한정되고 높은 연령분포를 보였다. 이러한 모델연령은 전주 및 순창 엽리상 화강암의 성인에 약 20억년 이전인 Proterozoic 시기에 맨틀로부터 분리되어 지각으로 진화된 지각물질이 매우 중요한 역할을 했음을 시사한다 (Fig. 8).

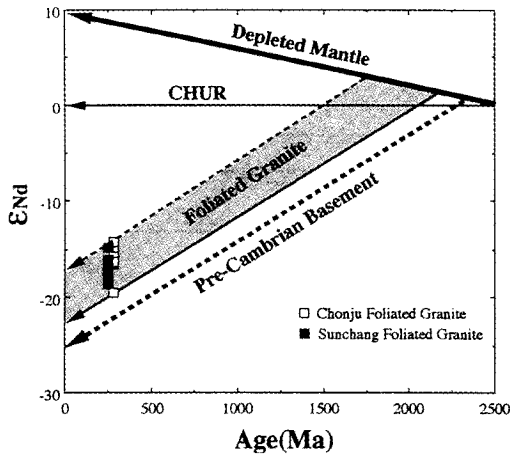


Fig. 8. Nd isotopic evolution diagram showing possible ranges of source ages derived from Sm-Nd model ages.

전주 및 순창 엽리상 화강암에서 보여지는 높은 ϵ_{Sr} 값과 낮은 ϵ_{Nd} 값은 이들 암류의 근원암인 고지각 물질을 규명하는데 있어 매우 중요한 특징이다. 현재까지 발표된 자료에 의하면, 비록 한정적이지만, 엽리상 화강암류에서 보여지는 Sr-Nd 동위원소적 특성을 만족시킬 만한 고지각 물질로서 한반도의 기반을 이루고 있는 선캠브리아기의 편마암 복합체가 가장 유력한 후보일 것으로 생각된다. 영남육괴를 구성하는 편마암 복합체의 Sr 동위원소 연령은 2090 Ma 전후로, Sr 초생값은 0.7089~0.7100으로 보고된바 있으며 (주승환, 김성재, 1986), 대략 0.5112~0.5115의 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 비를 가진다 (나춘기, 미발표 자료). 그러나 이들 편마암 복합체의 Sr 및 Nd 동위원소 조성을 엽리상 화강암류의 관입시기인 250~280 Ma 전후로 진화시킬 경우 엽리상 화강암류와 상이한 조성을 보여, 편마암 복합체의 순수한 재용융 과정에 의해서는 엽리상 화강암에서 보여지는 Sr과 Nd 동위원소 조성을 설명할 수 없었다. 따라서 엽리상 화강암의 Sr-Nd 동위원소 조성을 설명하기 위한 또 다른 방법으로 화성암류의 성인을 추적하는데 있어 널리 이용되고 있는 두 성분 즉 맨틀기원의 성분과 지각성분간의 혼합을 고려해 보았다. 이를 위하여 맨틀기원 성분으로서 향산리층에 협재되어있는 변성화산암 (250 Ma를 기준으로 $\epsilon_{Sr}=24.6$, $\epsilon_{Nd}=-0.93$)을, 지각성분으로서 곡성에서 채취한 화강암질 편마암 (250 Ma를 기준으로 $\epsilon_{Sr}=606$, $\epsilon_{Nd}=-24.05$)을 각각 단성분으로 이용하였다. Fig. 9는 전주 및 순창 엽리상 화강암의 ϵ_{Sr} - ϵ_{Nd} 관계도로 상기의 단성분을 이용하여 작성한 단순혼합곡선과 AFC곡선 (DePaolo, 1981)을 같이 표시하였다. 순창 및 전주 엽리상 화강암은 양 단성분의 단순혼합곡선상에 도시되지 않고 오히려 AFC혼합모델로

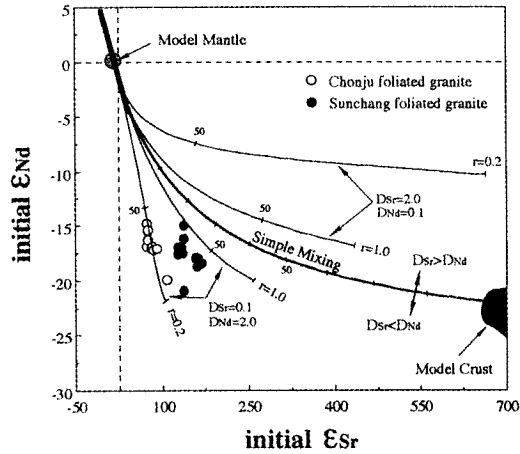


Fig. 9. $\epsilon_{Sr}(t)$ versus $\epsilon_{Nd}(t)$ plot of the foliated granites, showing simple mixing and AFC curves resulting from interaction between mantle-like component (meta-volcanics) and model crust (pre-Cambrian basement gneiss). The tick marks show the proportion of the crustal component in a mixture.

설명이 가능한 영역에 해당하는 좌하부에 도시되고 있어 이들 암류의 성인을 양 단성분의 단순혼합에 의해 설명할 수 없음을 나타내고 있다. 또한 이들 암류의 동위원소 조성을 양 단성분의 AFC혼합모델로 설명하기 위해서는 이들 암류의 마그마 혼화과정에서 Nd 분배계수 (D_{Nd})가 Sr 분배계수 (D_{Sr})에 비해 매우 커야 한다는 전제조건이 만족되어야만 한다. 그러나 대부분의 암석지화학적 관점에서는 $D_{Sr} > D_{Nd}$ 이 일반적으로, $D_{Sr} < D_{Nd}$ 은, 비록 Skjerlie (1992)에 의해 amphibole이 중요한 분별상이라고 한다면 가능하다고 주장된 바 있어 전적으로 배제할 수 없지만, 일반적으로 받아들이기 어려운 조건이다. 결과적으로 엽리상 화강암류의 성인을 한반도 상부지각의 기저를 이루는 편마암 복합체의 부분용융 또는 재용융과정으로 설명하기에는 많은 문제점이 있다고 판단된다. 아직 한반도 지각에 대한 Sr-Nd 동위원소 조성에 대한 자료가 극히 빈곤한 상태에 있어 또 다른 후보 근원암이 상부지각에 존재할 가능성 역시 전적으로 배제할 수 없지만, 현 자료로서 판단할 경우, 엽리상 화강암의 성인에 관여된 고지각 물질을 상부지각보다는 오히려 상부지각에 비해 ϵ_{Sr} 이 훨씬 낮은 값 ($\epsilon_{Sr} < 80$)을 갖는 것으로 알려진 지각성분으로 보는 것이 보다 타당할 것으로 생각된다.

이상의 결과를 종합해 보면 전주 및 순창 엽리상 화강암은 Nd 동위원소 조성으로 양 암체 모두 대략 20억년 전 후에 맨틀로부터 분리되어 한반도의 지각을 구성하고 있는 화성암질 암류의 재순환 과정에 그 기원을 두고 있는 화강암질 마그마로부터 분화된 산물임을 알 수 있었으며,

Sr 동위원소 조성에서 양 암체는 마그마의 발생위치, 근원모암의 암상, 주변모암의 혼입 또는 동화율 등에서 서로 상이한 마그마 진화과정을 거쳤음을 추정할 수 있었다. 또한 양 암체의 Sr과 Nd 동위원소 조성을 조합시켜 볼 때 이들 암체의 주된 근원암은 상부 지각물질보다는 오히려 하부 지각물질일 가능성이 더 높았다.

결 론

전주 및 순창 지역에 분포하는 열리상 화강암체의 Rb-Sr 동위원소계와 Sm-Nd 동위원소계를 중심으로 각 암체의 관입연대 및 성인을 추적한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전주 열리상 화강암은 전암에서 284 ± 12 Ma, 광물에서 $112 \sim 140$ Ma의 Sr 방사성 연대를 보여 폐름기에 관입된 후 주라기의 열변성작용에 의해 광물의 Rb-Sr계가 재평형화되었음을 시사한다.
2. 순창 열리상 화강암의 Rb-Sr계는 전암과 광물이 서로 일치하는 일단계적 ^{87}Sr 진화특성을 보였으며 동일암체임에도 불구하고 146 Ma (Sr 초생값=0.7147)와 164 Ma (Sr 초생값=0.7166)에 상응하는 두 개의 선형적 배열을 보였다. 이러한 특성은 순창암체의 Rb-Sr계가 광물 규모에서는 물론 전암규모에서도 후기 화성 활동에 의해 교란되었음을 나타냄과 동시에 성인적으로 서로 다른 근원 마그마의 존재 가능성을 강하게 시사한다.
3. 순창암체의 전암에 대한 Rb-Sr 동위원소 자료의 재검토 및 기존 자료와 본 연구 자료의 조합에 의해 재구성된 등시선은 243 Ma와 252 Ma를 각각 나타내었다. 이들 연령은 자료의 높은 분산도 때문에 관입연대로서 그 신뢰성을 부여하기는 어렵지만 적어도 순창암체의 관입연령이 현재 알려진 222 Ma보다는 이전일 가능성을 매우 높게 하고 있다.
4. 전주 및 순창암체의 초기 ϵ_{Sr} 값은 64.27~94.81 및 125.43~167.09의 범위를 각각 보여 순창암체가 전주암체에 비해 부화된 ^{87}Sr 을 갖는 성분에 의해 영향을 받았음을 보인다.
5. 초기 ϵ_{Nd} 값은 전주암체가 -14.73~-19.53, 순창암체가 -14.78~-18.59로 거의 중복되면서도 전주에 비해 순창이 약간 낮은 경향을 보여 ϵ_{Sr} 과 조화적이었다. 양 암체에서 보여지는 높은 ϵ_{Sr} 값과 낮은 ϵ_{Nd} 값은 이들 암체가 Sr-Nd 동위원소적으로 진화된 고지각물질에 성인적 기원을 두고 있음을 시사한다.
6. 이들 암체의 지각연령 (T_{DM})은 전주가 1.83 ± 0.25 Ga, 순창이 1.96 ± 0.19 Ga로 나타나 이들 암체의 성인이

Proterozoic 중기에 진화된 지각물질과 매우 밀접하게 관련되어 있음을 나타냈다.

7. 이들 암체의 Sr-Nd 동위원소 조성은 한반도 상부지각의 저반을 이루는 선캠브리아 편마암 복합체를 단성분으로 하여 설명할 수 없는 특성을 보여 그 근원물질이 상부지각보다는 오히려 하부지각일 가능성을 강하게 시사한다.

사 사

이 연구는 전북대학교 기초과학연구소의 교육부 학술연구조성비 (BSRI-96-5425)로 수행되었으며, 일부는 한국과학재단 후원 전략광물자원연구센터의 지원을 받았다. 원고의 미비점을 상세히 지적해주시고 건설적인 비평과 함께 수정을 가해주신 자원연구소의 진명식 박사께 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 김옥준 (1971) 남한의 신기화강암의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4권, p. 1-10.
- 김용준 (1986) 영남육괴에 분포하는 고기 화강암질암의 지질시대와 성인에 대한 연구. 광산지질 19권 특별호, p. 151-162.
- 김용준, 이창신 (1988) 장수-운봉지역에 분포하는 화성암류와 화성활동에 대한 연구. 지질학회지, 24권 특별호, p. 111-131.
- 김용준, 박영석, 주승환, 오민수 (1989) 옥천지향사대 동남대에서의 화성활동 (I): 남원-거창-상주 지역을 중심으로. 광산지질, 22권, p. 355-370.
- 김용준, 박영석, 강상원 (1994) 호남 전단대내에 분포하는 열리상화강암류의 지질시대와 생성과정에 관한 연구. 자원환경지질, 27권 (3), p. 247-261.
- 김정빈, 김용준 (1984) 광주 북동부에 분포하는 소위 편상화강암에 대한 암석학적 연구. 광산지질, 17권, p. 197-214.
- 박재봉, 김용준, 김정빈 (1990) 경남 함양지역에 분포하는 화성암류에 대한 Rb/Sr 동위원소 연구. 광산지질, 23권.
- 박희인 (1966) 한국지질도 순창도폭 (1:50,000). 국립지질조사소.
- 주승환, 김성재 (1986) 영남육괴 연대측정연구 II (지리산 서남부 일대 화강암질 편마암 및 편마상 화강암류). 한국동력자원연구소 KR-86-7, p. 7-33.
- Brooks, C. (1968) Relationship between feldspar alteration and the precise post-crystallization movement of rubidium-strontium isotopes in a granite. J. Geophys. Res., v. 73, p. 4751-4757.
- Chappell, B.W. White, A.J.R. (1974) Two contrasting granite type. Pacific Geology., v. 8, p. 173-174.
- Geological and Mineral Institute of Korea (1973) Chonju geologic map (1:250,000).
- Compston, W., McDougall, I. and Wyborn, D. (1982) Possible two-stage ^{87}Sr evolution in the Stockdale Rhyolite. Earth Planet Sci. Lett., v. 61, p. 297-302.
- DePaolo, D.J. (1981) Trace element and isotopic effects

- of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 53, p. 189-202.
- DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J. (1976) Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophys. Res. Lett.*, v. 3, p. 249-252.
- Farmer, G.L. and DePaolo, D.J. (1983) Origin of Mesozoic and Tertiary granite in the western United States and implications for pre-Mesozoic crustal structure; 1. Nd and Sr isotopic studies in the geocline of the northern Great Basin. *J. Geophys. Res.* v. 88, p. 3379-3401.
- Fullagar, P.D. and Ragland, P.C. (1975) Chemical weathering and Rb-Sr whole rock ages. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v. 39, p. 1245-1252.
- Jacobsen, S.B. (1988) Isotopic constraints on crustal growth and recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 90, p. 315-329.
- Jacobsen, S.B. and Wasserburg, G.J. (1980) Sm-Nd evolution of chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* v. 50, p. 139-155.
- Kullerud, L. (1991) On the calculation of isochrons, *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, v. 87, p. 115-124.
- Liew, T.C. and Hofmann, A.W. (1988) Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian Fold Belt of central Europe: indications from a Nd and Sr isotopic study. *Contrib. Mineral Petrol.*, v. 98, p. 129-138.
- Lugmair, G.W. and Marti, K. (1978) Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$; differential evolution of the lunar crust and mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 39, p. 349-357.
- McClulloch, M.T. and Wasserburg, G.J. (1978) Sm-Nd and Rb-Sr chronology of the continental crust formations, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 58, p. 51-64.
- Na, C.K., Nakano, T., Tazawa, K., Sakagawa, M. and Ito, T. (1995) A systematic and practical method of liquid chromatography for the determine of Sr and Nd isotopic ratios and REE concentrations in geologic samples. *Chemical Geology* v. 123, p. 225-237.
- Peucat, J.J., Jegouzo, P., Vidal, P.H. and Bernard-Griffiths, J. (1988) Continental crust formations seen through the Sr and Nd isotope systematics of S-type granites in the Hercynian belt of western France, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 88, p. 60-68.
- Schleicher, H., Lippolt, H.J. and Raczek, I. (1983) Rb-Sr systematics of Permian volcanites in the Schwarzwald (SW-Germany), Part II: Age of eruption and the mechanism of Rb-Sr whole rock age distortions. *Contrib. Mineral Petrol.*, v. 84, p. 281-291.
- Simamura (1925) Geologic map of Korea, Chonju and Chinan sheet, *Surv. of Chosen*. Skjerlie, K.P. (1992) Petrogenesis and significance of late Caledonian granitoid magmatism in western Norway. *Contrib. Mineral Petrol.*, v. 110, p. 473-487.
- Steiger, R.H. and Jager, E. (1977) Subcommittee on geochronology; Convention on the use of decay constants in Geo- and Cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 36, p. 359-362.
- Turek, A. and Kim, C.B. (1995) U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Danyang-Geochang area, Ryongnam massif. *Geochemical Journal*, v. 29, p. 243-258.
- Turpin, L., Cuney, M., Friedrich, M., Bouchez, J.L. and Aubertin, M. (1990) Meta-igneous origin of Hercynian peraluminous granites in N.W. French Massif Central: implications for crustal history reconstructions. *Contrib. Mineral Petrol.*, v. 104, p. 163-172.
- Wasserburg, G.J., Hachobsen, S.B., DePaolo, D.J., McCulloch, M.J. and Wen, T. (1981) Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 45, p. 2311-2324.
- Wendt, I., Lenz, H., Harre, W. and Schoell, M. (1970) Total rock and mineral ages of granites from the southern Schwarzwald, Germany. *Ecol. Geol. Helv.*, v. 63 (1), p. 365-370.
- York, D. (1969) Least squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 5, p. 320-324.