

경기육괴 중부 남단(용인-안성지역)에 분포하는 선캠브리아기 변성암류의 지구화학적 특징

이승구^{1,*} · 송용선² · 増田彰正³

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²부경대학교 환경지질학과

³일본 동경대학 이학부 화학과

Geochemistry of Precambrian Metamorphic Rocks from Yongin-Anseong Area, the Southernmost Part of Central Gyeonggi Massif

Seung-Gu Lee^{1,*} Yong-sun Song², and Akimasa Masuda³

¹Groundwater and Geothermal Resources Division Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,
Daejeon 305-350, Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³Department of Chemistry, School of Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

요약: 경기육괴의 남서부지역인 용인-안성지역에는 선캠브리아기 초기의 기반암으로 사료되는 고변성도의 편마암과 편암 그리고 이를 관입한 중생대 주라기 화강암류가 광범위하게 분포하고 있다. 이 논문에서는 용인-안성지역에 분포하는 선캠브리아기 변성암류와 이를 관입한 주라기 화강암의 지구화학적 특징을 토대로 서로의 상관성을 토의하고자 하였다. 연구결과에 의하면, 변성암류의 Nd 모델연대(T_{DM}^{Nd})는 경기육괴의 가장 활발한 지각형성시기였던 약 2.6Ga~2.9Ga(Lee *et al.*, 2003) 동안에 생성된 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다. 그리고 Nd 모델 연대(T_{DM}^{Nd})에 의하면, 흑운모 호상편마암과 석영장석질 편마암의 Nd 모델 연대는 각각 2.59Ga~2.73Ga, 2.70Ga~2.88Ga로서 석영장석질 편마암의 기원물질이 약간 더 오래된 것으로 나타났다. 따라서 이들 변성암류는 경기육괴의 가장 활발한 지각형성시기의 기원물질로부터 유래되었음을 알 수 있다. 희토류원소의 분포에 있어서, 흑운모 호상편마암은 (La/Yb)_N 값이 37~136으로 매우 급격한 기울기를 보여주는 반면에, 앵피블라이트의 경우 (La/Yb)_N 값이 4.65~6.64로 거의 편평한 분포양상을 보여준다. 이는 흑운모 호상편마암은 분화가 상당히 일어난 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다. 특히 연구지역내 흑운모 호상편마암, 석영장석질 편마암과 같은 고변성도의 변성암류에서 관찰되는 희토류원소의 분포도는 초기기원물질의 특성을 그대로 보유하고 있는 것으로 볼 수 있다. 그리고 인접한 중생대 화강암의 (La/Yb)_N과 Nd 모델연대는 각각 32~40, 1.69Ga~2.08Ga로서 기반암인 흑운모 편마암과 석영장석질 편마암과는 지구화학적 특성이 서로 다른 젊은 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다.

핵심어: 경기육괴, 희토류원소, Nd 모델연령, 선캠브리아

Abstract: The metamorphic rocks of Yongin-Anseong area in Gyeonggi massif are composed of high-grade gneisses and schists which are considered as Precambrian basement, and Jurassic granite which intruded the metamorphic rocks. In this paper, we discuss the geochemical characteristics of metamorphic rocks and granites in this area based on REE and Nd isotope geochemistry. And we also discuss the petrogenetic relationship between metamorphic rocks and granites in this area. Most of Nd model ages (T_{DM}^{Nd}) from the metamorphic rocks range ca. 2.6Ga~2.9Ga which are correspond to the main crustal formation stage in Gyeonggi massif by Lee *et al.* (2003). And Nd model ages show that the source material of quartzofeldspathic gneiss is slightly older than that of biotite banded gneiss. In chondrite-normalized rare earth element pattern, the range of (La/Yb)_N value from biotite banded gneiss is 37~136, which shows sharp gradient and suggests that biotite banded gneiss was originated from a strongly

*Corresponding author: Tel: 82-42-868-3376, E-mail: sgl@kigam.re.kr

fractionated source material. However, that of amphibolite is 4.65~6.64, which shows nearly flattened pattern. Particularly, the chondrite normalized REE patterns from the high-grade metamorphic rocks show the REE geochemistry of original source material before metamorphism. In addition, the values of $(La/Yb)_N$ and Nd model ages of granite are 32~40 and 1.69Ga~2.08Ga, respectively, which suggest that the source material of granite is different from that of Precambrian basement such as biotite banded gneiss and quartzofeldspathic gneiss in the area.

Key words: Gyeonggi massif, REE, Nd model age, Precambrian

서 언

희토류원소는 분석기술의 발달과 더불어 지난 40여 년간 지구과학의 여러 가지 현상을 해석하기 위한 아주 필수적인 도구로써 사용되어져 왔다. 특히 화성암 및 지각의 진화 혹은 분화과정을 설명하는데 있어서 희토류원소는 매우 유용한 역할을 하고 있다(Jahn and Zhang, 1984; Jahn *et al.*, 1981, 2001; Taylor and McLennan, 1981; Bau, 1996, 1997, 1999; Lee *et al.*, 2001). 이는 희토류원소가 모두 3가의 원자가를 가지며 상호간에 물리적, 화학적 성질이 아주 유사하기 때문에, 지구환경에서 발생된 모든 환경에서 규칙성을 가지고 거동하기 때문이다. 뿐만 아니라, 분석치의 정확도가 높게 측정된 희토류원소 자료 및 희토류원소 중의 하나인 Ce, Nd의 동위원소비는 각종 지질시료 및 운석 등의 분화와 진화과정을 규명하는 데 있어서 필수적인 도구로 이용할 수가 있다(Allegre *et al.*, 1979; Shimizu *et al.*, 1984, 1990; Tanaka *et al.*, 1987; DePaolo, 1988; Dickin, 1988; Lee *et al.*, 2001).

한반도의 캄브리아기 기저암은 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴로 크게 구분되며, 이 기저암들은 주로 후기 시생대에서 초기 원생대 고변성도의 편마암과 편암들로 구성되어 있다(Chough *et al.*, 2000). 최근에 Lee S. R. *et al.*(2003)은 경기육괴에서의 기저암에 대한 Sm-Nd 동위원소자료를 토대로 하여, 경기육괴의 형성시기는 적어도 30억년전 이전이며, 주요 지각형성시기는 후기 시생대(약 29억년~25억년 사이)인 것으로 보고하였다. 그들은 경기육괴에서의 Nd 모델연대가 주로 후기시생대에서 초기원생대에 집중되어 있기 때문에, 초기 시생대에 형성되어진 북중국지괴(North China Craton)보다는 양쯔지괴(Yangtze Craton)와 경기육괴를 대비하여 설명하고자 하였다. 그러나 경기육괴의 보다 명확한 지각진화사 특히 중국 대륙과의 연계성을 밝혀내기 위해서는 더욱 많은 선캠브리아기 기반암에 대한 Sm-Nd, U-Pb 동위원소계 자료가 축적되어야 할 것이다.

경기육괴의 남서부지역인 용인-안성지역에는 선캠브리아기 초기의 기반암으로 사료되는 호상 편마암(주요

흑운모 편마암), 석영장석질 편마암 그리고 이를 관입한 중생대 쥐라기 화강암류가 광범위하게 분포하고 있다. 이 논문에서는 용인-안성지역에 분포하는 선캠브리아기의 변성암류와 이를 관입한 쥐라기 화강암의 희토류원소와 Nd 동위원소의 지구화학적 특징을 토대로 기원물질의 지구화학적 특성과 서로의 상관성에 대해 토의하고자 한다.

지질개요

연구지역은 1:50,000 안성도폭(이상만 외, 1989), 수원도폭(오인섭과 윤윤영, 1972), 이천도폭(여상철과 임주환, 1974)과 오산도폭(오인섭과 박석환, 1973) 지역에 걸쳐 있다.

연구지역의 주 구성암석은 선캠브리아기의 흑운모 호상편마암, 석영-장석질 편마암 및 석영-운모 편암과 중생대 쥐라기의 흑운모 화강암이다. 그리고 일부 우백질 편암과 반상변정질 편마암도 각각 연구지역의 중서부와 북서부에서 소규모로 산출된다.

흑운모 호상편마암은 연구지역내 선캠브리아기 변성암류의 주구성 암석으로 전 지역에 걸쳐 넓게 분포하며, 동부지역에서 쥐라기의 흑운모화강암에 의해 관입당하였다. 우후대와 우백대가 교호된 호상구조가 특징적이며, 부분적으로는 괴상조절을 보이기도 한다. 호상편마암의 주구성 광물은 석영, 흑운모, 사장석, K-장석 등이며 규선석, 근청석, 석류석과 기타 저어콘과 불투명광물 등의 미량성분 광물들을 수반한다. 흑운모와 규선석이 밀접한 공생관계를 보여주면서 우후대를 형성하고, 석영과 사장석이 우백대를 형성하며 서로 교호하는 양상을 보여준다. 일반적으로 석류석이 근청석과 공존하는 경우는 매우 드물지만, 석류석의 반상변정의 크기가 2~5 cm로 큰 결정인 경우에는 근청석과 공존하는 것이 관찰되며, 부분적으로 5 cm 내외의 큰 석류석 반상변정이 현저하게 발달되어 있기도 하다. Lee *et al.*(1994)은 인접한 장호원지역의 호상편마암내 석류석 반상변정으로부터 약12억년의 Sm-Nd 광물연대를 보고한 바 있으며, 이들은 이 연대를 고변성작용에 의해

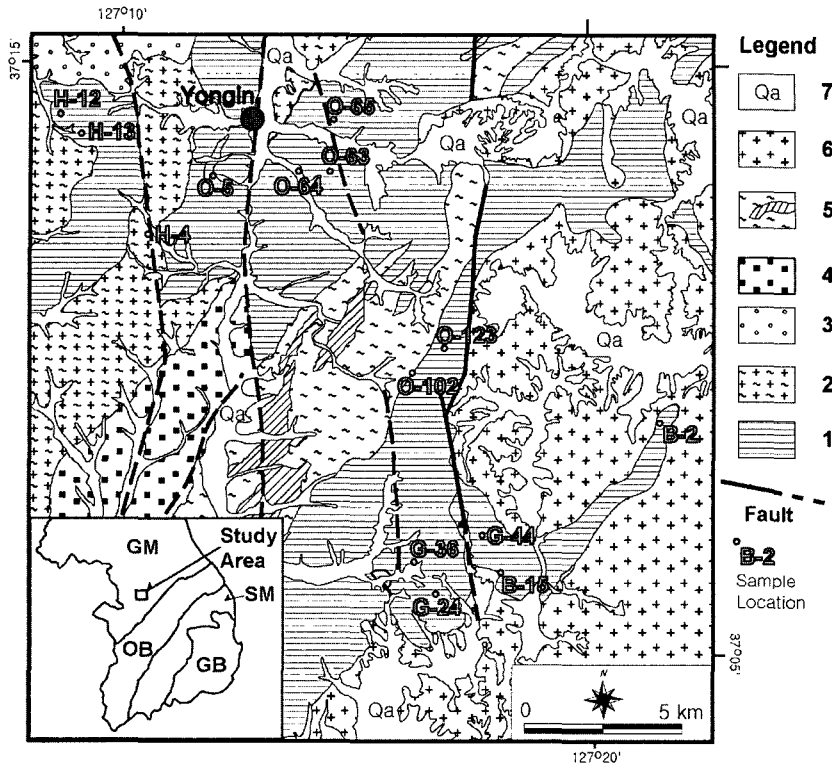


Fig. 1. Geologic map of Yongin-Anseong area, Gyeonggi massif. 1: banded biotite gneiss, 2: quartzofeldspathic gneiss, 3: porphyroblastic granite gneiss, 4: leucocratic schist, 5: quartz-mica schist with tourmaline-bearing gneissic layer, 6: Jurassic granite, 7: alluvium. GM: Gyeonggi massif, OB: Okcheon belt, SM: Sobacksan massif, GB: Gyeongsang basin.

교란된 연대로서 해석하였다.

석영장석질 편마암은 연구지역의 서부 지역에 광범위하게 분포하지만, 일부는 소규모로 흑운모 호상편마암 등의 다른 암체에 협재되어 산출되기도 한다. 대체로 조립질이며, 엽리의 발달은 미약하다. 그러나 석영장석질 편마암에서 흑운모 호상 편마암으로 갈수록 무색광물의 결정크기와 양이 감소하고, 반면에 유색광물의 양이 증가하면서 엽리구조도 잘 발달되는 것이 관찰된다. 이 암석의 주구성광물은 석영, 사장석, K-장석 그리고 소량의 흑운모이며, 녹렴석도 일부 관찰된다. 이외에 백운모, 녹니석, 인회석, 저어콘과 불투명 광물이 미량성분 혹은 2차적인 광물로서 산출되기도 한다.

반상변정질 편마암은 연구지역 북서부에 소규모로 산출되며, 매우 조립질이고 비교적 과상인 화강암질 조직에 K-장석 반상변정이 잘 발달된 암상을 보인다.

우백질 편암은 수원도폭(오인섭과 윤윤영, 1972)과 오산도폭(오인섭과 박석환, 1973)에서 명명된 암체로 석영장석질 편마암과는 중-세립질이고 편리가 잘 발달된 조직적 차이에 의해 구분되었다. 후술할 석영-운모

편암과는 구별이 매우 모호하지만 운모의 함량이 낮은 규장질이고 견운모, 녹니석 등의 2차변질광물의 함량이 높은 것으로 구분되었다.

석영-운모 편암은 운모편암, 석영편암 및 규암 등으로 구성되어 있으며, 지역 중앙부에 북동-남서방향의 대상으로 분포되었다. 주구성광물은 석영, 흑운모, 백운모 등이며, 부분적으로 다량의 전기석을 함유한 편마상의 함전기석 편암부가 협재된다.

엠피블라이트는 주로 용인 일대의 흑운모 호상편마암내에 협재되어 산출된다. 암체가 대개 약 1 m 정도에서 15 m에 이르고, 분포양상은 흑운모 호상편마암의 엽리방향과 일치하면서 분포하거나 엽리와는 무관한 과상형태의 두 가지로 산출된다.

흑운모 화강암은 한반도 중앙부를 북동-남서방향으로 가로지르며 광범위하게 분포된 주라기 대보화강암류의 일부로 연구지역 동부에서 선크브리아기 변성암류들을 관입하여 분포하고 있다. 대체로 중-조립질이고 등립상조직을 띠며 석영, 장석 그리고 흑운모가 주성분 광물이다. 부분적으로는 반상조직을 보이거나 상

Table 1. Modal composition (%) of biotite gneiss, quartzofeldspathic gneiss and amphibolite of Yongin area, Gyeonggi massif.

	Biotite banded gneiss	Quartzofeldspathic gneiss	Amphibolite
Quartz	4.1-60.9	34.0-61.5	5.5-7.5
Plagioclase	1.1-13.5	14.4-28.4	13.5-15.9
K-feldspar	0-11.4	15.7-24.9	absent
Biotite	16.0-30.9	4.0-15.0	0-4.5
Muscovite	tr-15.3	tr-7.0	1.2-1.7
Hornblende	absent	absent	70.2-74.9
Garnet	0-14.3	absent	absent
Sillimanite	0-14.5	absent	absent
Andalusite	0-8.3	absent	absent
Cordierite	0-28.1	absent	absent
Chlorite	0-4.7	0.8-7.1	tr-0.8
Epidote	tr	absent	tr-0.8
Zircon	tr	trabsent	
Sericite	tr-7.3	tr-1.4	absent
Opaque	0.2-1.5	tr-2.4	absent

당량의 각섬석을 함유하여 반상화강암 또는 각섬석 화강암으로 구분되기도 한다.

Table 1에는 연구지역내 암석의 구성광물에 대한 모우드 조성비를 요약하여 나타내었다.

시료 및 분석방법

연구지역내 선캠브리아기 변성퇴적암류와 이를 관입한 주라기 화강암류의 지구화학적 특징 및 연관성을 살펴보기 위해서 5개의 흑운모 호상 편마암, 6개의 석영장석질 편마암, 1개의 운모편암, 3개의 앰피블라이트 그리고 3개의 화강암시료를 선택하여 화학분석을 실시하였다. 흑운모 호상편마암인 B2와 석영-운모편암은 비교적 풍화를 많이 받은 시료이다. 이중 일부 편마암 시료와 앰피블라이트 그리고 화강암에 대해서는 Nd 동위원소비를 측정하였다. 석영장석질 편마암 시료 중 4개는 흑운모 호상편마암에 협재된 층에서 채취된 시료이며, 지질도(Fig. 1)에 시료위치가 표시되지 않은 화강암 시료들은 동남부인 안성부근의 화강암체에서 채취된 것들이다.

주성분원소는 일본 이화학연구소의 XRF(기종: SHI-MAZU VF-320A)로 측정하였고, 희토류원소 및 Rb, Sr, Ba의 함량은 동위원소 희석법을 이용하여 현재 한국지질자원연구원에 설치되어 있는 JEOL JMS-05RB 열이온화질량분석기로 측정하였다. 동위원소분석 및 희토류원소 정량화에 대한 시료처리 방법은 Lee *et al.*

(1994, 2001)에 기재되어있다. Nd의 동위원소비는 과거 일본동경대학 화학과에 설치되었던 VG54-30 열이온화질량분석기로 측정된 자료이다. 동위원소희석법에 의한 희토류원소의 분석원리 및 실험방법에 관한 자세한 설명은 이승구 외(2001)에 언급되어 있다. 측정된 Nd 동위원소비는 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 로 규격화한 값이며, La Jolla Nd 표준시료의 측정비는 0.511826 ± 0.000003 ($2\sigma_m$)이다. 희토류원소의 분석오차는 중희토류의 경우 2%이내이고, Rb, Sr, Ba과 경희토류는 1%이하이다.

결 과

주원소 및 희토류원소

주성분원소 및 희토류원소의 분석결과는 Table 2에 기재되어 있다. 흑운모 호상편마암의 경우, 규선석이 많이 함유된 시료에서는 사정석이 거의 관찰되지가 않는 데, 이는 주성분의 화학조성에서도 CaO와 Na₂O의 함량이 거의 존재하지 않는 것으로 나타난다. 연구지역의 대표적인 암석인 흑운모 호상편마암은 Al₂O₃, total Fe₂O₃, MgO, K₂O가 많이 함유되어 있는 반면에, 석영장석질 편마암은 SiO₂, CaO, Na₂O가 많이 함유된 것과 같이 화학조성에서도 서로 간에 많은 대비를 보여준다.

운석으로 규격화한 희토류원소의 분포도는 Fig. 2에 도시하였다. 우선 Table 2를 보면, 흑운모 호상편마암의 경희토류원소 함량이 다른 암석들에 비해 월등히 높게 함유되어 있다. 그리고 운석으로 규격화한 Fig. 2와 Table 2의 (La/Yb)_N 값을 보면, 흑운모 호상편마암은 (La/Yb)_N 값이 37~136으로 매우 급격한 기울기를 보여주는 반면에, 앰피블라이트의 경우 (La/Yb)_N 값이 4.65~6.64로 거의 편평한 분포양상을 보여준다. 그리고 Eu의 분포특성에 있어서 암상에 관계없이 모두 부(-)의 이상을 보여주지만, 앰피블라이트와 흑운모 화강암은 Eu의 부(-)의 이상이 다소 미약한 편이다.

Nd 동위원소 조성

Table 3에는 연구지역내 시료들에 대한 Nd 동위원소비가 기재되어 있다. 흑운모 호상편마암과 석영장석질 편마암의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 서로 유사하며 0.511114~0.511263의 범위에 속하지만, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 비는 흑운모 호상편마암이 0.1011~0.1048, 석영장석질 편마암이 0.1045~0.1131로 석영장석질 편마암이 약간 높다.

Nd 모델연대(T_{DM}^{Nd})의 경우에도, 흑운모 호상편마암이 2.59Ga~2.73Ga, 석영장석질 편마암이 2.70Ga~2.88Ga로 석영장석질 편마암이 약간 더 오래된 기원 물질로부터 유래되었음을 시사해준다. 앰피블라이트의

Table 2. Concentrations of major elements (wt.%) and rare earth elements (ppm) of biotite gneisses, quartzofeldspathic gneiss, amphibolite and granite at the Yongin area, Gyeonggi massif.

Rock Type	Biotite banded gneiss					Quartzofeldspathic gneiss					
Sample No.	B2	B15	G24	G36	G44	H4	H13	O5	O64	O65	O123
SiO ₂	50.9	59.7	57.6	60.7	57.5	69.9	67.8	65.7	67.5	74.5	66.4
Al ₂ O ₃	25.2	21.9	21.5	19.3	20.9	13.7	16.4	16.1	14.7	13.2	14.5
Fe ₂ O ₃ *	12.6	10.2	9.30	10.4	8.18	4.48	3.23	6.04	7.11	3.90	9.35
CaO ^c	0.09	0.30	0.37	0.49	2.25	1.77	3.05	1.44	3.00	4.86	2.54
MgO	4.02	4.41	2.96	3.29	2.94	1.33	0.41	1.89	0.66	1.20	1.96
K ₂ O	4.82	2.93	4.19	3.71	4.66	1.69	3.48	3.25	3.25	1.25	1.74
Na ₂ O	0.00	0.25	0.61	0.32	2.26	3.46	3.17	2.14	2.06	1.07	2.16
TiO ₂	1.05	0.70	0.72	0.64	0.70	0.44	0.33	0.59	0.86	0.41	0.95
MnO	0.11	.08	0.12	0.15	0.09	0.00	0.00	0.06	0.08	0.07	0.08
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.12	0.14	0.13	0.18	0.15	0.16	0.23	0.14	0.11
total	98.92	100.61	97.49	99.14	99.61	96.95	98.02	97.37	99.45	100.6	99.79
Rb	282.8	175.8	77.3	16.7	23.7	-	11.5	110.0	17.3	6.47	-
Sr	364.6	41.5	165.3	97.6	197.7	-	236.1	192.1	95.4	237.0	-
Ba	605.7	375.9	1006.2	793.0	953.9	-	1104.4	701.8	774.9	443.1	-
La	75.7	76.4	58.8	43.1	60.6	-	44.6	31.5	39.1	38.3	54.6
Ce	153.1	149.4	112.8	91.8	124.9	-	105.5	71.7	78.8	77.9	111.6
Nd	59.1	60.0	46.0	35.3	47.4	-	43.4	27.9	30.8	32.4	46.0
Sm	9.98	10.1	7.90	6.13	7.56	-	7.93	4.86	5.32	6.07	8.07
Eu	1.35	1.45	1.31	1.38	1.62	-	1.38	0.94	1.35	1.53	1.25
Gd	7.21	7.20	5.75	4.47	4.36	-	6.60	4.18	3.98	5.02	6.20
Dy	3.79	2.84	2.78	2.78	2.84	-	4.95	4.21	2.65	3.77	4.78
Er	1.23	0.85	0.85	1.17	0.81	-	2.83	2.51	1.17	1.71	2.35
Yb	0.46	0.37	0.58	0.76	0.43	-	2.52	2.33	0.76	1.14	1.83
Lu	0.06	0.05	0.08	0.11	0.06	-	0.38	0.34	0.12	0.17	0.22
(La/Yb) _N	108.5	136.0	66.8	37.4	92.8	-	11.7	8.91	33.9	22.1	19.6
Eu/Eu*	0.47	0.50	0.57	0.78	0.80	-	0.57	0.62	0.87	0.83	0.52

Eu/Eu* is defined as the ratio of observed Eu abundance to that which would fall on Sm-Gd join in chondrite-normalized REE pattern

경우, Nd 모델연대가 2.24Ga~4.43Ga로 넓은 범위의 값을 보여주고, 화강암의 경우 1.69Ga~2.08Ga로 비교적 젊은 연대를 갖는 기원물질로부터 유래되었음을 시사해준다.

토 의

경기육괴 중부 남단지역 변성암류의 기원물질의 지구화학적 특성 및 의의

Lee S.R. *et al.*(2003)은 경기육괴에서의 편마암류와 편암류에서의 Nd 모델연대를 토대로 경기육괴의 주요 지각형성시기를 3.2Ga~3.0Ga, 2.9Ga~2.5Ga와 1.9~1.8Ga로 분류하였으며, 특히 2.9Ga~2.5Ga는 경기육괴의 지각을 형성함에 있어서 가장 활발하였던 시기로

분류하였다. 이 연구지역의 주 구성암체인 흑운모 호상편마암과 석영장석질 편마암의 Nd 모델 연대는 각각 2.59Ga~2.73Ga, 2.70Ga~2.88Ga로서 경기육괴의 가장 활발한 지각형성시기의 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다. 그럼에도 불구하고, 흑운모 호상편마암과 석영장석질 편마암은 서로 다른 기원물질로부터 유래되었음을 Nd 모델연대와 희토류원소분포도로부터 알 수가 있다. 그리고 Table 3의 Nd 모델연대를 살펴보면, 석영장석질 편마암이 더 오래된 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다. 변성퇴적암의 경우, 초기기원물질이 지각내에서 혼합된 후에 형성되어진 것이기 때문에, 변성작용 혹은 변질작용에 강한 특성을 갖는 Sm-Nd 동위원소계라 할지라도 등시선을 구하는 것이 무리이다. 다만, Lee *et al.*(1994)과 Lee *et al.*(1997)이

Table 2. continued.

Rock Type	Quartz-mica schist		Amphibolite			Granite	
Sample No.	O102	H12	O42	O63	E11	G16	S21
SiO ₂	63.3	47.2	-	45.1	-	-	-
Al ₂ O ₃	19.6	14.1	-	15.1	-	-	-
Fe ₂ O ₃ *	7.21	14.4	-	12.2	-	-	-
CaO	0.12	10.5	-	10.3	-	-	-
MgO	2.62	8.10	-	8.35	-	-	-
K ₂ O	4.66	1.70	-	1.11	-	-	-
Na ₂ O	0.10	0.54	-	1.52	-	-	-
TiO ₂	0.64	0.73	-	0.73	-	-	-
MnO	0.06	0.16	-	0.15	-	-	-
P ₂ O ₅	0.12	0.15	-	0.14	-	-	-
total	98.43	97.58	-	94.7	-	-	-
Rb	125.8	8.41	85.0	53.2	161.6	-	-
Sr	43.8	179.	218.6	300.3	407.5	-	393.1
Ba	699.4	219.0	280.4	305.2	1040.3	-	666.5
La	36.0	12.0	14.4	12.0	30.0	45.5	38.6
Ce	80.1	23.5	32.2	22.2	60.2	86.6	58.6
Nd	30.6	12.2	16.3	10.7	24.0	25.0	23.9
Sm	5.45	3.32	4.10	2.15	3.98	3.37	3.67
Eu	0.90	0.89	1.22	0.66	0.97	0.74	0.80
Gd	4.30	4.27	4.48	2.46	2.67	2.30	2.60
Dy	3.20	4.18	4.13	2.43	1.61	1.71	1.96
Er	1.98	2.11	2.00	1.36	0.78	0.84	0.92
Yb	1.80	1.70	1.59	1.19	0.52	0.75	0.80
Lu	0.28	0.24	0.21	0.17	0.08	0.10	0.12
(La/Yb) _N	18.0	4.65	5.97	6.64	38.0	40.0	31.8
Eu/Eu*	0.83	0.73	0.87	0.88	0.87	0.78	0.76

보고한 바와 같이, 전암과 그 구성광물을 이용할 경우 광물연대 즉 변성광물이 형성된 시기는 구할 수가 있다.

연구지역내 회토류원소 분포도(Fig. 2)를 살펴보면 흑운모 호상편마암, 석영장석질 편마암, 앵피볼라이트의 분포양상이 서로 크게 다르다. 이는 Fig. 3과 같은 (La/Yb)_N과 (Yb)_N의 상관도에서도 명확히 구분된다. Jahn and Zhang(1984)은 (La/Yb)_N과 (Yb)_N의 상관관계를 이용하여 정편마암류내 회토류원소의 분화도(degree of fractionation)를 구분하였으며, 산성 백립암에서 높은 (La/Yb)_N값을 보여주었다. 연구지역 시료의 경우, 비록 변성퇴적암 류로 알려져 있지만 흑운모 호상 편마암은 시생대의 TTG(tonalite-trondjemite-granodiorite) 영역에 속하고, 석영장석질 편마암은 상부지각의 영역에 속한다. 이는 두 암체가 서로 다른 기원물질로부터 유래되었음을 지시해주는 것이다.

Fig. 4는 K/Rb, Rb/Sr, Ba/MgO, Ba/Sr에 대한 상관도이다. K-Rb-Sr간의 상관성은 거의 존재하지 않지만,

MgO 함량에 따른 Ba은 서로 뚜렷한 차이를 보여준다. K, Rb등과 같은 알칼리족 원소들은 이동성이 강하고, 특히 고변성도의 변성작용 하에서는 손실되기도 쉬운 편이다. Heier(1973)은 백립암에서의 경우 Rb이 K에 비해 상대적으로 더 많이 손실되었다고 보고한 바 있다. 이는 변성작용 시 광물조성의 재구성에 따른 치환 혹은 유체에 의한 영향을 들 수가 있다(Tarney and Windley, 1977). Jahn and Zhang(1984)은 K-Rb, Rb-Sr의 상관관계와 백립암에서의 회토류원소분포도의 변화를 조사한 결과, 회토류원소의 분포도는 백립암상과 같은 고변성도에도 불구하고 변화되지 않았음을 관찰하였으며, 이를 토대로 백립암에서의 회토류원소 분포도는 초기기원물질의 특성이라고 결론지었다. 연구지역내 변성암류들의 K-Rb, Rb-Sr 상관관계를 살펴보면(Fig. 4a와 4b), 암상에 관계없이 K/Rb의 비와 Rb/Sr의 비가 폭넓게 존재함을 알 수가 있다. 이는 K, Rb과 같은 알칼리 원소들의 변성작용에 따른 이동이 활발하게

Table 3. Sm-Nd isotopic data for the gneisses, amphibolites and granites.

Sample	Nd (ppm)	Sm (ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _a	ε _{Nd} (0)	T _{DM} Nd (Ga) ^b
Biotite banded gneiss						
B2	59.13	9.98	0.1021	0.511246 ± 8	-27.2	2.59
B15	59.97	10.13	0.1020	0.511175 ± 7	-28.5	2.68
G24	45.98	7.90	0.1039	0.511219 ± 9	-27.7	2.67
G36	35.34	6.13	0.1048	0.511212 ± 7	-27.8	2.70
G44	47.35	7.92	0.1011	0.511119 ± 8	-28.3	2.73
Quartzofeldspathic gneiss						
O5	27.91	4.86	0.1052	0.511114 ± 8	-29.7	2.84
O64	30.75	5.32	0.1045	0.511202 ± 9	-28.0	2.70
O65	32.41	6.07	0.1131	0.511239 ± 8	-27.3	2.88
H13	43.43	7.93	0.1103	0.511263 ± 8	-26.8	2.77
Quartz-mica schist						
O102	30.58	5.45	0.1078	0.511293 ± 10	-26.2	2.66
Amphibolite						
H12	12.24	3.32	0.1638	0.511683 ± 6	-18.6	4.43
O42	16.32	4.10	0.1218	0.511796 ± 6	-16.4	2.24
O63	10.67	2.15	0.1518	0.511963 ± 10	-13.2	2.90
Granite						
E11	23.95	3.98	0.1004	0.511596 ± 8	-20.3	2.08
G16	25.0	3.37	0.0814	0.511678 ± 8	-18.7	1.69
S21	23.9	3.67	0.0927	0.511694 ± 8	-18.4	1.83

a) Normalized to ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219; errors are 2σ_m.

$$b) T_{DM}^{Nd} = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left[1 + \frac{(\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd)_{sample} - 0.51315}{(\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_{sample} - 0.2137} \right]$$

where $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} a^{-1}$

일어났었음을 지시해주는 것이다. 이를 Fig. 2의 희토류원소 분포도와 비교하여 살펴보면, 암상별 희토류원소 분포도는 서로간에 매우 유사함을 알 수가 있다. 그리고 Fig. 2a의 흑운모 호상편마암중 비교적 풍화도가 심했던 B2의 경우에도 전체적인 희토류원소 분포도는 다른 신선한 암석들과 차이가 없음을 알 수가 있다. 이는 현재의 희토류원소 분포도가 변성작용 혹은 풍화작용에 의해 그 양상이 바뀌지 않았으며, 따라서 각각의 암상의 초기기원물질의 특성을 지시해주고 있는 것으로 간주할 수 있다.

최근에 Lee S.G. *et al.*(2003, 2004)은 흑운모 편마암지역에서 획득한 시추코아에 대하여 희토류원소의 분포도 변화를 살펴본 결과, Eu의 변화를 제외하고는 희토류원소의 전체적인 양상은 풍화나 변성작용에 관계없음을 보고한 바 있다. 그리고 Lee *et al.*(1994)은 시료 3321과 같은 풍화시료에서의 희토류원소 테트라드 효과를 보고함으로써, 물-암석 반응 혹은 화강암 분화작용의 최후기산물로 고려되고 있는 희토류원소의

테트라드 효과(Bau, 1996, 1997, 1999; Irber, 1999; Jahn *et al.*, 2001)가 풍화에 의해 변화되지 않았음을 보여주었다. 이는 암석내의 희토류원소 분포양상이 Eu 혹은 Ce과 같은 일부 원소를 제외하고는 변성작용 혹은 풍화작용 등에 의해 변화되지 않음을 지시해준다고 볼 수 있다. 그러므로 결론적으로 연구지역내 흑운모 호상편마암, 석영장석질 편마암과 같은 고변성도의 변성암류에서 관찰되는 희토류원소의 분포도는 초기기원물질의 특성을 그대로 보유하고 있는 것으로 볼 수 있다.

화강암의 기원물질 및 변성암류와의 상관성

용인-안성지역내 화강암의 희토류원소 분포도(Fig. 2d)는 일반적으로 알려진 주라기 대보화강암류의 희토류원소 분포도와 매우 유사하다(정창식과 장호완, 1996; 대한지질학회, 1999). 그러나 이 지역의 대표적인 기반암인 흑운모 호상편마암이나 석영장석질 편마암(Fig. 2a와 2b 참조)과는 큰 차이를 보여주고 있다. 뿐만 아니라 이 화강암체의 Nd 모델연대(Table 2)는 1.69Ga~

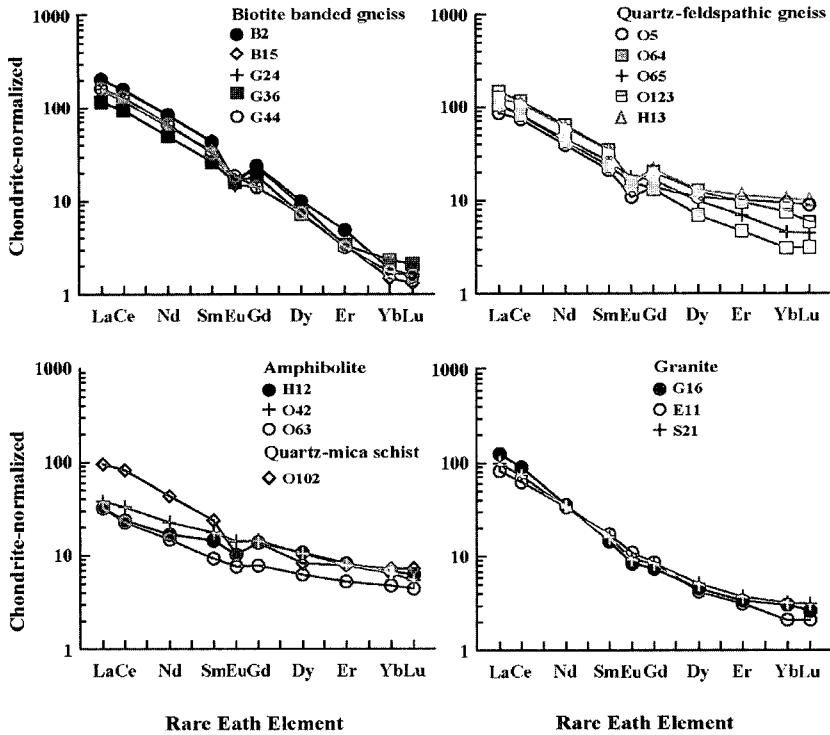


Fig. 2. Chondrite-normalized REE patterns (Masuda *et al.*, 1973) of metamorphic rocks and granite in Yongin-Anseong area.

2.08Ga로서. 이는 연구지역내 화강암이 흑운모 호상편마암이나 석영장석질 편마암의 Nd 모델연대(Table 2)에 비해 1Ga 정도 더 젊게 나타난다. 연구지역 및 연구지역의 남서부에 광역적으로 분포하고 있는 화강암류의 보다 세밀한 암석학적, 지구화학적 연구가 필요할 것이다. 그럼에도 불구하고, 현재의 Nd동위원소자료와 희토류원소 분포도는 이는 연구지역내 화강암류가 본 지역의 선캠브리아기 변성퇴적암류로 구성된 기반암과는 서로 다른 특성을 갖는 기원물질로부터 형성된 마그마로부터 생성되었음을 시사해주고 있다.

결론

경기육괴의 남서부지역인 용인-안성지역에서의 선캠브리아기의 변성퇴적암류와 슈라기 화강암류의 희토류원소와 Nd동위원소의 지구화학적 특징을 토대로 서로의 상관성 및 경기육괴 남서부 지역의 지각형성시기를 토의하고자 하였다. 이 지역의 변성퇴적암류들의 등시선을 획득하는 것은 무리지만, Nd 모델연대는 경기육괴의 가장 활발한 지각형성시기였던 약 2.6Ga~2.9Ga 동안에 생성된 기원물질로부터 유래되었음을 시사해준

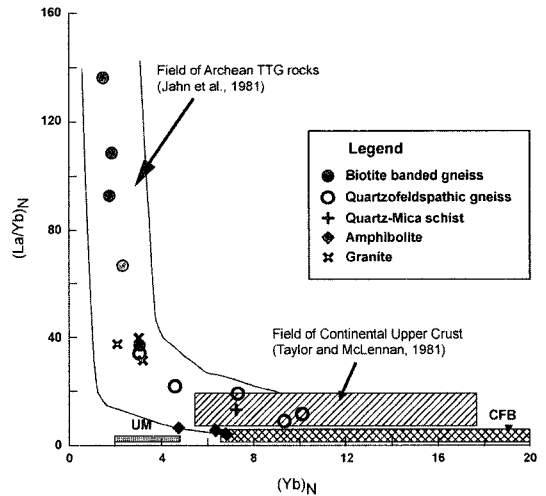


Fig. 3. $(La/Yb)_N$ vs. $(Yb)_N$ diagram for the metamorphic rocks and granite in Yongin-Anseong area. UM: Upper mantle, CFB: continental flood basalts (after Jann and Zhang, 1984).

다. 그리고 Nd 모델 연대에 의하면, 흑운모 호상편마암과 석영장석질 편마암의 Nd 모델 연대는 각각

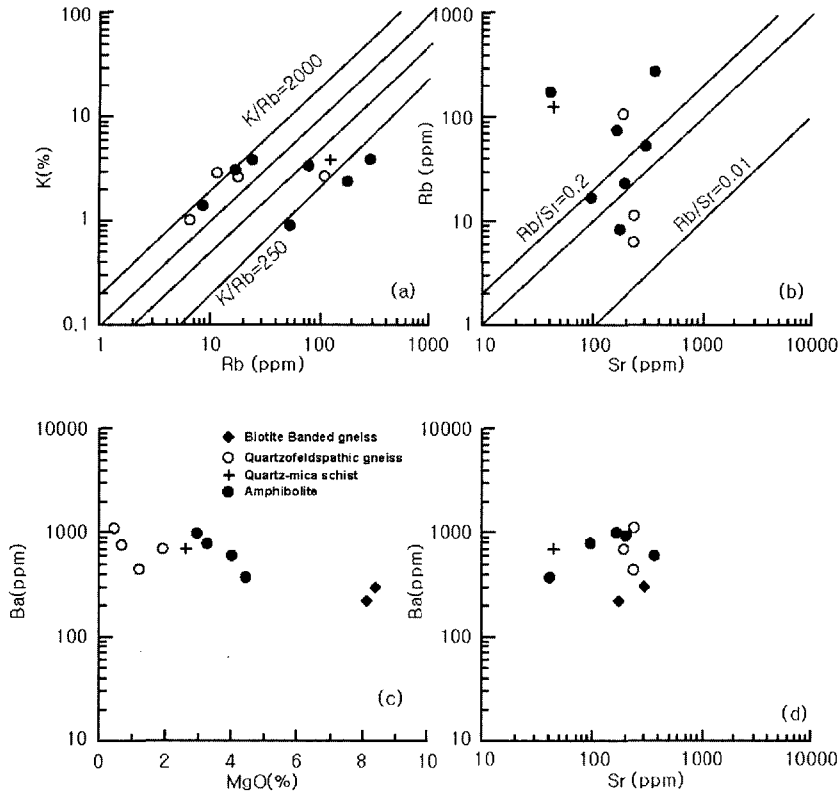


Fig. 4. K vs Rb, Rb vs Sr, Ba vs MgO, and Ba vs Sr diagrams of the metamorphic rocks in Yongin-Anseong area.

2.59Ga~2.73Ga, 2.70Ga~2.88Ga로서 석영장석질 편마암의 기원물질이 약간 더 오래된 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고, 상기의 Nd 모델 연대는 흑운모 호상편마암과 석영장석질 편마암이 경기육괴의 가장 활발한 지각형성시기의 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다. 희토류원소의 분포에 있어서, 흑운모 호상편마암은 $(La/Yb)_N$ 값이 37~136으로 매우 급격한 기울기를 보여주는 반면에, 암피블라이트의 경우 $(La/Yb)_N$ 값이 4.65~6.64로 거의 편평한 분포양상을 보여준다. 이는 흑운모 호상편마암이 분화가 상당히 일어난 기원물질로부터 유래되었음을 지시해준다. 그리고 연구지역내 흑운모 호상편마암, 석영장석질 편마암과 같은 고변성도의 변성암류와 중생대 화강암류에서 관찰되는 희토류원소의 분포도는 각각의 초기기원물질의 특성을 그대로 보유하고 있는 것으로 볼 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 2001년도 기초기반 연구사업 및 2004년도 기본사업의 지원을 받아 수행

되었다. 도표와 그림 작성에 도움을 준 부경대학교 대학원 김남훈 석사와, 최정운 학사에게 감사드린다. 또한 이 논문의 심사과정에 유익한 비평과 의견을 주신 박계현 교수와 정창식 박사에게 감사드린다.

참고문헌

대한지질학회, 1999, 제4장 화성활동, 한국의 지질, 대한지질학회, 409-417.
 여상철, 임주환, 1974, 한국지질도(1:50,000 이천도폭). 국립지질광물연구소, 15p.
 오인섭, 윤윤영, 1972, 한국지질도(1:50,000 수원도폭). 국립지질조사소, 21p.
 오인섭, 박석환, 1973, 한국지질도(1:50,000 오산도폭). 국립지질광물연구소, 21p.
 이상만, 김형식, 송용선, 1989, 안성도폭 지질보고서(1:50,000). 한국동력자원연구소, 18p.
 이승구, 성낙훈, 김용제, 增田彰正, 2001, 동위원소희석법을 이용한 열이온 질량분석: 희토류원소 지구화학에의 응용. 암석학회지, 제10호, 190-201.
 정창식, 장호완, 1996, 중부 옥천대 변성대의 화성, 변성 및 평화작용과 구조조적 연관성 연구(I): 보은 지역 화강암

- 류의 암석화학과 동위원소 지구화학, *지질학회지*, 32, 91-116.
- Allegre, C. J., Ben Othman, D., Polve, M. and Richard, P., 1979, The Nd-Sr isotopic correlation in mantle materials and geodynamic consequences. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 19, 293-306.
- Bau, M., 1996, Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contr. Mineral. Petrol.*, 123, 323-333.
- Bau, M., 1997, The lanthanide tetrad effect in high evolved felsic igneous rocks- A reply to the comment by Y. Pan. *Contrib. Mineral. Petrol.* 128, 409-412.
- Bau, M., 1999, Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect. *Geochim. Cosmochim. Acta* 63, 67-77.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view. *Earth-Sci. Rev.* 52, 175-235.
- DePaolo, D. J., 1988, *Neodymium Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, 187p.
- Dickin, A. P., 1988, Mantle and crustal Ce/Nd isotope systematics. *Nature*, 333, 403-404.
- Heier, K. S., 1973, Geochemistry of granulite facies rocks and problems of their origin. *Philos. Trans. R. Soc. Lon.*, A273, 429-442.
- Irber, W., 1999, The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63, 489-508.
- Jahn, B.-m. and Zhang, Z. Q., 1984, Radiometric Ages (Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb) and REE Geochemistry of Archean Granulite Gneisses from eastern Hebei Province, China. In *Archean Geochemistry* (ed. A. Kroner, G.N. Hanson and A.M. Goodwin). Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo, 204-234.
- Jahn, B.-m., Glikson, A. Y., Peucat, J. J. Hickman, A. H., 1981, REE geochemistry and isotopic data of Archean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, Western Australia: implications for the early crustal evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 1633-1652.
- Jahn, B.-m., Wu, F., Capdevila, R., Martineau, F., Zhao, Z., Wang, Y., 2001, Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wuduhe and Baderzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos* 59, 171-198.
- Lee, S. G., Song, Y.-S. and Masuda, A., 1994, 1.2 Ga Mineral Isochron of Changhowon Garnet Gneiss. *Jour. Geol. Soc. Korea*. 30, 62-68.
- Lee, S. G., Masuda, A., Shimizu, H. and Song, Y.-S., 2001, Crustal evolution history of Korean Peninsula in East Asia: The significance of Nd, Ce isotopic and REE data from the Korean Precambrian gneisses. *Geochem. Jour.* 35, 175-187.
- Lee, S. G., Lee, D. H., Kim, Y., Chae, B. G., Kim, W. Y., Woo, N. C., 2003, Rare earth elements as an indicator of groundwater environment changes in a fractured rock system: Evidence from fractured-filling calcite. *Appl. Geochem.* 18, 135-143.
- Lee, S. G., Kim, Y., Chae, B. G., Koh, D. C., Kim, K. H., 2004, The geochemical implication of a variable Eu anomaly in a fractured gneiss core: application for understanding Am behavior in the geological environment. *Appl. Geochem.* 19, 1711-1725.
- 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 Jour.* 1, 136-142.
- Lee, S. R., Cho, M., Hwang, J. H., Lee, B.-J., Lim, Y.-B. and Kim, J. C., 2003, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Preca. Res.* 121, 25-34.
- Masuda, A., Nakamura, N. and Tanaka, T., 1973, Fine Structure of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 239-248.
- Shimizu, H., Tanaka, T. and Masuda, A., 1984, Meteoritic ¹³⁸Ce/¹⁴²Ce ratio and its evolution. *Nature*, 307, 251-252.
- Shimizu, H., Amakawa, H., Sawatari, H. and Masuda, A., 1990, Estimation of light rare earth element patterns in original sources for rocks from their Ce and Nd isotopic ratios. *Mass Spectroscopy*, 38, 107-113.
- Tanaka, T., Shimizu, H., Kawata, Y. and Masuda, A., 1987, Combined La-Ce and Sm-Nd isotope systematics in petrogenetic studies. *Nature*, 327, 113-117.
- Tarney, J. and Windley, B. F., 1977, Chemistry, thermal gradients and evolution of the lower continental crust. *Jour. Geol. Soc. Lon.*, 134, 153-172.
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1981, The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from the sedimentary rocks. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* A301, 381-399.

(2004년 8월 15일 접수; 2004년 9월 9일 채택)