

## 영남육괴 중부 무주 지역에 위치하는 선캠브리아기 화강편마암 및 앰피블라이트 시추코아의 Sm-Nd 연대 및 지구화학적 특징

이승구<sup>1,\*</sup> · 김용제<sup>1</sup> · 김건한<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부, <sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

### Geochemistry and Sm-Nd isotope systematics of Precambrian granitic gneiss and amphibolite core at the Muju area, middle Yeongnam Massif

Seung-Gu Lee<sup>1,\*</sup>, Yongje Kim<sup>1</sup> and Kun-Han Kim<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Geological and Environmental Hazard Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
Daejeon 305-350, Korea

**요약:** 영남육괴의 중부의 무주군 적상면 삼유리 일대에는 선캠브리아기 원남층군에 해당되는 화강암질 편마암, 반상변정 화강암질 편마암과 우백질 편마암이 분포한다. 이 논문에서는 화강암질 편마암 지역에서 200 m 심도 까지 굴착한 시추코아의 조성분, 미량성분, 희토류원소 그리고 Sm-Nd, Rb-Sr 동위원소 자료의 지구화학적 의미를 토의하고자 한다. 시추코아의 암상은 심도에 따라 변하고, 주로 화강암질 편마암과 앰피블라이트로 구성되어 있다. 조성분 및 미량성분의 화학조성 자료를 토대로 한 연구지역내 화강암질 편마암 및 앰피블라이트의 기원물질은 각각 TTG(Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite) 계열 및 솔레아이트 계열의 암석에 속한다. 희토류원소의 분포도를 보면 경희토류(La-Sm)와 중희토류(Gd-Lu)의 변화 및 Eu의 부(-)의 이상이 매우 다양하다. Sm-Nd 동위원소자료에 따른 등시선에 의하면  $2,026 \pm 230(2\sigma)$  Ma의 연대를 보여주며, 이때의 Nd 초기치는  $0.50979 \pm 0.00028(2\sigma)$ 이다. 그리고  $\epsilon_{Nd}(2.0 \text{ Ga})$  값은  $-4.4$ 로 연구지역 변성암류의 기원물질이 고기의 지각물질임을 지지해준다. 이 값은 북중국지괴 시생대 기반암의 진화영역에 속하며, 특히 Lee *et al.*(2005)이 제안한 영남육괴내 Nd 동위원소 초기치의 진화와 일치하는 상관성을 갖는다. 그리고 앰피블라이트의 희토류원소 분포도와 Nd 초기치는 앰피블라이트의 기원물질이 결핍된 맨틀과 지각을 형성하기 시작한 초기마그마와 매우 유사함을 지지해준다.

**핵심어:** 영남육괴, 무주지역, 화강암질 편마암, 앰피블라이트, Sm-Nd 동위원소계, 북중국지괴, Nd 동위원소 초기치, 기원물질, 초기 마그마

**Abstract:** The Samyuri area of Jeoksang-myeon, Muju-gun at the Middle Yeongnam Massif consists of granitic gneiss, porphyroblastic gneiss and leucocratic gneiss, which correspond to Precambrian Wonnam Series. Here we discuss a geochemical implication of the data based on major element composition, trace element, rare earth element (REE), Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics of the boring cores in the granitic gneiss area. The boring cores are granitic gneiss (including biotite gneiss) and amphibolite. The major and trace element compositions of granitic gneiss and amphibolite suggest that the protolith belongs to TTG (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite) and tholeiitic series, respectively. Chondrite-normalized REE patterns vary in LREE, HREE and Eu anomalies. The granitic gneiss and amphibolite have Sm-Nd whole rock age of  $2,026 \pm 230(2\sigma)$  Ma with an initial Nd isotopic ratio of  $0.50979 \pm 0.00028$  (initial  $\epsilon_{Nd} = -4.4$ ), which suggests that the source material was derived from old crustal material. Particularly, this initial  $\epsilon_{Nd}$  value belongs to the range of the geochemical evolution of Archean basement in North-China Craton, and also corresponds to the initial Nd isotope evolution line by Lee *et al.* (2005). In addition, chondrite-normalized

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

REE pattern and initial Nd value of amphibolite are very similar to those of juvenile magma in crustal formation process.

**Key words:** Yeongnam Massif, Muju area, Granitic gneiss, Amphibolite, Sm-Nd isotope system, North-China Craton, Initial Nd isotope ratio, Source material, Juvenile magma

## 서 언

한반도의 캄브리아기 기저암은 낭림육괴, 경기육괴, 영남육괴로 크게 구분되며, 이 기저암들은 주로 후기 시생대에서 초기 원생대 고변성도의 편마암과 편암들로 구성되어 있다(Chough *et al.*, 2000). Lee *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 양쯔지괴와 경기육괴를 대비하여 설명하고자 하였다.

영남육괴의 경우 경기육괴에 비해 화성기원의 선캠브리아기 암석이 많이 분포하고 있기 때문에 비교적 많은 연구자들이 Sm-Nd 동위원소계, Rb-Sr 동위원소계 및 Pb-Pb 동위원소계에 의한 동시선 연대자료를 보고하였다(박계현 외, 1993; Lee *et al.*, 1994, 2001, 2005; Hong *et al.*, 1996; Cheong *et al.*, 2000; Kim and Cho, 2003). 그리고 최근에 Lee *et al.*(2001, 2005)는 영남육괴의 김천지역에 분포하는 흑운모 편마암과 화강암질 편마암 그리고 농거리-내덕리 화강암에서의 Sm-Nd 연대에 따른 Nd초기치를 토대로 영남육괴의 선캠브리아기 기반암이 남중국육괴보다는 북중국 육괴의 기원물질과 상관성이 매우 깊다고 보고한 바 있다. 이와 같은 연구결과는 영남육괴 선캠브리아기 기반암의 연구가 중국대륙과의 연관성을 밝혀내는 데 매우 중요한 열쇠가 될 수 있음을 시사해주는 것이다.

이 논문에서는 영남육괴의 중부 상단부의 무주군 적상면 삼유리 일대에 분포하는 선캠브리아기 원남층군의 화강암질 편마암, 반상변정 화강암질 편마암과 우백질 편마암 중, 화강암질 편마암 지역에서 굴착하여 획득한 화강암질 편마암과 앰피블라이트 시추코아의 주성분, 미량성분, 희토류원소 그리고 Sm-Nd, Rb-Sr 동위원소 자료를 토대로 연구지역내 변성암류의 생성연대 및 중국과의 동위원소 지구화학적 연관성을 토의하고자 한다. 특히 이광식 외(1997)는 본 연구지역에 인접한 지역에서 산출되는 앰피블라이트에 대한 지구화

학적 특성과 1.77Ga의 Sm-Nd 변성연대를 보고한 바 있다. 이 논문에서는 이광식 외(1997)가 발표한 앰피블라이트와 본 연구지역에서의 앰피블라이트 시추코아의 상관성도 토의하고자 한다.

## 지질개요 및 시료 특성

연구지역은 행정구역상 전라북도 무주군 적상면 삼유리 일대이다. 이 지역은 선캠브리아기 원남층군과 쥐라기 편상화강암, 백악기 적상산층군 및 상부 백악기의 관입암류 그리고 제4기 충적층으로 구성된다(Fig. 1). 연구지역내의 선캠브리아기 원남층군은 덕유산층, 괴목리층, 용포리층, 화강암질 편마암, 반상변정 화강암질 편마암, 우백질 화강편마암으로 이루어져 있다(이대성과 남기상, 1969). 시추위치는 이 중 화강암질 편마암지역에 위치하며, 심도 200m까지 실시되었다. 총 3개공이 10m 간격을 두고 시추되었고, 이 중 2개공에서는 전기간에 걸쳐 암석코어를 채취하였다. 전반적으로 화강암질 편마암이 우세하며, 이와 같은 화강암질 편마암은 흑운모의 양이 5% 전후의 우백질 화강편마암과 거의 편마암 코어 전체가 검은색을 띠는 우흑질 화강편마암으로 구분된다. 그러나 암상변화가 점이적인 변화를 보여주기 때문에, 이로 인해 심도에 따른 암석간의 명확한 경계를 나누기는 어렵다. 그리고 일부 심도(OW1-123, OW2-96.1)에서는 코어상으로 1m 두께 정도의 앰피블라이트가 산출되는데, 흑운모가 우세한 우흑질의 화강암질 편마암과 서로 인접하여 서로 교호하며 존재한다. 따라서 시추코아 만으로는 관입체인지 포획물인지를 명확히 구분하기가 어렵다. 시추공 주변의 노두상에서는 화강암질 편마암 혹은 우백질 화강편마암 이외는 상기의 앰피블라이트와 같은 변성염기성암 계열을 관찰하기가 어렵다. 그러나 이광식 외(1997)은 시추공의 동측에는 앰피블라이트가 관입암상으로 분포한다고 보고한 바 있다. 시추공 주변의 화강암질 편마암은 대체로 미약한 풍화가 진행된 상태로 분포하지만, 일부 지역에서는 신선한 노두가 관찰되기도 한다.

Table 1에는 화학분석에 이용된 시추코아의 암상 및 구성광물에 대한 요약용 기재하였다. Fig. 2의 a와 c는 화강암질 편마암의 코아 사진이고, Fig. 2의 b와 d는

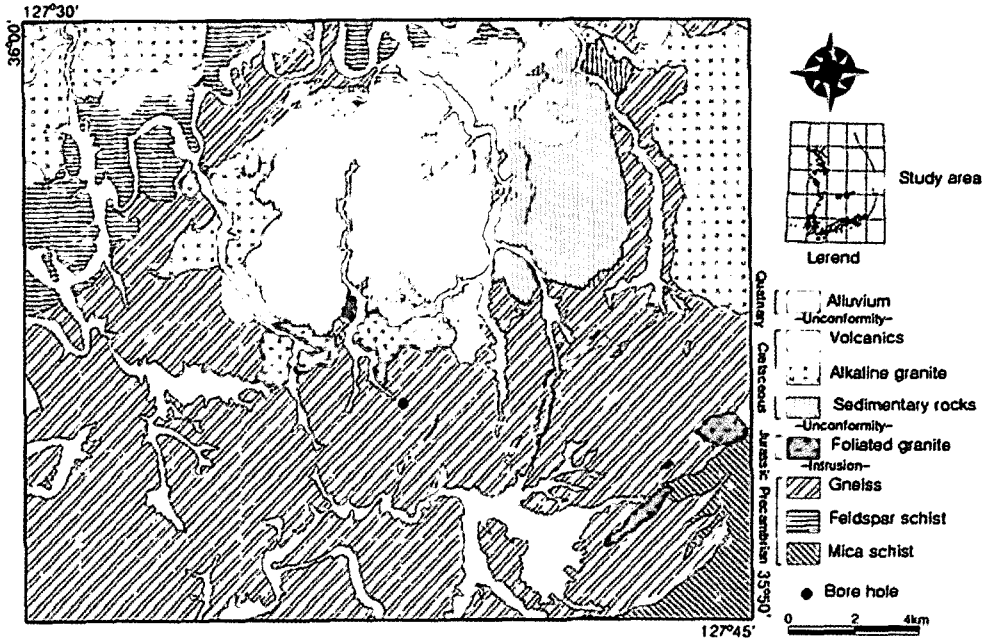


Fig. 1. Geological map of the study area, and the location of boring hole in granitic gneiss.

Table 1. Petrography of the core samples used in chemical analysis

Sample No.	Petrography	Mineralogy	
OW1	52.0 m	Granitic gneiss (Leucocratic)	Qtz+Pl+K-fd+Bio
	64.1 m	Granitic gneiss	Qtz+Pl+K-fd+Bio
	123 m	Amphibolite	Qtz+Hbr+Pl+Bio
	151 m	Granitic gneiss (Biotite-rich)	Qtz+Pl+K-fd+Bio
	172 m	Granitic gneiss (Biotite-rich)	Qtz+Pl+K-fd+Bio
	198 m	Granitic gneiss	Qtz+Pl+Gr+K-fd+Ch+Bio
OW2	24.5 m	Granitic gneiss	Qtz+Pl+Micro+Mus+Bio+Chl
	49.0 m	Granitic gneiss	Qtz+Pl+Gr+Ch+Bt
	72.2 m	Granitic gneiss (Hornblend-rich)	Qtz+Hbr+Bio+Pl+Chl
	96.1 m	Amphibolite	Hbr+Pl+Qtz+Bio
	172 m	Granitic gneiss (Garnet-rich)	Qtz+Gr+Bt+Pl+Chl
	200 m	Granitic gneiss (Biotite-rich)	Qtz+Pl+K-Fd+Biotite+Hb

Qtz: quartz, Pl: plagioclase, K-fd: mainly orthoclase, Bio:biotite, Gr: garnet, Mico: microcline, Hbr: hornblende, Chl: chlorite

엠펙볼라이트의 코아사진이다. Fig. 2a의 코아시료는 흑운모가 우세한 화강암질 편마암에 가깝고, Fig. 2c는 호상편마암의 양상을 보여준다. 그러나 이들 편마암들의 경계를 심도에 따라 명확히 구분하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2의 b와 d 같은 엠펙볼라이트 코아시료를 제외한 다른 시료들은 모두 화강암질 편마암으로 명명하였다. 그리고 OW2-49와 OW2-172 시료는 2-10 mm의 큰 석류석 반상변정이 육안으로도 관찰된다.

### 시료 및 분석방법

연구지역내에 굴착된 2개의 시추공에서 채취된 선캠브리안기 변성암류의 시추코아로부터 심도 및 암상에 따라 12개의 부분을 선택하여 이들에 대해 주성분, 희토류원소 및 Sm-Nd 동위원소비와 Rb-Sr 동위원소비를 측정하였다. Table 1에는 화학분석에 이용된 코아시료의 암상 및 광물조성에 대해 기재하였다.

주성분원소와 희토류원소는 한국지질자원연구원의

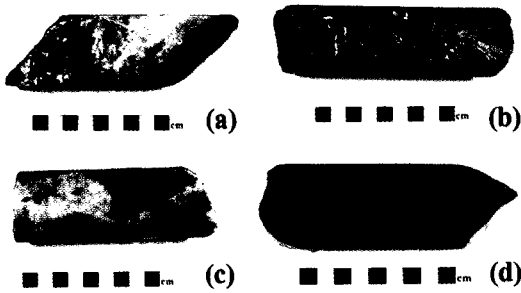


Fig. 2. Photograph of the core samples used in chemical analysis: (a) granitic gneiss(OW1-198), (b)amphibolite (OW2-96.1), (c)granitic gneiss(OW2-24.5), (d) amphibolite (OW1-123).

XRF(Shimadzu MXF-2300)와 ICP-MS(Elan 6100, Perkin-Elmer Ltd.)를 이용하여 분석하였다. 주성분의 분석오차는 3% 이내이고 미량원소와 희토류원소의 경우 분석오차는 10% 이내로 판단된다. 희토류원소의 실험 방법은 김건한과 음철현(2004)에 기재되어 있다. 연대 측정을 위한 Nd, Sm, Sr, Rb의 함량과 Nd, Sr 동위원소비는 한국기초과학지원연구원의 열이온화 질량분석기(VG Sector 54-30)를 이용하여 측정하였다. NIST987 Sr 표준시료의 18회 반복측정에 의한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는  $0.710236 \pm 0.000017$  ( $N=18$ ,  $2\sigma$ )이고, 이때의 바닥값은 Sr, Rb 모두 0.3 ng 이하였다. LaJolla Nd 표준시료의 경우 20회 반복측정한  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  값이  $0.511844 \pm 0.000012$  ( $N=20$ ,  $2\sigma$ ) 였고, Sm, Nd의 바탕값은 0.1 ng 이하였다.

## 결 과

### 주원소 및 희토류원소

주성분원소 및 희토류원소의 분석결과는 Table 2에 기재되어 있다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이, 심도별 화학조성의 변화가 매우 심함을 알 수 있다. 화강암질 편마암의 경우  $\text{SiO}_2$ 의 함량변화가 60.4-80.2%로 변화폭이 매우 크며, total  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO의 함량도 각각 0.64-10%, 0.28-4.2%로 변화폭이 크다. 반면에  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함량은 11.3-15.7%로 다른 성분에 비해 비교적 변화폭이 좁다. 암피블라이트의 화학조성은  $\text{SiO}_2$ 의 함량변화가 50% 전후,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 함량은 13.5% 전후, total  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO의 함량도 각각 10.3-14.9%, 6.71-7.79%로서 비교적 전반적으로 일정하다. 코아시료의 기원물질과 산성암(화강암질 편마암)의 분류를 위한 AFM도와 An-Ab-Or도를 Fig. 3에 도시하였다.

운석으로 규격화한 희토류원소의 분포도는 Fig. 4에

도시하였다. 그리고 Fig. 4d에는 이광식 외(1997)가 발표한 암피블라이트(본 연구지역의 동쪽에 위치)의 자료도 함께 도시하였다. 우선 Table 2를 보면, 화강암질 편마암의 희토류원소 전체함량도 주성분과 마찬가지로 40-300 ppm의 넓은 변화폭을 보여주고, 암피블라이트는 25-40 ppm으로 균질하다. 그리고 운석으로 규격화한 Fig. 4을 보면 전체적으로 크게 1) 경희토류(LREE)가 부화되고 중희토류(HREE)가 결핍된 일반적인 지각 구성 화강암질 암석의 특성을 보여주는 것, 2) 경희토류와 중희토류가 서로 부화되는 즉 V자형의 특성을 보여주는 것, 3) 비교적 약한 Eu의 부(-)의 이상과 더불어 경희토류와 중희토류 모두 편평한 양상을 갖는 것, 4) Eu의 매우 강한 부(-)의 이상과 더불어 편평한 양상(부분적으로 테트라드 효과가 보임, Masuda *et al.*, 1987; Lee *et al.*, 1994 참조)을 갖는 것과 같이 4개의 매우 복잡한 분포도 특성을 갖는 것으로 나눌 수 있다.

### Sm-Nd 및 Rb-Sr 동위원소계

Table 3에는 연구지역에서의 코아시료들에 대한 Sm-Nd, Rb-Sr 동위원소비가 기재되어 있다. 화강암질 편마암의  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 0.511012-0.514213과 같이 넓은 변화폭을 갖고, 암피블라이트는 0.512373-0.512673으로 CHUR의 현재값에 근접한 값의 범위를 보여준다. Fig. 5a와 5b에는 Sm-Nd 및 Rb-Sr동위원소계를 도시하였으며, Ludwig(1999)의 ISOPLLOT 프로그램을 이용하여 Sm-Nd 및 Rb-Sr의 등시선 연대를 계산하였다. Fig. 5a의 암피블라이트를 포함한 Sm-Nd 연대측정값은  $2026 \pm 230(2\sigma)$ Ma로서 Nd 초기치가  $0.50979 \pm 0.00028$ 로  $\epsilon_{\text{Nd}}(2.03\text{Ga})$ 는 -4.4이다. 그리고 암피블라이트를 제외하고 계산된 Sm-Nd 연대측정값은  $1986 \pm 120(2\sigma)$ Ma로서 Nd 초기치가  $0.50978 \pm 0.00015$ 로  $\epsilon_{\text{Nd}}(1.99\text{Ga})$ 는 -5.6이다. 일반적으로 Rb-Sr 동위원소계의 경우 변성작용 혹은 변질작용에 의한 영향을 쉽게 받는 연유로, 변성암류에서의 올바른 등시선 연대를 구하는 것은 어렵다. 이와 같은 연유로 Fig. 5b의 직선은 등시선이라기보다는 오시선(error-chron)으로 보는 것이 타당하다고 본다. 그리고 Rb-Sr 동위원소계의 경우에도 암피블라이트를 포함하여 오시선 값을 계산하면  $1330 \pm 280(I_{\text{Sr}} = 0.743 \pm 0.027)$ 이고, 암피블라이트를 제외하고 계산하면  $1285 \pm 310(I_{\text{Sr}} = 0.751 \pm 0.033)$ 으로 대체적으로 유사하다.

Table 3의 Nd 모델연대( $T_{\text{DM}_2}$ )를 보면 암피블라이트와 화강암질 편마암이 대체적으로 유사한 값을 갖고 있다.

일반적으로 지각을 구성하는 암석의 Nd 모델연대( $T_{\text{DM}}$ )는 아래의 식과 같은 정의에 따라, 해당 암석이

**Table 2. Major element composition (%) and REE abundance (ppm) of the core samples from the boreholes in Muju area, Korea**

Core Depth	OW1						OW2					
	52.0 m	64 m	123 m	151 m	172 m	198 m	24.5 m	49.0 m	72.2 m	96.1 m	172 m	200 m
Rock type	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Amphibolite	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Granitic gneiss	Amphibolite	Granitic gneiss	Granitic gneiss
SiO <sub>2</sub>	77.4	80.1	52.6	66.2	65.8	73.5	77.6	75.2	52.9	49.1	53.1	60.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.4	11.3	13.5	14.5	14.6	12.9	12.5	12.2	14.2	13.9	13.4	15.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>total</sup>	0.64	1.14	11.7	5.12	5.91	3.72	1.34	6.26	10.4	14.9	10.3	10
CaO	1.03	0.83	10.8	2.62	2.32	1.87	0.93	0.26	7.11	6.89	10.2	2.14
MgO	0.3	0.9	6.71	3.61	3.46	1.34	0.28	1.14	8.65	7.7	7.79	4.2
K <sub>2</sub> O	0.72	1.02	0.32	2	2.67	1.34	1.91	2.7	1.23	0.68	0.43	2.45
Na <sub>2</sub> O	5.31	3.66	1.8	3.33	2.9	2.91	4.04	0.42	1.99	2.63	2.13	2.58
TiO <sub>2</sub>	0.06	0.11	0.82	0.29	0.56	0.34	0.1	0.05	0.42	1.05	0.63	0.56
MnO	0.01	0.01	0.14	0.06	0.08	0.05	0.01	0.09	0.14	0.16	0.19	0.26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.07	0.03	0.06	0.05	0.01	0.01	0.15	0.09	0.04	0.03
LOI	0.88	0.88	1.02	2.04	1.32	1.81	0.9	1.52	2.3	2.7	1.41	1.6
Total (%)	99.76	99.96	99.48	99.8	99.68	99.83	99.62	99.85	99.49	99.8	99.62	99.92
Th (ppm)	-	4.56	0.57	1.66	-	20.3	17.5	-	-	-	-	2.64
U	-	1.36	0.41	4.03	-	2.76	8.16	-	-	-	-	0.67
Rb	18.0	48.8	8.61	201	186	71	43.0	90.5	70.1	32.8	21.3	112.0
Sr	137	159	108	101	123	105	37.5	12.9	129	188	71	81
Ba	-	288.2	16.3	134	-	229.7	255.4	-	-	-	-	318.8
Zr	-	46.1	5.86	15.2	-	24.4	30.5	-	-	-	-	9.51
Sc	-	-	39.9	11.8	-	11.3	494	-	-	-	-	38.8
Ta	-	11	2.81	-	-	-	4.95	-	-	-	-	-
Y	-	3.17	28.3	73.7	-	32.9	6.24	-	-	-	-	95.5
La	71.3	16.70	2.92	6.52	33.9	36.3	26.8	23.8	11.5	2.79	5.89	7.79
Ce	141	31.20	7.31	11.20	67.8	76.7	45	54.7	36.1	7.41	15.8	15.2
Pr	14.5	3.42	1.00	1.19	7.3	8.34	4.16	5.96	6.15	1.07	1.8	1.6
Nd	55.1	13.00	5.84	4.88	30.3	34.8	14.5	30.1	36.1	6.27	8.25	6.51
Sm	8.92	2.27	1.92	1.96	5.75	6.76	2.5	6.13	15.5	1.92	2.69	1.37
Eu	0.67	0.36	0.54	0.26	0.98	0.72	0.46	0.23	0.5	0.56	0.54	0.47
Gd	5.62	1.46	2.09	2.87	4.71	4.94	2.35	6.22	20.9	2.17	2.98	2.04
Tb	0.69	0.14	0.48	0.83	0.71	0.65	0.18	1.53	5.33	0.48	0.533	0.69
Dy	3.18	0.55	3.64	6.45	4.38	4.05	1.3	12.4	42.8	3.8	3.46	8.29
Ho	0.49	0.09	0.77	1.41	0.84	0.62	0.24	2.95	9.32	0.8	0.764	2.41
Er	1.21	0.24	2.40	5.37	2.36	2.15	0.61	9.96	29.1	2.57	2.1	9.93
Tm	0.18	0.04	0.37	1.01	0.31	0.34	0.097	1.57	4.03	0.38	0.32	1.84
Yb	1.01	0.23	2.48	8.83	2.07	2.53	0.74	11.1	26.2	2.67	2.17	14.6
Lu	0.12	0.04	0.31	1.26	0.29	0.45	0.12	1.34	3.02	0.31	0.324	1.98
<sup>1</sup> Eu/Eu*	0.27	0.58	0.83	0.34	0.56	0.37	0.57	0.11	0.09	0.84	0.59	0.87
<sup>2</sup> (La/Yb) <sub>N</sub>	39.75	47.54	0.82	0.82	9.69	11.39	29.88	1.61	0.27	0.73	1.89	0.53

1) Eu\* is defined as the ratio of observed Eu abundance to that which would fall on the Sm-Gd join in chondrite-normalized REE patterns.

2) The REE abundance in the Leedy chondrite (Masuda et al., 1973; Masuda, 1975) are employed as normalizing values.

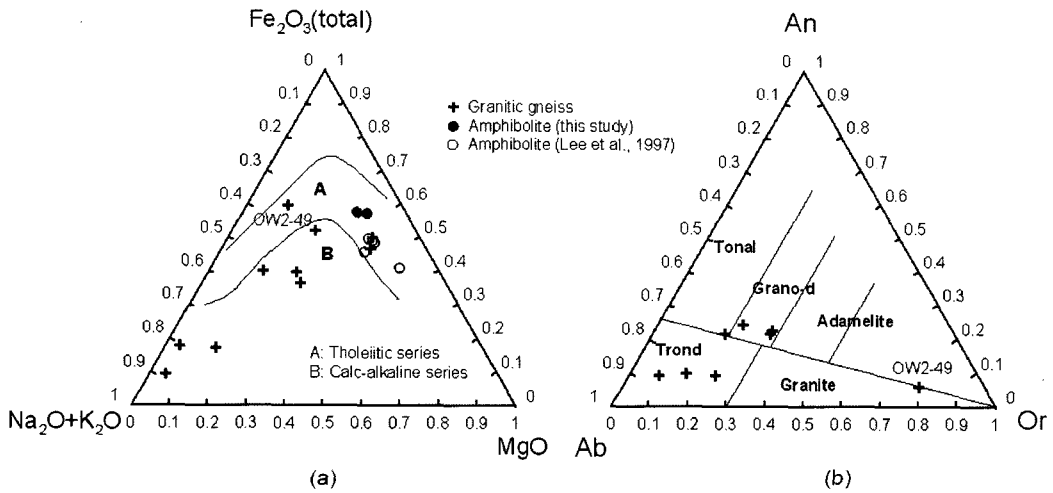


Fig. 3 (a) AFM diagram showing that protoliths of the granitic gneiss, metabasite and amphibolite belong to the tholeiitic and the calc-alkaline with the latter dominating in abundance. (b) Plot of normative feldspar composition showing classification of acid rocks (O'Connor, 1965). Trond: trondhjemite, Tonal: tonalite, Grano-d.: granodiorite.

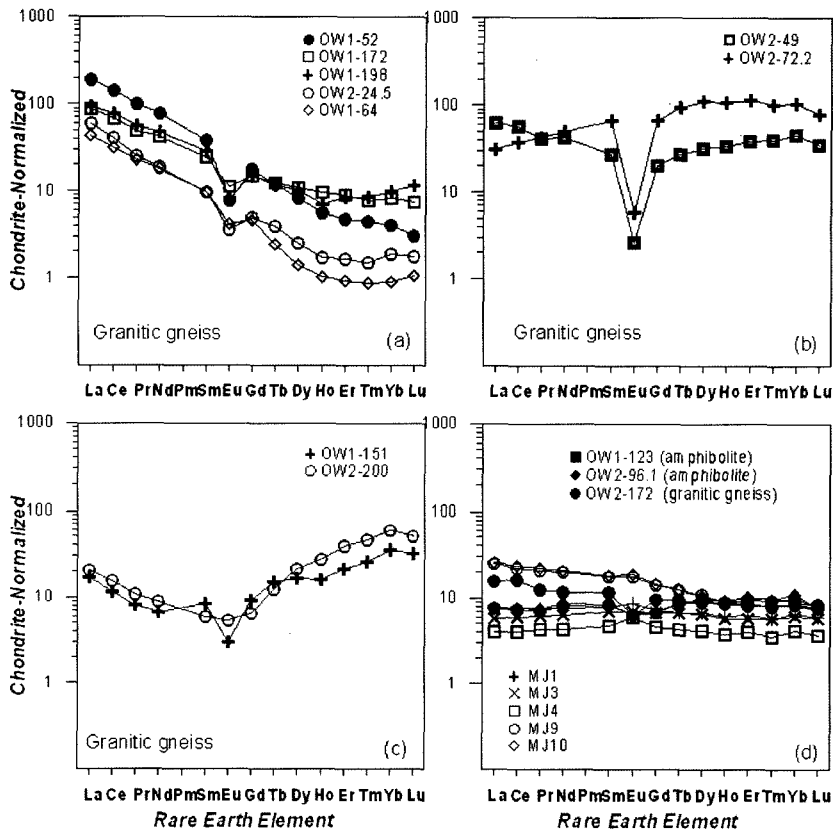


Fig. 4. Chondrite-normalized REE pattern (Masuda *et al.*, 1973; Masuda, 1975) of metamorphic rock cores at Samyuri, Muju. OW2-172: Garnet porphyroblastic granitic gneiss. (a)-(c): granitic gneiss, (d): amphibolites (including of data (MJ1-10) by Lee *et al.* (1997).

Table 3. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data for the gneiss cores from the two holes (OW1 and OW2) at Samyuri area, Muju, Korea

sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(1)	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd(1)	Sm (ppm)	Nd (ppm)	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	$\epsilon_{Nd}(0)^{(2)}$	$\epsilon_{Nd}^*(2.03Ga)$	$T_{DM-1}^{(3)}$ (2.03Ga)	$T_{DM-2}^{(4)}$ (2.03Ga)	$f_{SmNd}$
OW1-52	18.0	137	0.3806	0.748089 ± 0.000013	0.511176 ± 0.000018	8.23	47.0	0.1058	-28.5	-4.85	2.77	2.87	-0.46
OW1-64	48.8	159	0.8922	0.773020 ± 0.000014	0.511338 ± 0.000006	2.31	11.1	0.1252	-25.4	-6.75	3.10	3.02	-0.36
OW1-123	8.61	108	0.2318	0.715775 ± 0.000012	0.512652 ± 0.000017	1.97	6.14	0.1940	0.3	0.97	3.82	2.40	-0.01
OW1-151	201	101	5.868	0.902732 ± 0.000014	0.514217 ± 0.000018	2.89	5.23	0.3344	30.8	-5.11	1.35	2.89	0.70
OW1-172	186	123	4.417	0.769323 ± 0.000014	0.511449 ± 0.000019	5.41	27.7	0.1182	-23.2	-2.73	2.70	2.70	-0.40
OW1-198	71	105	1.957	0.788633 ± 0.000012	0.511534 ± 0.000005	6.77	31.4	0.1303	-21.5	-4.24	2.93	2.82	-0.34
OW2-24.5	43.0	37.5	3.361	0.837650 ± 0.000012	0.511012 ± 0.000015	2.39	14.6	0.0987	-31.7	-6.21	2.82	2.98	-0.50
OW2-49	90.5	12.9	21.16	1.130885 ± 0.000014	0.511849 ± 0.000016	6.51	23.8	0.1655	-15.4	-7.60	4.07	3.06	-0.16
OW2-72.2	70.1	129	1.574	0.747958 ± 0.000014	0.513187 ± 0.000015	20.1	45.4	0.2676	10.7	-7.82	0.10	3.12	0.36
OW2-96.1	32.8	188	0.5054	0.729941 ± 0.000014	0.512673 ± 0.000015	2.30	7.18	0.1940	0.7	1.41	3.65	2.36	-0.01
OW2-172	21.3	71	0.8765	0.759095 ± 0.000012	0.512373 ± 0.000011	3.00	9.20	0.1977	-5.2	5.45	7.25	2.90	0.01
OW2-200	112.0	81	4.0790	0.873731 ± 0.000012	0.511737 ± 0.000011	1.39	5.80	0.1463	-17.6	-4.46	3.17	2.83	-0.26

1) <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd ratios were corrected for mass fractionation relative to <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.1194 and <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219, respectively.

2) calculated from CHUR value: <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512638

3) For DM model age calculation; <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.51315, <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd = 0.2137

$$T_{DM}^{Nd} = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left[ 1 + \frac{({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - 0.51315}{({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - 0.2137} \right] \text{ where } \lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$$

4)  $T_{DM2}^{Nd} = T_{DM}^{Nd} - (T_{DM}^{Nd} - T_{START}) \left[ \frac{f_{cc} - f_{measured}}{f_{cc} - f_{DM}} \right]$  where  $f_{DM} = 0.08592$  is the  $f_{SmNd}$  value of DM reservoir;  $f_{cc} = -0.4$ , (Keto and Jacobsen, 1987)

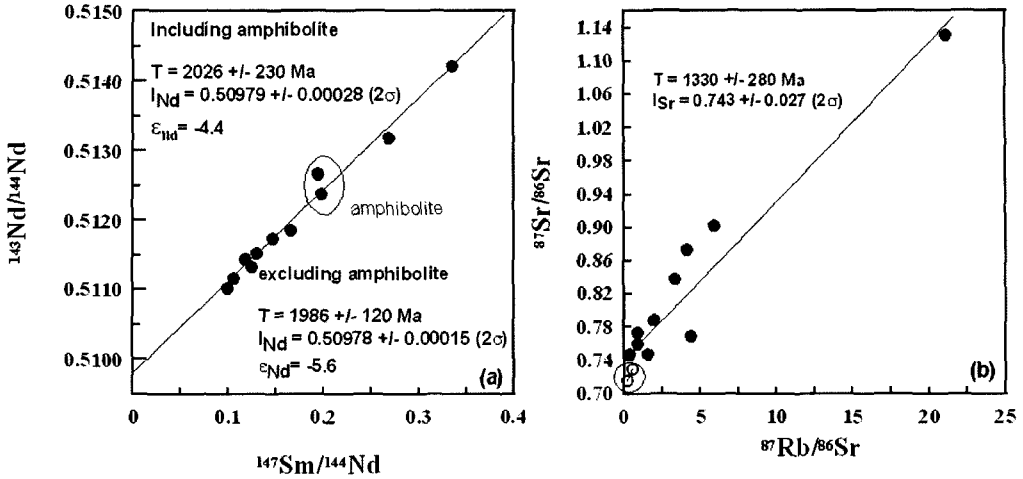


Fig. 5. (a) Sm -Nd isochron (b) Rb-Sr errorchron diagram for the gneiss and amphibolite cores.

맨틀로부터 분리된 시간을 의미한다.

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

이때,  $\epsilon_{Nd}(T)$ 는 4.55Ga에서  $\epsilon_{Nd}(4.55\text{Ga})=0$ 이고, 현재에서  $\epsilon_{Nd}(0)=10({}^{143}\text{Nd} / {}^{144}\text{Nd})_{\text{sample}} - 0.51315$ ,  ${}^{147}\text{Sm} / {}^{144}\text{Nd} = 0.2137$ , Jahn *et al.*, 2001)이다. 상기의 식에 따라, 지각내에서의 순환은 암석의 모델연대값이 변하지 않는다는 것이 Nd 모델연대 계산의 일반적인 가정이다. 그리고 결핍된 맨틀(depleted mantle)로부터의 새로운 기원물질이 유입된다면 모델연대값은 감소하게 된다. 그러나 이와 같은 Sm-Nd 모델연대가 지각내 평균체류시간을 대표한다는 가정은 Sm/Nd의 분별작용이 일어나지 않는다는 전제조건이 필요하다. 생성시기나 암상에 관계없이 대부분의 화강암이나 세립질 퇴적물에서 보여주는 비교적 일정한 Sm/Nd는 대부분의 지각용융이나 퇴적과정 동안 Sm/Nd의 분별작용이 일어나지 않았다는 것을 지지해주는 것이다(Jahn *et al.*, 1990). 최근에 Jahn *et al.*(2001)은 희토류원소의 테트라드 효과를 갖고 있는 화강암류의 경우 상기의 가정에 의한 모델연대계산이 맞지 않는다는 것을 인식하고, Keto and Jacobson (1987)의 가설을 토대 아래와 같은 2단계에 걸친 Nd 모델연대식을 제안하였다.

$$T_{DM2}^{Nd} = T_{DM}^{Nd} - (T_{DM}^{Nd} - T_{START}) \left[ \frac{f_{cc} - f_{measured}}{f_{cc} - f_{DM}} \right]$$

여기서  $f_{cc}$ ,  $f_s$  그리고  $f_{DM}$ 은 각각 대륙지각, 시료 그리고 결핍된 맨틀의  $f_{Sm/Nd}$  값이다. 이 논문에서는  $f_{DM} = 0.08592$ ,  $f_{cc} = -0.4$ (Keto and Jacobsen, 1987), 암석의 형성연대는 2.03Ga(본 연구지역내 앰피블라이트를 포함한 정편마암류의 생성연대)를 사용하였다.

화강암계열의 지각구성암석들은 일반적으로  $f_{Sm/Nd} = -0.4$  정도이다(DePaolo, 1988). 최근, Jahn *et al.*(2001)과 Wu *et al.*(2005)은  $f_{Sm/Nd} = -0.4 \pm (-0.2)$ 의 영역에 위치하는 화강암류에 대한 상기의 Nd 모델연대는 신뢰할 만 하지만, 이를 벗어난 경우  $T_{DM2}$ 가 보다 더 타당한 값을 보여주었다. Table 3의 모델연대값을 보면, 대체로  $f_{Sm/Nd}$  값이  $(-0.4) \pm (-0.2)$ 의 범위에 놓이는 화강암질 편마암 시료들(OW1-52, OW1-64, OW1-198, OW2-200 외)은  $T_{DM1}$ 과  $T_{DM2}$ 가 거의 일치하지만, OW1-123, OW2-72.2, OW2-172와 같은 시료는  $T_{DM1}$ 과  $T_{DM2}$ 의 차이가 크거나 혹은  $T_{DM1}$ 의 값이 비현실적이다. 이와 같은 비정상적인 모델연대값은  $f_{Sm/Nd}$  값이 0에 가깝거나 0보다 큰 것에 기인된다. 이 경우의  $f_{Sm/Nd}$  값은 희토류원소의 테트라드 효과와 유사한 패턴을 갖도록 만든 지각내에서의 독특한 환경이나 혹은 결핍된 맨틀(depleted mantle)로부터의 새로운 기원물질이 유입에 의한 영향일 것으로 판단된다. 그리고 Table 3의  $T_{DM2}$ 의 값들을 보면 2.36-3.17 Ga의 범위에 놓이는 데, 이는 연구지역내 변성암류들의 기원물질이 시생대의 결핍된 맨틀로부터 유래되었을 가능성을 지지해주는 것이다.



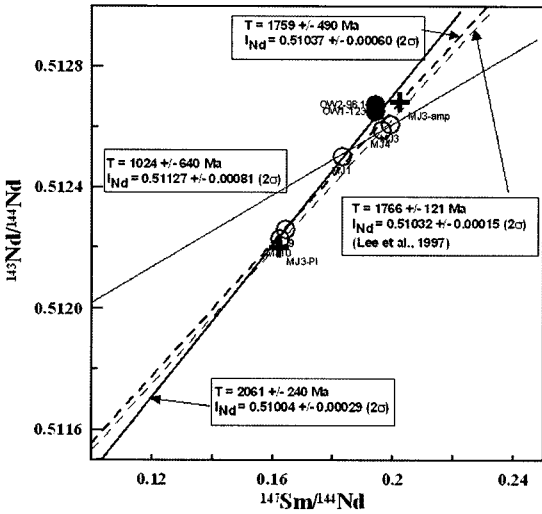


Fig. 6. Replotted Sm-Nd whole rock and mineral isochron diagram for amphibolites based on this study and Lee et al. (1997).

토 의

화강암질 편마암 및 앰피블라이트의 생성연대

이광식 외(1997)은 본 연구지역의 동쪽에 위치한 지역에서의 앰피블라이트의 지구화학적 특성과 Sm-Nd 광물연대를 보고한 바 있다. Fig. 6은 본 연구지역(시추공 지역)과 인접한 지역(동쪽으로 약 4 km 떨어진)으로부터 산출된 앰피블라이트에 대해 발표한 이광식 외(1997)의 자료와 본 연구에서 얻어진 앰피블라이트의 자료를 같이 도시한 도면이다. 이광식 외(1997)에 의하면 시료 MJ1, 3, 4는 한 암체에서 채취하였으며, MJ9와 MJ10은 남서쪽으로 약 12-14 km 떨어진 지점의 각각 다른 암체에서 채취하였다고 기재하였다. 연대추정에서는 Fig. 6과 같이, MJ3의 사장석과 각섬석에 의한 1,766±121 Ma의 Sm-Nd 연대를 구한 후, 이를 현무암에서 앰피블라이트를 형성시킨 변성연대로 해석하였다. 그리고 MJ9와 MJ10은 동위원소비와 희토류원소의 지구화학적인 특성에서 볼 때, MJ 1, 3 및 4와 동일한 시기에 동일한 초기물질로부터 형성된 것으로 보기는 어렵다고 결론지었다. 그럼에도 불구하고, 이 지역에서의 앰피블라이트들은 초생마그마의 특성을 갖는 기원물질로부터 유래된 것으로 해석하였다. 비교를 위해 Table 4에는 본 연구에서의 앰피블라이트의 Sm-Nd 동위원소계 자료와 이광식 외(1997)의 자료를 다시 정리하였다. 이 중 MJ9와 MJ10의 산출지역은 본 연구에서의 앰피블라이트의 시추코아지역과 가까운 위치에 놓인다.

본 연구에서의 앰피블라이트는 Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이, 이광식 외(1997)의 자료와 함께, 세 가지 방향에서 앰피블라이트의 전암연대 자료를 보다 세밀하게 검토를 할 수가 있다. 우선 모든 앰피블라이트의 자료를 포함하는 연대치(굵은 파선)는 1,759±490 Ma로 이는 MJ3의 광물연대와 매우 유사하다. 그러나 이광식 외(1997)도 지적한 바와 같이, 1) 우선적으로 동일한 암체가 아니고 2) 오차의 변화가 큰, 즉 동위원소적으로 불균질하였을 가능성이 높으므로 이 1,759±490 Ma의 값은 오시에에 의한 것으로 판단된다. 이광식 외(1997)은 MJ3의 광물분리자료를 가지고 구한 1,766±121 Ma의 Sm-Nd 연대치(Fig. 6의 얇은 파선)를 앰피블라이트의 변성연대로 규정하였다. 그러나 한 암체에서 채취된 MJ1, MJ3, MJ4의 자료를 볼 때, 이 3 시료는 거의 한 직선상(얇은 직선)에 놓인다. 이를 토대로 연대를 계산해 보면 1,024±640 Ma의 매우 젊은 연대가 된다. 이와 같이 MJ3의 광물연대와 큰 차이로 계산되는 것은 MJ3의 사장석과 앰피블라이트의 Sm-Nd 동위원소비에 의해 등시선이 영향을 받았기 때문이다. 그리고 비록 상호간에 정확한 거리는 알 수 없지만, Fig. 6의 굵은 실선에서와 같이 본 연구지역내 앰피블라이트 시추코아와 이광식 외(1997)의 MJ9, MJ10 시료가 2,051±240 Ma의 값을 갖으면서 거의 한 직선상에 놓임을 알 수가 있다. 이 값은 Fig. 5a의 본 연구지역내 화강암질 편마암(앰피블라이트 제외)에서 얻어진 1,986±120 Ma 및 앰피블라이트를 함께 포함하여 계산한 2,026±230 Ma와 매우 유사하다. 이 연구에 사용된 시추코아 시료의 특성 설명에서 앰피블라이트의 산상이 포획물인지 혹은 관입상인지를 구분하기가 모호하다고 언급한 바 있다. 이광식 외(1997)는 앰피블라이트의 기원물질이 CHUR과 유사한 특성을 갖는 부화된 맨틀 혹은 결핍된 맨틀물질로 된 마그마가 상승되면서 지각물질에 의해 오염된 것으로 해석하였다. 특히 이들은 1,766±121 Ma의 Sm-Nd 연대치를 앰피블라이트의 변성연대로 규정하였다. 이는 앰피블라이트의 기원물질은 보다 더 오래전에 형성되어졌음을 지시하는 것이다. 그리고 Table 4의  $T_{DM2}$ 의 모델연대를 보면 MJ9, MJ10 및 OW1-123, OW2-96.1의 값이 2.36-2.40 Ga로 매우 유사하게 나타난다. 아울러 본 연구지역내 시추코아의 희토류원소 분포도(Fig. 4d 참조)는 Eu의 이상이 없는 거의 편평한 양상 즉 초기마그마(juvenile magma)의 양상과 매우 유사하고, MJ9와 MJ10은 경희토류가 약간 부화된 즉 결핍된 맨틀로부터 분리된 양상을 보여준다. 이는 이광식 외(1997)의 자료를 포함한 본 연구지역내 앰피블라이트가, 비록 초

**Table 4. Summary for Sm-Nd isotope ratio including previous data (MJ1-MJ10: Lee et al., 1997) at Samyuri area, Muju, Korea**

sample	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd <sup>1)</sup>	Sm (ppm)	Nd (ppm)	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	ε <sub>Nd</sub> (0) <sup>1)</sup>	ε <sub>Nd</sub> (2.03Ga)	T <sub>DM-1</sub> <sup>2)</sup> (2.03Ga)	T <sub>DM-2</sub> <sup>3)</sup> (2.03Ga)	f <sub>Sm/Nd</sub>
OW1-123	0.512652 ± 0.000017	1.97	6.14	0.1940	0.3	0.97	3.82	2.40	-0.01
OW2-96.1	0.512673 ± 0.000015	2.30	7.18	0.1940	0.7	1.41	3.65	2.36	-0.01
MJ9	0.512262 ± 0.000008	3.37	12.42	0.1642	-7.3	-2.73	2.72	2.39	-0.1
MJ10	0.511230 ± 0.000014	3.94	14.67	0.1303	-0.9	-4.24	2.72	2.40	-0.17
MJ1	0.512503 ± 0.000010	1.93	6.39	0.1831	-2.6	-6.21	3.20	2.40	-0.26
MJ3	0.512609 ± 0.000010	1.80	5.47	0.1989	-0.6	-7.60	5.48	2.56	-0.07
MJ4	0.512590 ± 0.000026	1.17	3.61	0.1960	-0.9	-7.82	4.77	2.53	0.01

1) calculated from CHUR value: <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512638

2) For DM model age calculation: <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.51315, <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd = 0.2137

$$T_{DM}^{Nd} = \frac{1}{\lambda} \times \ln \left[ 1 + \frac{(\frac{143}{144}Nd/\frac{144}{144}Nd)_{sample} - 0.51315}{(\frac{147}{144}Sm/\frac{144}{144}Nd)_{sample} - 0.2137} \right] \text{ where } \lambda = 6.54 \cdot 10^{-12}a^{-1}$$

$$3) T_{DM2}^{Nd} = T_{DM}^{Nd} - (T_{DM}^{Nd} - T_{START}) \left[ \frac{f_{cc} - f_{measured}}{f_{cc} - f_{DM}} \right] \text{ where } f_{DM} = 0.08592 \text{ is the } f_{Sm/Nd} \text{ value of DM reservoir;}$$

f<sub>cc</sub> = -0.4, (Keto and Jacobsen, 1987)

기 마그마가 상승하면서 지각물질에 의해 일부 오염되었을 지라도, 초기마그마(juvenile magma)의 특성을 갖는 동일기원물질로부터 유래되었을 가능성을 지지해주는 것이다. 그러므로 본 연구지역내 화강암질 편마암(엠피블라이트 제외)에서 얻어진 1,986 ± 120 Ma 및 엠피블라이트를 함께 포함하여 계산한 2,026 ± 230 Ma 그리고 이광식 외(1997)의 엠피블라이트 자료와 함께 계산된 2,051 ± 240 Ma의 Sm-Nd 연대가 지질학적으로 의미가 있는 것으로 볼 수 있다. 즉 본 연구지역의 화강암질 편마암의 기원물질은 2.03 Ga 정도의 시기에 형성되어 졌으며, 이 화강암질 편마암의 기원물질은 엠피블라이트의 기원물질과 매우 밀접한 연관성을 갖는 것으로 해석된다.

**무주지역 삼유리 정편마암류와 한반도 기저암 지각진화사**

최근에 Lee et al.(2001, 2005)은 영남육괴에서의 김천일대에 분포하는 선캠브리아기 정편마암류와 농거리내덕리의 화강암에서의 Sm-Nd 연대측정자료 및 중국의 선캠브리아기 기저암(정편마암류 및 화강암류)의 자료를 영남육괴의 선캠브리아기 기반암의 지구화학적 지각진화사가 북중국지괴(North China Craton)와 매우 밀접한 연관성을 갖고 있는 것으로 제안했다. 연구지역 또한 영남육괴의 일부분이며, 화강암질 편마암, 변성염기성암과 엠피블라이트 모두 정편마암류에 속하므

로, 이 지역에서 얻어진 Sm-Nd 동위원소 연대의 Nd 초기치는 Lee et al.(2005)의 ε<sub>Nd</sub>(T) 진화영역에 귀속될 것이라는 가정이 성립된다.

Fig. 7은 Lee et al.(2005)가 제안한 영남육괴의 Nd 동위원소 초기치의 진화곡선이다. Fig. 7의 영역안에 금번 연구에서 얻어진 무주지역의 화강편마암과 엠피블라이트의 Sm-Nd 연대를 토대로 각 시료에 대하여 그 값을 도시하였다. Fig. 7에서 화강암질 편마암은 사각형으로, 엠피블라이트는 원안에 검은 사각형으로 표시되어 있다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 연구지역내 정편마암류의 Nd 초기치가 Lee et al.(2005)가 제안한 진화선상에 정확히 놓임을 알 수 있다. 이와 같은 Nd 동위원소 초기치의 특성은 중국의 선캠브리아기 지각구성물질과 관련된 Lee et al.(2005)의 영남육괴 지각진화사 경향과 일치한다.

**무주지역 삼유리 정편마암류정편마암류의 지구화학적 특성과 기원물질**

Fig. 3a의 AFM도와 화강암질 편마암에 대한 Fig. 3b의 An-Ab-Or diagram(O'Connor, 1965)를 보면 시료 OW2-49를 제외한 모든 시료가 칼크-알칼리계열 및 TTG(Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite) 계열의 암석에 속함을 알 수 있다. 그리고 화강암질 편마암에서의 Rb과 Yb + Ta의 상관관계를 Fig. 8에 도시하면(Pearce et al., 1984), 연구지역내 화강암질 편마암은 WPG(within-

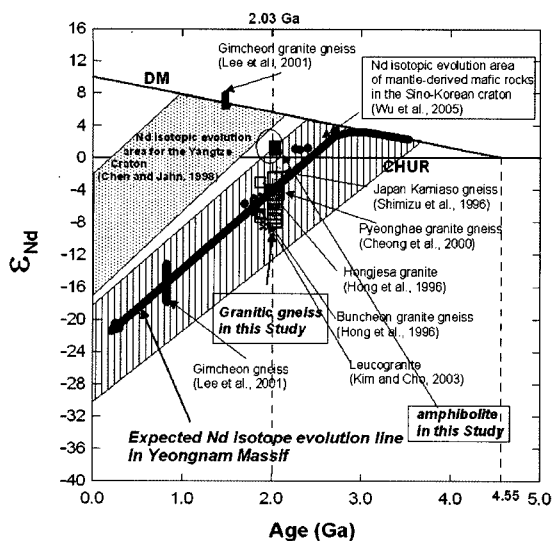


Fig. 7. Nd isotope evolution diagram for the granitoids and orthogneisses including the granitoids, orthogneiss and amphibolites of North China Craton (Yellow area, Wu *et al.*, 2005) and for the constituent rocks of Yangtze Craton (Green area, Chen and Jahn, 1998). The depleted-mantle line is drawn with  $\epsilon_{Nd}(0) = +10$  and  $\epsilon_{Nd}(4.55\text{Ga}) = 0$ . CHUR = chondritic uniform reservoir (After Lee *et al.*, 2005). Note that the granitic gneisses in this study are plotted in the expected Nd isotope evolution line in Yeongnam Massif.

plate granites)와 VAG(volcanic arc granites)의 영역에 속한다. 그러므로 심도별 시추코아의 암상특성(변성암 기성으로의 점이적인 변화), 상기의 지구화학적 특징과 앰피블라이트의 Nd 초기치가 지구초기물질(CHUR)의 값에 유사한 점을 고려해 볼 때, 연구지역내 정편마암류들의 기원물질은 고기의 초기지각물질과 DM (depleted mantle) 물질의 혼합에 의한 것으로 볼 수 있다. 그러나 현재의 자료만 가지고 연구지역내 변성암류의 기원물질 및 중국대륙 기반암과의 연관성을 명확히 밝히기는 다소 무리가 있다. 그럼에도 불구하고 최근 중국의 북중국지괴(North China Craton)에 분포하고 있는 시생대의 TTG계열 암석에 대한 연구결과 보고가 활발하게 이루어지고 있으므로(Jann and Zhang, 1984; Liu *et al.*, 2005), 본 연구지역에 대한 금번 연구결과는 중국과 한반도를 형성한 시생대 지각의 진화과정을 이해할 수 토대를 제공할 수 있을 것이다. 특히 북중국지괴 북부에 분포하는 NE China 지역은 CAOB(Central Asian Orogenic Belt)의 일부로서 CHUR의 Nd 동위원소 초기치 진화선에 매우 가까운 값(0)을 갖는 중생대의 화강암류가 많이 분포한다(Wu *et al.*, 2000,

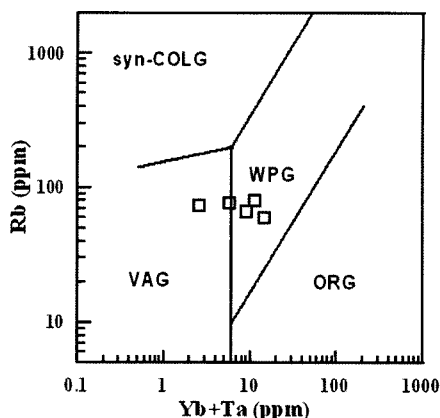


Fig. 8. Tectonic discrimination diagram based on (a) Rb vs. Yb + Ta diagrams of Pearce *et al.* (1984) based on chemical composition of granitic gneiss core. Fields: syn-COLG = syn-collisional granites, WPG = within-plate granites, ORG = ocean ridge granites, VAG = volcanic arc granites.

2002). 반면에 북중국육괴의 중생대 암석에서는 CHUR에 가까운 값을 갖는 중생대의 암석이 매우 빈약하다. 그러나 25억년 전후의 Sm-Nd 연대와 더불어  $\epsilon_{Nd}(T)$ 의 값이 거의 0인 즉 CHUR의 값에 거의 가까운 암석들이 많이 분포한다(Fig. 7 및 Wu *et al.*, 2005의 Table 1 참조). 이와 같은 특징도 한반도 선캄브리아기 기저암 특히 영남육괴의 기원물질이 북중국지괴와 연관 깊음을 시사해주는 것이다.

Sr은 변질작용이나 변성작용동안 Rb에 비해 이동성이 약한 것으로 알려져 있다. 반면에 K, Rb 등과 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. Fig. 9는 K/Rb, Rb/Sr, Ba/MgO, Ba/Sr에 대한 상관도이다. 뚜렷하지는 않지만 대체적으로 K-Rb Rb-Sr, Ba-MgO간의 선형관계가 관찰된다. 이와 같은 K-Rb Rb-Sr, Ba-MgO간의 선형관계는 시추공내 변성암류의 초기기원물질 특징일 가능성이 높다.

연구지역내 시추코아의 심도별 희토류원소 분포도(Fig. 4)를 살펴보면 심도별 뿐만 아니라 동일 암상에서도 서로 크게 다르며, 모두 4개의 그룹으로 구분된다. 최근에 Lee S. G. *et al.*(2003, 2004)은 흑운모편마암지역에서 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

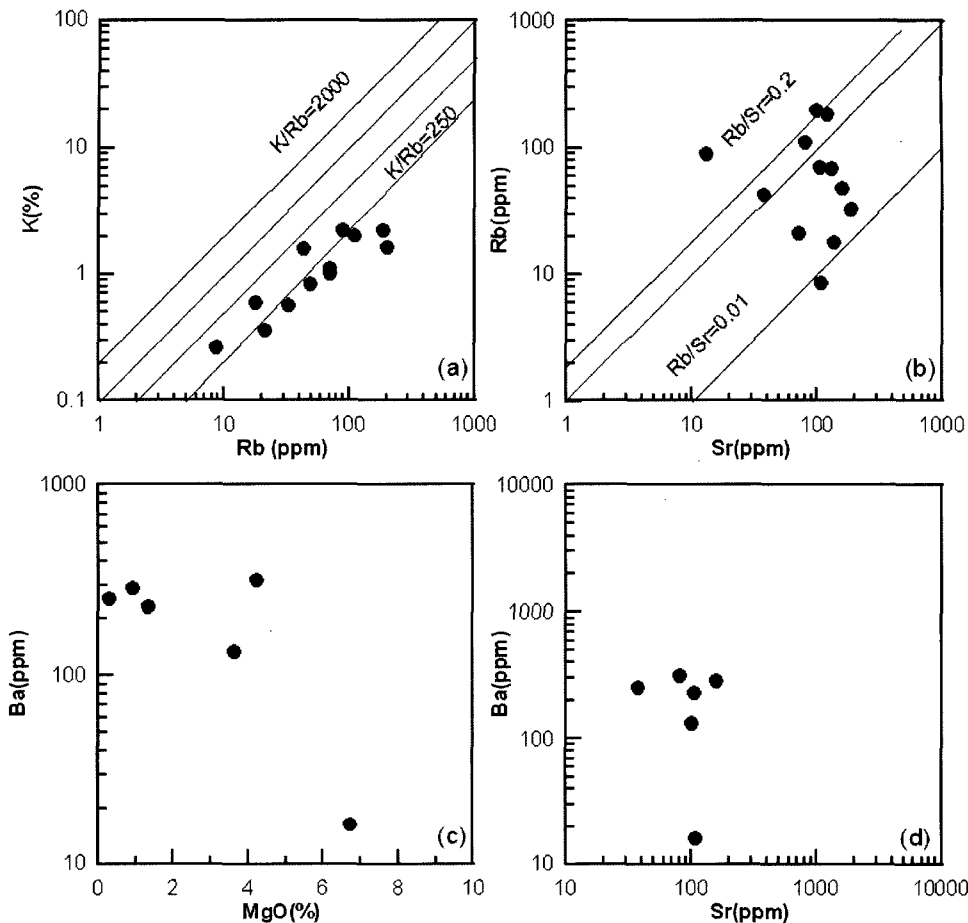


Fig. 9. (a) K-Rb, (b) Rb-Sr, (c) Ba-MgO, (d) Ba-Sr correlation diagram from granitic gneiss and amphibolite cores at Samyuri area, Muju.

시료 3321과 같은 풍화시료에서의 희토류원소 테트라드 효과를 보고함으로써, 물-암석 반응 혹은 화강암 분화작용의 최후기 산물로 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 시사해준다고 볼 수 있다. 그러므로 시추공내 화강암질 편마암 및 암피블라이트에서의 희토류원소 분포도는 희토류원소의 분포도는 초기기원물질의 특성을 그대로 보유하고 있는 것으로 볼 수 있다. 특히 Fig. 4d와 같은 거의 편평한 희토류원소 분포도와 Table 3의 CHUR(chondritic uniform reservoir)의 값에 거의 가까운 Nd 초기치는 연구지역내 암피블라이트 코아의 지구화학적 특성이 지구초기물질과 매우 유사함을 시사해주는 데, 이는 암

피블라이트의 기원물질이 DM과 지각형성초기물질이 분리되기 이전 즉 초기 마그마(juvenile magma)의 지구화학적 특성과 매우 유사함을 시사해 주는 것이다.

### 결론

전라북도 무주지역 삼유리에 분포하는 화강암질 편마암지역에서 심도 200 m에 서로간에 10 m의 간격을 두고 3개공에 대해 시추가 이루어졌으며, 이중 2개공에서는 암석 코아를 채취하였다. 시추공의 암상은 크게 화강암질 편마암 및 암피블라이트로 구성되어 있으며, 화강암질 편마암의 경우 구성광물에 따라 암상(주로 암석의 색깔)이 점이적으로 변화한다. 그리고 심도 별로 암상을 고려하여 12개의 시료를 취한 후, 이에 대해 주성분, 미량성분, 희토류원소 및 Sm-Nd 동위원소 계와 Rb-Sr 동위원소계에 대해 화학분석을 실시하였다.

Sm-Nd 동위원소계에 의하면 연구지역내 정편마암류의 생성시기는  $2,026 \pm 230(2\sigma)\text{Ma}$ 이고, Nd 초기치는  $0.50979 \pm 0.00028$ 이다.  $\epsilon_{\text{Nd}}(2.03\text{Ga})$ 는  $-4.4$ 로서 이 값은 북중국 지괴 시생대 기반암의 진화영역에 속하며, 특히 영남 육괴내 Nd 동위원소 초기치의 진화와 일치하는 상관성을 갖는다. 주성분 및 미량성분의 화학조성 자료를 토대로 한 연구지역내 화강암질 편마암 및 변성 염기성암류의 기원물질은 각각 TTG(Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite) 및 슬레이트이트-알칼리계열 암석에 속함을 알 수 있었다. 그리고 화강암질 편마암에서의 Rb과 Yb+Ta의 상관관계에 의하면, 연구지역내 화강암질 편마암은 WPG(within-plate granites)와 VAG(volcanic arc granites)의 영역에 속한다. 특히 앰피블라이트의 희토류원소 분포도와 Nd 초기치는 앰피블라이트의 기원물질이 결정편들과 지각을 형성한 초기 마그마(juvenile magma)의 지구화학적 특성과 매우 유사함을 지시해준다.

## 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 2005년도 기관고유사업의 지원을 받아 수행되었다. 아울러 본 논문의 세세한 부분까지 정성스럽게 고쳐주신 부경대학교 박계현 교수님께 깊은 감사를 드린다.

## 참고문헌

이광식, 정창식, 박계현, 장호완, 1997, 무주지역 각섬암의 지구화학 및 Sm-Nd 동위원소 연구. *자연환경지질*, 30, 313-320.

이대성, 남기상, 1969, 지질도폭설명서(1:50,000 장거리). 국립 지질광물연구소, 33p.

김건한, 음철현, 2004, 유도결합 플라즈마 질량분광법에(ICP-MS)에 의한 암석표준물질 중의 Lanthanids, Y, Th, U 분석. *한국지질자원연구원 논문집*, 8, 43-53.

박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기 화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. *지질학회지*, 29, 387-395.

Bau, M., 1996, Controls on the fractionation of isoivalent 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.

Cheong, C-S., Kwon, S.-T. and Park, K-H., 2000, Pb and Nd isotopic constraints on Paleoproterozoic crustal evolution of the northeastern Yeongnam massif, South Korea. *Precam. Res.*, 102, 207-220.

Chen, J. F. and Jahn, B. M., 1998, Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284, 101-133.

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, 187p.

Heier, K. S., 1973, Geochemistry of granulite facies rocks and problems of their origin. *Philos. Trans. R. Soc. Lon.*, A273, 429-442.

Hong, Y. K., Lee, S. G. and Lan, C. Y., 1996, Comparison between the Hongjesa granite and the Buncheon granite gneiss based on Sm-Nd age. Abstract of Annual Meeting of the Geological Society of Korea, 100.

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., Zhou, X. H. and Li, J. L., 1990, Formation and tectonic evolution of southern China and Taiwan: isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183, 145-160.

Jahn, B.-m., Wu, F., Capdevila, R., Martineau, F., Zhao, Z. and 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.

Keto, L. S. and Jacobsen, S. B., 1987, Nd and Sr isotopic variations of early Paleozoic oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 84, 27-41.

Kim, J. and Cho, M., 2003, Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea: implication for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precam. Res.*, 122, 235-251.

Lee, S. G., Masuda, A. and Kim, H. S., 1994, An early Proterozoic leuco-granitic gneiss with the REE tetrad phenomenon. *Chem. Geol.*, 114, 59-67.

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 gneiss. *Geochem. J.*, 35, 175-187.
- Lee, S. G., Lee, D. H., Kim, Y., Chae, B. G., Kim, W. Y. and Woo, N. C., 2003, Rare earth elements as an indicator of groundwater environment changes in a fractured rock system: Evidence from fracture-filling calcite. *Appl. Geochem.*, 18, 135-143.
- Lee, S. G., Kim, Y., Chae, B. G., Koh, D. C. and 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. G., Shin, S. C., Jin, M. S., Ogasawara, M. and Yang, M. K., 2005, Two Paleoproterozoic strongly peraluminous granitic plutons (Nonggeori and Naedeokri granites) at the northeastern part of Yeongnam Massif, Korea: Geochemical and isotopic constraints in East Asian crustal formation history. *Precam. Res.*, 139, 101-120.
- 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. *Precam. Res.*, 121, 25-34.
- Liu, S., Pan, Y., Xie, Q., Zhang, J., Li, Q. and Yang, B., 2005, Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanging granitic gneisses in the Fuping Complex: implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton. *J. Asia. Earth Sci.*, 24, 643-658.
- Ludwig, K. R., 1999, Isoplot/Ex(v.2.06)-A geochronological tool kit for Microsoft Excel, Berkley Geochronology Center, Special Publications No. 1a, 49p.
- Masuda, A., 1975, Abundances of mono isotopic REE, consistent with the Leedeey chondritic values. *Geochem. J.*, 9, 183-184.
- Masuda, A., Nakamura, N. and Tanaka, T., 1973, Fine structure of mutually normalized rare earth patterns of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 239-248.
- Masuda, A., Kawakami, O., Dohmoto, Y. and Takenaka, T., 1987, Lanthanide tetrad effects in nature: two mutually opposite types, W and M. *Geochem. J.*, 21, 119-124.
- O'Connor, J. T., 1965, A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratio. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, 525B, 79-84.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic Rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Shimizu, H., Lee, S. G., Masuda, A. and Adachi, M., 1996, Geochemistry of Nd, and Ce isotopes and REE abundances in Precambrian orthogneiss clasts from the Kamiasso conglomerate, central Japan. *Geochem. J.*, 30, 57-69.
- Wu, F.-Y., Jahn, B.-m., Wilde, S. and Sun, D., 2000, Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sm-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328, 89-113.
- Wu, F.-Y., Sun, D., Li, H., Jahn, B.-m. and Wilde, S., 2002, A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chem. Geol.*, 187, 143-173.
- Wu, F.-Y., Zhao, G., Wilde, S. A. and Sun, D., 2005, Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *J. Asia. Earth Sci.*, 24, 523-545.

---

(2005년 8월 1일 접수; 2005년 8월 30일 채택)