

## Ce 및 Nd 동위원소비에 의한 지질 시료의 해석법

이승구 · 増田彰正<sup>1</sup> · 清水洋<sup>2</sup> · 趙振華<sup>3</sup>

한국자원연구소 환경지질연구부, <sup>1</sup>일본 전기통신대학 이학부 화학과  
<sup>2</sup>일본 쿠마모토대학 이학부 지질학과, <sup>3</sup>중국 과학원 지구화학연구소

**요 약** : La-Ce법은 최근에 새로 개발된 연대측정법이다. 특히 La 및 Ce은 희토류원소군의 일원으로서 Sm-Nd법과 대비하여 해석할 경우, 지각물질 및 맨틀물질의 진화과정을 해석하는 데 있어서 아주 유용하게 쓰일 수가 있다. 본 논문에서는 La-Ce법의 기본개념에 대한 소개와 더불어 이를 토대로 하여 강원도 임원지역의 우백질 화강편마암과 중국 요령성 안산지역에 분포하는 칼륨부화 화강암에 대하여 그 기원물질의 경희토류 분포양상을 유추하였다. 칼륨부화 화강암의 Sm-Nd연대는  $3.16 \pm 0.06$  Ga ( $2\sigma$ )이며  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  초기치는  $0.50846 \pm 0.00005$  ( $\epsilon_{\text{Nd}} = -1.5$ )이다. 이 초기치는 칼륨부화 화강암이 지각 내에서의 화성활동에 형성되어졌음을 의미한다. Nd 및 Ce동위원소비의 결과에 의하면, 우백질 화강편마암과 칼륨부화 화강암은 CHUR과 거의 유사한 물질로부터 분화되었음을 알 수가 있다. 그리고 중국 동북부 요령성지역의 지각형성 시기는 3.5 Ga보다 더 오래된 것으로 사료된다.

**핵심어** : 희토류원소, La-Ce계, Sm-Nd계, CHUR(chondritic uniform reservoir),  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  초기치, 기원물질

### 서 언

Ce 및 Nd은 희토류원소에 속하는 원자번호 58번과 60번의 원소들이다. 희토류원소는 Masuda (1957) 및 Coryell *et al.* (1963)이 콘드라이트에 의한 지질시료의 규격화로 해석법을 고안해낸 이후로, 현재 거의 모든 지질시료의 지구화학적 해석에 사용되고 있다. 특히 Nd 동위원소비의 값은 그 자체 혹은 Sr 동위원소비와 연관되어 지구로부터 생성된 모든 암석들의 진화과정 및 기원암을 추정하는 데 이용되고 있다 (Allégre and Ben Othman, 1980; DePaolo, 1981; DePaolo, 1988; Jacobson *et al.*, 1984; McCulloch and Wasserburg, 1978). 그리고  $^{138}\text{La}$ - $^{138}\text{Ce}$  지질시계가 Tanaka and Masuda (1982)에 의해 남아프리카의 Bushveld 반력암에 처음 적용된 이후로 여러 연구자들이 La-Ce법을 연구적용하여 왔다 (Dickin, 1987a, 1987b; Tanaka *et al.*, 1987; Shimizu *et al.*, 1988; Shimizu *et al.*, 1990). 특히 Shimizu *et al.* (1990)은 위의 Ce 및 Nd 동위원소비를 이용하여 대상암석에 대한 기원암의 LREE(경희토류)의 패턴에 대한 계산 과정을 설명하였다.

이 논문에서는 Shimizu *et al.* (1990)의 계산법을 토대로, 임원지역의 우백질 화강편마암 (Lee *et al.*, 1994)의 기원암의 경희토류 진화패턴에 대해 검토하였다. 또한 중국 요령성의 안산지역에 분포하는 칼륨부화 화강암에 대하여 그의 Sm-Nd 지질연대를 구하였으며, 이를 Ce-Nd 동위원소비 값에 의한 기원암의 경희토류 진화패턴을 고찰하는 데 적용해보고자 한다.

### La-Ce, Sm-Nd 동위원소에 의한 희토류원소 패턴의 계산법

La은 자연계에서 질량수가 138(0.089%)인 것과 139(99.911%)인 것의 두 개의 동위원소를 갖고 있다.  $^{138}\text{La}$ 은 붕괴에 의해  $^{138}\text{Ce}$ 으로, 전자포획 (electron capture, EC)에 의해  $^{138}\text{Ba}$ 으로 바뀌는 두 가지의 붕괴방법을 갖는다. 이때의 붕괴상수값은  $\lambda_p$  ( $^{138}\text{La}$ ) =  $2.77 \times 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$  및  $\lambda_{\text{EC}}$  ( $^{138}\text{La}$ ) =  $4.11 \times 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{total}}$  ( $^{138}\text{La}$ ) =  $6.88 \times 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$ 가 된다. Ce은 자연계에서 다음과 같이 4개의 안정동위원소를 갖는다.  $^{138}\text{Ce}$ (0.19%),  $^{140}\text{Ce}$ (0.25%),  $^{142}\text{Ce}$ (88.48%),  $^{144}\text{Ce}$ (11.08%) (Geyh and Schleicher, 1990).

Ce 및 Nd 동위원소로부터 기원물질에 대한 경회토류의 패턴을 구하는 방법은 다음과 같은 3단계의 계산과정을 거친다(Shimizu *et al.*, 1990). (1) 연구대상암석의 생성당시의  $^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$  및  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 초기치의 계산, (2) 기원물질의  $^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce}$ 와  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 계산 (3)기원물질에 대하여 콘드라이트로 규격화한  $(\text{La}/\text{Ce})_N$  과  $(\text{Nd}/\text{Sm})_N$  의 계산이다.

$^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$  및  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 초기치는 다음과 같은 계산식으로부터 구할 수 있다.

$$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_0 = (^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}) - \lambda_{\beta} / \lambda_{\text{total}} (^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce}) [\exp(\lambda_{\text{total}} \cdot t) - 1] \quad (1)$$

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0 = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}) [\exp(\lambda_{\alpha} \cdot t) - 1] \quad (2)$$

다음으로 필요한 과정은 위의 식(1)과 식(2)로부터 구한 초기치에 대응되는  $(^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce})_{\text{source}}$ ,  $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{source}}$ 의 값을 구하는 것이다. Shimizu *et al.* (1988)은 두가지의 다른 경우에 있어서의 기원물질에 대해 이들 값을 계산하였다(Fig. 1). Fig. 1의 모델 I은 "회토류원소의 분화가 지구형성직후에 발생되었으며, 그에 따른 분화효과가 고찰중인 암석과 관련된 마그마가 형성될 때까지 유지되었다"라는 가정하에서의 진화곡선이다. Fig. 1의 모델 II는 "4.56 Ga에서 4.4 Ga(임의로 가정한 연대임)까지의 가장 초창기 기간동안 상대적으로 회토류의 함량은 콘드라이트와 같았으며, 회토류원소의 분화는 4.4 Ga에 일어났고 4.4 Ga에서 마그마형성시 까지 유지되었다"라는 가정하에서의 진화곡선이다. Fig. 1에서의 시간좌표 T1은 대상암석이 형성된 연대이며, T2(4.4 Ga)는 회토류원소의 분화작용이 CHUR(chondritic uniform reservoir)로부터 시작된 연대라고 정의를 내리기로 하자.

앞의 식 1, 2에서의 시간 t를 Fig. 1에서의 대상암석의 생성연대인 T1으로 바꾸고 초기연대 0를 T2로 바꾸면,  $^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$ ,  $^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 사이에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{source},T1} = (^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR},T2} + \lambda_{\beta} / \lambda_{\text{total}} (^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce})_{\text{source},T1} [\exp\{\lambda_{\text{total}} \cdot (T2 - T1)\} - 1] \quad (3)$$

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{source},T1} = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR},T2} + (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{source},T1} [\exp\{\lambda_{\alpha} \cdot (T2 - T1)\} - 1] \quad (4)$$

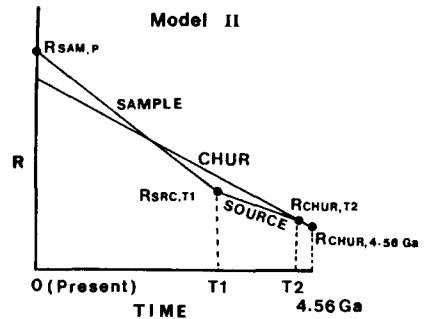
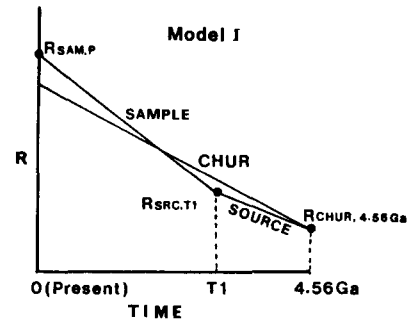


Fig. 1. Ce and Nd isotopic evolution diagram. "R" represents  $^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$  or  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . T1 is a formation age of rocks under consideration and T2 is a differentiation age from CHUR(chondritic uniform reservoir). Model I is single-episode model, and Model II is double episode model.

위의 식3과 4로부터 chondrite로 규격화시킨  $(\text{La}/\text{Ce})_{N(\text{source},T1)}$ 과  $(\text{Nd}/\text{Sm})_{N(\text{source},T1)}$ 의 값을 다음과 같은 식으로부터 구할 수가 있다.

$$(\text{La}/\text{Ce})_{N(\text{source},T1)} = \frac{(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{source},T1} - (^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR},T2}}{(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR},T1} - (^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR},T2}} \quad (5)$$

$$(\text{Nd}/\text{Sm})_{N(\text{source},T1)} = \frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{source},T1} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR},T2}}{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{source},T1} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR},T2}} \quad (6)$$

위의 식들은 Ce 과 Nd의 동위원소자료에 의해 기원암의  $(\text{La}/\text{Ce})_N$  과  $(\text{Nd}/\text{Sm})_N$  의 값을 구할 수 있음을 보여준다. 그리고 상기 식들에 필요한 기본상수값들은 다음과 같다.

$$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR},P} = 0.0225722, (^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR},P} = 0.003089$$

(Shimizu *et al.*, 1984; Shimizu *et al.*, 1988)

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR,P}} = 0.512638, (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR,P}} = 0.1966$$

(Wasserburg *et al.*, 1981)

여기서 P는 현재를 나타낸다.

**자연계 시료에 대한 적용 및 결론**

이 논문에서는 앞서도 언급한 바와 같이 강원도 임원지역의 우백질 화강암과 중국 요령성의 칼륨 부화 화강암(K-rich granite)에 대해 Ce 및 Nd의 동위원소비를 적용하여 그 기원암의 희토류원소 패턴을 유추해보기로 한다. 희토류원소 및 각 동위원소의 분석은 일본 동경대학에서 이루어졌다. 희토류원소는 동위원소희석법으로 JEOL JMS-05RB 질량분석기로 분석하였으며, Nd 및 Ce 동위원소비는 각각 다중 채널분석기인 VG-354 질량분석기 및 이중초점 질량분석기인 VG54-38내에서 Re 삼중필라멘트를 이용하여 Nd<sup>+</sup>, CeO<sup>+</sup>로써 측정되어졌다. Ce에 대한 자세한 실험방법은 Makishima and Nakamura(1991)과 Masuda *et al.*(1988)을 참조하기 바란다. 측정된 Nd 및 Ce 동위원소비는 각각 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219, <sup>136</sup>Ce/<sup>142</sup>Ce=0.01688로 규격화시켰으며, Nd 동위원소 표준시료인 La Jolla Nd의 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd비는 0.511826±0.000003(2σ)이며, Johnson Matthey CeO<sub>2</sub>(JMC304)의 <sup>138</sup>Ce/<sup>142</sup>Ce는 0.0225799±0.0000018(2σ)이다. 지질년대는 York의 회귀분석법(York, 1969)을 이용하여 계산하였으며, 희토류원소의 분석오차는 1%이하이다.

**우백질 화강편마암**

Lee *et al.*(1994)은 강원도 임원지역의 우백질 화강편마암 및 그 구성광물로부터 2.25 Ga(initial <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.50942, ε<sub>Nd</sub>=-5.7)의 Sm-Nd년대를 보고한 바 있다. 이 화강편마암은 테트라드 현상(Peppard *et al.*, 1969; Masuda *et al.*, 1987; McLennan, 1994)이라는 희토류원소의 특이현상을 보여주는 암석으로서, Lee *et al.*(1994)은 2.25 Ga전에 지각내에서 이 우백질 편마암의 기원물질 형성되어질 때, 물 혹은 유체상의 유동 환경하에서 이와같은 희토류원소의 테트라드 현상이

일어났다고 해석했다. 임원 우백질 화강편마암의 희토류원소의 패턴은 Fig. 2와 같다. 이 암석의 기원암의 생성년대는 2.25 Ga이고, ε<sub>Nd</sub>=-5.7는 지각기원의 물질로부터 진화되었음을 시사하므로, 이를 토대로 기원물질의 희토류원소의 진화과정에 대해 검토하고자 한다. 우선 고찰하고자하는 우백질화강편마암의 La, Ce 함량 및 Ce 동위원소비는 다음과 같다.

La(ppm)	Ce(ppm)	<sup>138</sup> La/ <sup>142</sup> Ce	<sup>138</sup> Ce/ <sup>142</sup> Ce
2.46	5.34	0.00376	0.0225763
			±0.0000011

상기의 <sup>138</sup>Ce/<sup>142</sup>Ce값을 토대로 우백질 화강편마암의 기원암의 경희토류 분포양상을 추정하도록 하자. 우백질 화강편마암의 경우 기원암의 형성년대가 2.25 Ga이고, 희토류원소의 분화는 지구의 형성이후 CHUR(chondritic uniform reservoir)로부터 거의 동시(4.56 Ga)에 일어났다고 가정하면,

$$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{source, 2.25 Ga}} = 0.022553$$

$$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR, 4.56 Ga}} = 0.022534$$

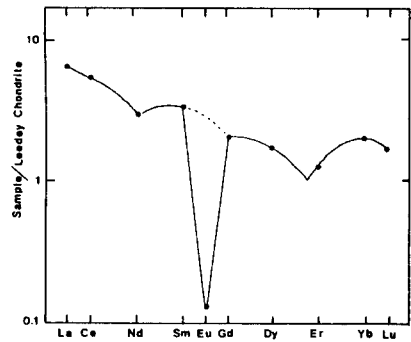


Fig. 2. Chondrite-normalized REE pattern of leuco-granitic gneiss, (Lee *et al.*, 1994)

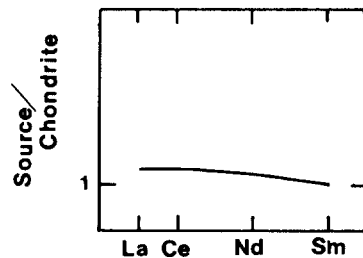


Fig. 3. REE pattern estimated for the source of leuco-granitic gneiss. In the estimated pattern, a normalized value of Sm is set at 1.0 for convenience.

$$(^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce})_{\text{CHUR}, 2.25\text{ Ga}}=0.022553$$

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{source}, 2.25\text{ Ga}}=0.509421$$

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}, 4.56\text{ Ga}}=0.506687$$

$$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}, 2.25\text{ Ga}}=0.509724\text{가 되며}$$

$(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N(source, TI)}}=1$ ,  $(\text{Nd}/\text{Sm})_{\text{N(source, TI)}}=1.1$ 이 된다. 이와같이 구한 값들로 부터 기원암의 경희토류의 분포양상을 보면 Fig. 3과 같이 된다. Fig. 3에서 Ce과 Nd 사이의 원소인 Pr의 값은 두 원소의 중간값을 유추하여 도식하였다. 이로부터 우백질 화강편마암은 CHUR과 거의 유사한 물질로부터 분화되었음을 알 수가 있다.

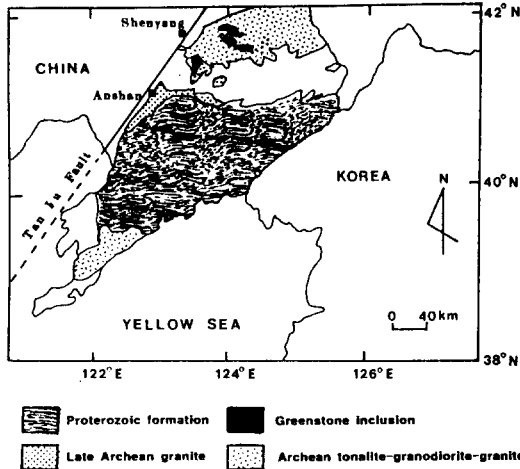


Fig. 4. Simplified geological map of eastern Liaoning Province and adjacent area(modified from Yang *et al.*, 1988)

### 안산 칼륨부화 화강암(K-rich granite)

중국 요령성 안산지역의 칼륨부화 화강암은 부분적으로 백립암상의 변성상을 가지면서 전반적으로는 각섬암상인 시생대 변성암체들 사이에서 산출된다(Fig. 4). 이 시생대 암체들은 중한지괴의 북동부 기반암체로서, Chen *et al.*(1981)은 이 지역의 화강편마암에 대해 3.3 Ga의 U-Pb년대를 보고한 바 있다. 또한 Zhong(1984)은 이 지역의 칼륨부화 화강암과 나트륨부화 화강편마암에 대해 2.8 Ga의 Rb-Sr년대를 보고 하였으며, 이 암체들은 지각물질의 재용음으로부터 생성되어졌다고 해석하였다. 이 지역에서의 초기의 지각형성은 약 3.0 Ga~3.3 Ga에 형성되어진 것으로 간주되고 있다(Zhong, 1984; Zhai *et al.*, 1990). 그리고 Huang *et al.*(1986)과 Jahn *et al.*(1987)은 중국 하북성 동부에 위치한 Caozhuang지역과 Huangbaiyu지역 주변(안산의 남서쪽)에서 산출되는 각섬암(amphibolite)에 대해 약 3.5 Ga의 Sm-Nd년대를 보고 하였다. 이 각섬암들은 시생대의 칼륨부화 화강암질 마그마에 포획된 잔류물로서, Huang *et al.*(1986)과 Jahn *et al.*(1987)은 이 35억년의 연대를 각섬암의 기원물질로 사료되는 현무암의 분출년대로 해석하였으며, 원시 염기성 지각의 형성년대로 간주하였다.

Table 1, 2는 중국 요령성 칼륨부화 화강암의 Nd, Sm, La, Ce 및 Nd, Ce 동위원소의 값들이 기술되어 있으며, Fig. 5는 이에 의한 칼륨부화 화강암의 Sm-

Table 1. Abundances of Sm, Nd and Nd isotopic data for K-rich granite in Liaoning Provinces, China

sample	Nd(ppm)	Sm(ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}^*$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(3.16\text{ Ga})$	$T_{\text{DM}}^{\text{Nd}}$
LA-3	11.93	5.33	0.2701	$0.514120 \pm 0.00007$	+28.9	-0.7	3.24
LA-5	114.17	20.89	0.1105	$0.510716 \pm 0.00008$	-37.6	-2.8	3.15
LA-7	42.17	7.22	0.1035	$0.514120 \pm 0.00007$	-38.9	-1.0	3.13
No.1	77.0	14.0	0.1121	$0.514120 \pm 0.00007$	-37.4	-2.5	3.26
No.2	20.6	2.74	0.0806	$0.514120 \pm 0.00007$	-47.1	-0.3	3.07

\* Normalized to  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ ; errors are  $2\sigma$

Table 2. Abundances of La, Ce and Ce isotopic data for K-rich granite in Liaoning Provinces, China

sample	La(ppm)	Ce(ppm)	$^{138}\text{La}/^{142}\text{Ce}$	$^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}^*$	$\epsilon_{\text{Ce}}(0)$	$\epsilon_{\text{Ce}}(3.16\text{ Ga})$
LA-3	3.20	7.06	0.00370	$0.0225800 \pm 0.0000018$	$+3.5 \pm 0.8$	$+1.0 \pm 0.8$
LA-5	162.1	266.5	0.00497	$0.0225874 \pm 0.0000014$	$+6.7 \pm 0.6$	$-0.7 \pm 0.6$
No. 3	44.6	75.5	0.00483	$0.0225894 \pm 0.0000017$	$+7.6 \pm 0.7$	$+0.9 \pm 0.7$

\* Normalized to  $^{136}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}=0.1688$ ; errors are  $2\sigma$

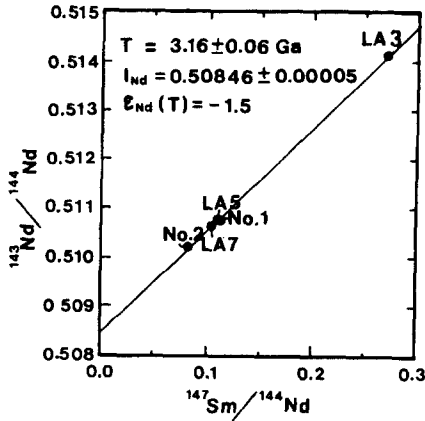


Fig. 5. Sm-Nd diagram from K-rich granite in Anshan area, Liaoning Province, NE China.

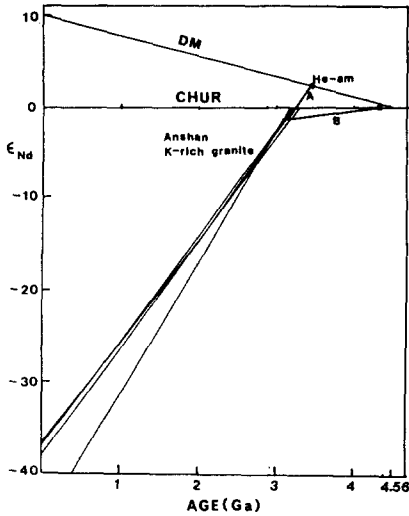


Fig. 6. Schematic diagram illustrating two contrasting models for deriving the initial  $\epsilon_{Nd}$  of the K-rich granite. For comparison, Hebei amphibolite with 3.45 Ga Sm-Nd age was plotted as He-am (Huang *et al.*, 1986). A is a evolution line from He-am, and B is a evolution line from the assumed source which was formed at 4.4 Ga.

Nd 지질년대이다. 이에 의하면 이 화강암의 Sm-Nd 연대는  $3.16 \pm 0.06$  Ga로 그의 초기치는  $0.50846 \pm 0.00005$  [ $\epsilon_{Nd}(3.16 \text{ Ga}) = -1.5$ ]이다. 이 연대는 Chen *et al.* (1981)에 의해 보고된 3.14 Ga의 U-Pb연대와 좋은 일치를 보여준다. 이 칼륨부화 화강암의  $\epsilon_{Nd}$  초기치와 시간과의 상관관계 그림은 Fig. 6과 같다. 그림으로부터 칼륨부화 화강암의 기원물질에 대해 고려해 볼 수가 있다. 우선 칼륨부화 화강암의 최초의 기

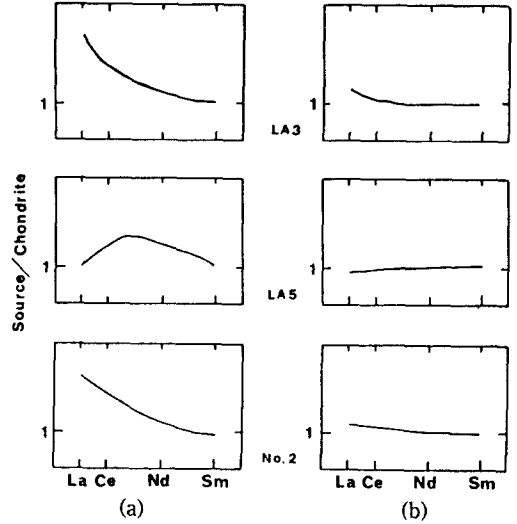


Fig. 7. REE patterns estimated for the sources of Anshan K-rich granite assuming two different cases. (a): 3.45 Ga He-am, (b): 4.4 Ga assumed source. In the estimated patterns, a normalized value of Sm is set at 1.0 for convenience.

원물질이 He-am (Fig. 6, Huang *et al.*, 1986)과 유사한 물질에서 분화되어 왔다고 가정(경회토류가 결핍된 맨틀 기원)하여  $(La/Ce)_N$  과  $(Nd/Sm)_N$  의 값을 구하면  $(La/Ce)_N$ 은 약 1.7이고  $(Nd/Sm)_N$ 은 약 1이 된다. 이 값들로부터 기원암의 경회토류의 분포양상을 도식해보면 Fig. 7a와 같다. 이는 결핍된 맨틀이 칼륨부화 화강암의 기원물질이라는 가정과 비교해 볼 때 모순이다.

다음으로 칼륨부화 화강암의 Nd 초기치로부터 볼 때, 칼륨부화 화강암은 지각 내에서의 화성활동에 의해 생성되어졌음을 알수가 있다. 그러므로 이와같이 약 3.16 Ga의 칼륨부화 화강암을 형성시킨 지각내 기원물질은 시생대 초기(4.4 Ga)에 만들어졌다고 가정해 보도록한다. 그리고 지구형성년대로 가정되는 4.56 Ga에서 4.4 Ga까지는 chondrite의 희토류원소 패턴을 유지하다가 4.4 Ga에서 3.16 Ga까지는 어떤 임의의 패턴을 유지했다고 가정했을 때의 기원물질의 희토류원소 패턴을 유추해 보도록 하겠다. Table 2과 식 5, 6으로부터  $(La/Ce)_N$  와  $(Nd/Sm)_N$ 의 값을 구하면  $(La/Ce)_{N(\text{source}, T_1)}$ 은 약 0.87~1.21이고  $(Nd/Sm)_{N(\text{source}, T_1)}$ 은 약 1이 된다(Fig. 7b). 이는 CHUR과 유사한 희토류원소의 패턴을 의미하며, 따라

서 칼륨부화 화강암의 기원물질은 CHUR과 거의 유사한 성질을 갖았던 것으로 부터 분화되어 왔음을 시사해주는 것이다.

## 결 론

Ce 동위원소비는 그 값의 변화정도가 소수 다섯째 자리부터 나타나므로 아주 신중한 분석처리가 필요하며(Makishima and Nakamura, 1991), 이로 인해 La-Ce 연대측정법은 Sm-Nd 연대측정법보다는 아직 연구중인 연대측정법이다. 그러나 La-Ce법이 보다 더 정착화된다면 지각물질의 진화과정을 해석하는데 있어서 더욱 진보가 있으리라고 기대된다.

강원도 임원의 우백질 화강암편마암과 중국 요령성 안산지역의 칼륨부화 화강암에 대해 Ce 및 Nd 동위원소비를 적용하여 기원물질의 경희토류 패턴을 유추하였다. 그 결과 우백질 화강편마암 및 칼륨부화 화강암은 CHUR과 거의 유사한 물질로부터 분화되어왔다고 사료된다.

## 사 사

논문초고를 읽고 건설적인 비평을 해준 연세대학교의 권성택교수 및 기초과학지원연구소의 박계현박사께 감사사를 드린다.

## 참고문헌

- Allégre, C. J. and Ben Othman, D., 1980, Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development: a chemical approach to orthogneiss. *Nature*, 286, 335-342.
- Chen, Y., Zhong, F. D., Liu, J. Y., Mao, C. X. and Hong, W. X., 1981, Pb isotopic age determination of some Precambrian rocks from north China (additional discussion on Precambrian geochronological scale of China). *Geochemica*, 3, 309-219.
- Coryell, C. D., Chase, J. W. and Winchester, J. W., 1963, A procedure for geochemical interpretation of terrestrial rare-earth abundance patterns. *Jour. Geophys. Res.*, 68, 559-566.
- DePaolo, D. J., 1981, Nd isotopic studies: some new perspective on earth structure and evolution. *EOS*, 62, 137-140.
- DePaolo, D. J., 1988, Neodymium isotope geochemistry-an introduction. Springer-Verlag, New York, 188p.
- Dickin, A. P., 1987a, A La-Ce dating of Lewisian granulites to constrain the  $^{138}\text{La}$   $\beta$ -decay half-life. *Nature*, 325, 337-338.
- Dickin, A. P., 1987b, Ce isotope geochemistry of ocean island basalts, *Nature*, 326, 283-284.
- Geyh, M. A. and Schleicher, H., 1990, Absolute age determination: Physical and chemical dating methods and their application. Springer-Verlag, 503p.
- Huang, X., Bi, Z. and DePaolo, D. 1986, Sm-Nd isotopic study of early Archean rocks, Kianan, Hebei Province, China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1950, 625-631.
- Jacobson, S. B., Quick, J. E. and Wasserburg, G. J., 1984, A Nd and Sr isotopic study of the Tertiary peridotite: implications for mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 68, 361-378.
- Jahn, B. M., Aurvey, B., Cornichet, J., Bai, Y. L., Shen, Q. H. and Liu, D. Y., 1987, 3.5 Ga old amphibolites from Eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry, *Precambrian Res.*, 34, 311-346.
- Lee, S. G., Masuda, A. and Kim, H. S., 1994, An early Proterozoic leuco-granitic gneiss. *Chem. Geol.*, 114, 59-67.
- Makishima, A. and Nakamura, E., 1991, Precise measurement of Cerium isotope composition in rock samples, *Chem. Geol.*, 94, 1-11.
- McLennan, A. and Nakamura, E., 1994, Rare earth element geochemistry and "tetrad" effect. *Geochim Cosmochim Acta*, 58, 2025-2033.
- Masuda, A., 1957, Simple regularity in the variation of relative abundances of rare earth elements. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.*, 5, 125-134.
- Masuda, A., Kawakami, O., Dohomoto, Y. and Takehana, T., 1987, Lanthanide tetrad effects in nature: two mutually opposite type., *W. and M. Geochemical Jour.* 21, 119-124.
- Masuda, A., Shmizu, H., Nakai, Makishima, and Lahti, S., 1988,  $^{138}\text{La}$   $\beta$ -decay constant estimated from geochronological studies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 89, 316-322.
- McCulloch, M. T. and Wasserburg, G. J., 1978, Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science*, 200, 1003-1011.
- Peppard, D. F. Mason, G. W. and Lewey, S., 1969, A tetrad effect in the liquid-liquid extraction ordering of lanthanide(III). *Jour. Inorg. Nucl. Chem.*, 31, 2271-2272.

- 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.
- Shimizu, H., Nakai, S., Tasaki, S., Masuda, A., Bridgewater, D., Nutman, A. P. and Baadsgaard, H., 1988, Geochemistry of Ce and Nd isotopes and REE abundances in the Am soq gneiss, West Greenland. *Earth Planet. Sci. Lett.* 91, 159-169.
- Shimizu, H., Tanaka, T. and Masuda, A., 1984, Meteoritic  $^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$  ratio and its evolution. *Nature*, 307, 251-252.
- Tanaka, T. and Masuda, A., 1982, The La-Ce geochronometer; a new dating method. *Nature*, 300, 515-518.
- 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.
- Wasserburg, G. J., Jacobson, S. B., DePaolo, D. J., McMulloch, M. T., Wen, T., 1981, Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, 2311-2344.
- Yang, Z. S., Li S. G., Yu, B. X., Gao, D. H. and Gao, C. G., 1988, Structural deformation and mineralization in the early Proterozoic Liaojitite suite, eastern Liaoning Province, China. *Precambrian Res.*, 39, 31-38.
- York, D., 1969, Least-squares fitting of straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 5, 320-324.
- Zhai, M., Windley, B. F. and Sills, J. D., 1990, Archean gneisses, amphibolites, and banded iron formations from the Anshan area of Liaoning Province, NE China: Their geochemistry, metamorphism and petrogenesis. *Precambrian Res.*, 46, 195-216.
- Zhong, F. D., 1984, Geochronological study of Archean granite-gneiss in Anshan area, northeast China. *Geochimica*, 3, 195-205 (in Chinese, with English abstract).

(1996년 5월 20일 접수)

(책임편집 : 박계현)

## Interpretation of Geological Samples Based on Ce and Nd Isotopic Ratio

Seung-Gu Lee, Akimasa Masuda<sup>1</sup>, Hiroshi Shimizu<sup>2</sup>, ZhenHua Zhao<sup>3</sup>

*Environmental Geology Division, KIGAM, Taejeon 305-350, Korea*

<sup>1</sup>*Department of Chemistry, University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182, Japan*

<sup>2</sup>*Department of Geology, Kumamoto University, Kumamoto 860, Japan*

<sup>3</sup>*Institute of Geochemistry, Academia Sinica, Guiyang, China*

**ABSTRACT** : La-Ce method is one of new geochronological methods developed recently. La and Ce are one of the rare earth elements, and, with Sm-Nd system, La-Ce system is very useful in understanding the evolution processes of crust and mantle. In this paper, I introduce the basic concept of the La-Ce method, and apply it in clarifying LREE pattern of source material of leuco-granitic gneisses from the Imweon area, Kangwon-do, and K-rich granite from the Anshan area in Liaoning Province, NE China. Sm-Nd data on the Anshan K-rich granites give an age of  $3.16 \pm 0.06 \text{ Ga} (2\sigma)$ , with initial  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.50846 \pm 0.00005 (\epsilon_{\text{Nd}} = -1.5)$ . On the basis of Ce and Nd isotopic ratio, leuco-granitic gneiss and K-rich granite had been fractionated from the source material which had had similar to CHUR(chondritic uniform reservoir). And the initial  $\epsilon_{\text{Nd}}$  value suggest that the crustal formation age of the Liaoning Province area, NE China was early Archean.

**Key words** : Rare earth element, La-Ce system, Sm-Nd system, CHUR(chondritic unifrom reservoir), initial  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , source material