

광물과 암석

Korean J. Mineral. Petrol. Vol. 36, No. 2, p. 125~134, 2023
<https://doi.org/10.22807/KJMP.2023.36.2.125>

영남육괴 북동부 내덕리-농거리 화강암내 구성광물의 희토류원소 분포도 및 Rb-Sr 광물연대의 지구화학적 의의

이승구^{1*} · 이승렬²

¹한국지질자원연구원 국토우주지질연구본부

²한국지질자원연구원 지질재해연구본부

Geochemical Implication of Rare Earth Element pattern and Rb-Sr mineral isochron from constituent minerals in the Naedeokri-Nonggeori granite, Yeongnam Massif, Korea

Seung-Gu Lee^{1*} and SeungRyeol Lee²

¹Geology & Space Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

²Geologic Hazards Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Korea

요약: 내덕리 화강암과 농거리 화강암은 영남육괴 동북부의 태백-상동지역에서 분포하는 고원생대 화강암이다. 이 단보에서는 내덕리 화강암과 농거리 화강암에서 추출된 광물들에 대해 희토류원소의 함량측정 및 이들 광물들로부터의 Rb-Sr 광물연대를 구함으로써 내덕리-농거리 화강암의 지구화학적 진화사를 재조명할 수 있는 틀을 마련하고자 하였다. 운석으로 규격화한 희토류원소 분포도에서는, 저어콘을 제외한 흑운모, 장석, 석영, 전기석 등 모든 주구성광물은 경희토류가 부화되어 있고, 중희토류가 결핍된 희토류원소 분포도를 보여주고 있다. 저어콘의 경우 Eu의 강한 부(-)의 이상과 더불어 경희토류와 중희토류 모두 부화된 특성을 보여주는데, 이는 열수기원임을 지시하는 증거라 할 수 있다. 그리고 Rb-Sr 광물연대에 있어서 광물분리한 시료만을 이용한 Rb-Sr 광물연대는 $1.814 \pm 142(2\sigma)$ Ma의 연대치를 지시해주었고, 기존의 자료와 함께 통합하여 계산했을 때는 $1.707 \pm 74(2\sigma)$ Ma의 연대치를 지시해주었다. 이 광물연대값은 걸보기에서는 기존의 1.72 Ga Rb-Sr 전암연대보다는 더 오래됐고, 1.87 Ga의 Sm-Nd 전암연대보다는 더 젊다. 이와 같이 광물연대와 전암연대가 다르게 나타나는 것은, 저어콘의 희토류원소 분포도가 지시해주는 바와 같이 Rb-Sr 동위원소계가 화강암의 정치 후 열수변질을 받았음을 지시해준다고 해석된다.

핵심어: 내덕리화강암, 영남육괴, Rb-Sr 광물연대, 희토류원소 분포도

Abstract: The Naedeokri and Nonggeori granites are early Proterozoic granites of the Taebaek-Sangdong area in the northeastern part of the Yeongnam Massif. In this paper, rare earth elements (REEs) concentrations of the minerals in Naedeokri and Nonggeori granites and Rb-Sr mineral isochron age are reported. Except zircon, the constituent minerals such as mica, feldspar, quartz, and tourmaline show LREE-enriched and HREE-depleted REE patterns with relatively large Eu negative anomaly. However, zircon has geochemical characteristic of LREE- and HREE-enriched REE pattern with large Eu positive anomaly. This pattern suggests that zircon should be hydrothermal zircon due to deuteric hydrothermal alteration. In addition, the Rb-Sr mineral age of Naedeokri granite indicates an age value of $1.814 \pm 142(2\sigma)$ Ma. The Rb-Sr whole rock age including pervious data of Naedeokri and Nonggeori granite indicates an age value of $1,707 \pm 74(2\sigma)$ Ma. This value is younger than the Sm-Nd isochron of 1.87 Ga, indicating that the Rb-Sr isotope system may be re-homogenized by hydrothermal alteration during the transition from a magmatic to a hydrothermal system.

Keywords: Naedeokri granite, Yeongnam massif, Rb-Sr mineral isochron, Rare earth element pattern

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

서 언

영남육괴 북동부의 태백산 광화대에서 산출되는 내덕리-농거리 화강암은 한반도내 대표적인 선캠브리아기 비변성질 화강암체 중의 하나이다(Farrar *et al.*, 1978; Lee *et al.*, 2005). 두 화강암체는 흑운모와 백운모가 공존하는 암체이며, 이들 모두전기석이 3~5% 정도 들어있다. Kim and Moon(1994)은 화학조성에 기반하여 내덕리 화강암내 전기석은 화성기원 그리고 농거리 화강암내 전기석은 변성퇴적기원으로 구분하였다. 전기석은 일반적으로 주석, 텅스텐, 구리 등의 광상을 형성한 열수계와 연관된 화강암내 광물이다(Slack, 1996; Slack and Trumbull, 2011).

고순도의 흑운모는 내덕리 화강암에 그리고 고순도의 백운모는 농거리 화강암에서 많이 관찰되었다. Lee *et al.*(2005)의 자료를 토대로 비교해 볼 때, 내덕리 화강암의 SiO₂ 함량은 70.09 wt.%에서 74.3 wt.% 정도이고, 농거리 화강암의 SiO₂ 함량은 72.2 wt.%에서 73.7 wt.% 정도로 SiO₂ 함량의 변화폭이 작다. 또한 CaO와 MnO의 함량은 각각 0.4-0.6 wt.%와 0.02 wt.% 내외로 낮은 함량을 보여준다.

Lee *et al.*(2005)의 연구결과에 의하면, 내덕리-농거리 화강암은 경희토류가 부화되어 있고 Eu의 부(-)의 이상이 비교적 현저하면서 중희토류가 결핍된 양상의 희토류원소 분포도를 보여주며, 약 18.7 억년전에 지각 물질의 재용융에 의해 만들어졌다. 이 외에, Kim and Cho(2003)은 내덕리 화강암으로부터 서쪽으로 약 1km 정도 떨어져 있는 우백질 화강암체로부터 1926±41 Ma의 Sm-Nd 전암-석류석 광물연대 및 1862±41 Ma의 Pb-Pb 전암연대를 보고하였다. 이 외에 상동지역내 화강암류의 구성광물인 백운모로부터 측정된 K-Ar 절대연령 측정결과는 1,642±23~1,805±18 Ma의 범위에 속한다(Yun and Lee, 1986).

하지만, Kim and Cho(2003)가 보고한 우백질 화강암에서의 희토류원소 분포도는 농거리-내덕리 화강암과는 전혀 다르게 중희토류가 부화되어 있다. 미량원소 조성을 토대로 내덕리-농거리 화강암과 우백질 화강암을 비교했을 때, Kim and Cho(2003)의 우백질 화강암의 기원마그마는 화산호 환경하에서 생성조건이 우세하고, Lee *et al.*(2005)의 농거리-내덕리 화강암내 미량원소의 자료는 화산호 조건과 충돌대의 환경이 복합적으로 나타난다.

현무암 혹은 화강암과 같은 화성암과 구성광물에서

의 희토류원소의 분포도와 Sr-Nd 동위원소 조성은 암석의 성인, 진화과정 그리고 기원물질의 형성시기, 생성환경 등을 이해할 수 있는 중요한 도구이다(Gill, 2010). 하지만, 내덕리-농거리 화강암과 그 주변부의 우백질 화강암으로부터의 구성광물에 대한 지구화학적 자료는 드문 편이다. 특히 태백산 주변의 고원생대 화강암류에 대한 광물연대의 경우, 대부분이 저어콘에 기반한 U-Pb SHRIMP 혹은 LA-ICP-MS 연대 이외에는 아직 보고된 바가 없다(Chang *et al.*, 2003; Kim and Cho, 2003; Lee *et al.*, 2011).

이 논문의 주목적은 내덕리-농거리 화강암에서 추출된 광물들의 희토류원소 분포도와 이들 광물들로부터의 Rb-Sr 광물연대의 지구화학적 의미를 밝혀내는데 있다. 또한 이 논문은 광물내 희토류원소 지구화학의 연구영역을 확장해 나가기위한 초석을 준비하는데 있다.

시료 및 실험방법

암석 및 광물에서의 희토류원소 분포도 및 광물연대를 측정할 시료는 내덕리 화강암체와 농거리 화강암체에서 각각 하나씩 변성퇴적암류와의 남서쪽 경계부근에서 채취하였다(Fig. 1). 광물분리에 사용된 시료 ND1-2와 NG1-1은 중립질의 우백질 복운모 화강암으로, 주 구성광물은 석영(30-35%), 장석(K-장석, 사장석으로 구성되며, 54-59%), 흑운모(8-10%), 전기석(3-5%)의 비율로 구성되어 있고, 미량광물 혹은 부구성광물로서 백운모와 저어콘, 불투명광물 등이 관찰된다. 이들 구성광물의 분리는 모두 실체 현미경하에서 이루어졌으며, 농거리 화강암의 경우 순수한 장석의 분리가 어려워 희토류원소 분리 실험에서는 제외시켰다. 또한 농거리 화강암에서는 저어콘의 양이 너무 적은 연유로 화학실험을 할 수가 없어서 희토류원소 측정실험에서는 제외시켰다.

동위원소 분석 및 원소별 농도 측정을 위해서는 전암과 분리된 광물을 가루로 분쇄한 후 모두 초고순도의 불산과 질산 원액을 2:1의 비율로 하여, Saville사 테플론 바이알을 이용하여 산분해 시켰다. 특히 저어콘의 경우, 일본 삼에과학(Sannai-Kagaku)에서 생산된 압력용기를 이용하여 산분해시켰다(Lee *et al.*, 2014). 산분해 완료 후에는 6N HCl에 의한 10 ml의 저장용액을 만들고, 이를 다시 희토류원소 분석용, 동위원소분석용, 스파이크에 의한 Rb, Sr, Sm, Nd 분석용으로 나누어서 실험을 실시하였다. 희토류원소 정량은 한국지질자원

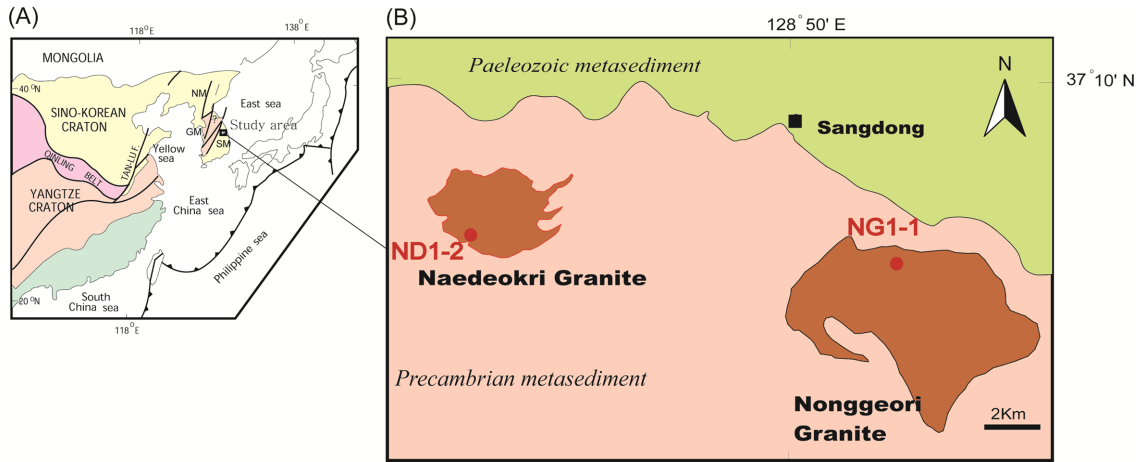


Fig. 1. Sample location map of Naedeokri-Nonggeori granites which were used in REE geochemistry and Rb-Sr isochron of the minerals (modified from Lee *et al.*, 2005).

연구원내 Perkin Elmer사 NexION3500 한유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 분석하였고, Sr 동위원소는 한국지질자원연구원내 ThermoFisher사의 TRITON 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS)와 Neptune 다검출기 유도 결합 플라즈마 질량분석기(Multi-Collector Induced Coupled Plasma Ionization Mass Spectrometer, MC-ICP-MS)를 이용하였다. 그리고 Sr, Rb의 정량은 동위원소희석법을 이용할 시에는 열이온화 질량분석기를 활용하였고, 이외에 ICP-MS를 이용하여 일반적인 습식분석으로 측정할 시에는 1차 분석을 하여 전체적인 함량을 측정 후, 정량분석의 정확도를 높이고자 표준시약을 조절하여 추가 측정을 실시하였다. 이와 같이 할 경우, Sr과 Rb의 농도측정 오차는 1% 이하로 줄일 수 있다. 희토류원소의 분석과 실험조건(표준시약 및 산화물 보정법, ICP-MS의 측정조건 등)은 Lee *et al.*(2014, 2016)에 자세하게 기재되어 있고, MC-ICP-MS를 이용한 Sr 동위원소 측정관련 실험법은 Kim and Lee(2022)에 자세하게 기재되어 있다. 희토류원소의 농도에 대한 오차도 10% 이하이다

결과 및 토의

암석 및 구성광물에서의 희토류원소 분포도 특성

내덕리-농거리 화강암과 그 주변에서 산출되는 우백질 화강암의 희토류원소 분포도는 Lee *et al.*(2005)과 Kim and Cho(2005)의 자료를 참고로 하여 재작성하였

다(Fig. 2). Fig. 2에서, 두 화강암류의 희토류원소 분포도는 현저하게 다르게 나타난다. Kim and Cho(2003)의 보고에서 우백질 화강암의 구성광물은 석영과 장석(사장석과 K-장석)이고 이외에 흑운모, 백운모, 석류석으로 기재되어 있다. 따라서 일반적인 광물로부터의 희토류원소 분포도를 고려한다면, 중희토류의 부화는 석류석 혹은 저어콘의 영향에 의한 것으로 볼 수 있을 것이다. 내덕리, 농거리 화강암의 경우는 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 중희토류가 현저하게 결핍되어 있다. 이와 같은 차이만을 비교해 볼 때, 두 화강암체(농거리-내덕리 화강암과 우백질 화강암)은 서로 간에 다른 기원 즉 분화과정을 가졌을 가능성을 지시해준다고 볼 수 있다.

내덕리-농거리 전암 및 구성광물로부터 희토류원소 측정결과는 Table 1에 기재되어 있다. 초기운석의 희토류원소 농도를 바탕으로 규격화한 희토류원소의 분포도는 마그마의 분화과정에 따른 암석의 형성과정을 이해하는 데 있어서 중요한 정보를 제공해 준다. 이는 동일기원의 물질은 기본적으로 각 원소들의 상대비교치가 각각 1인 수평선으로 도시되는 원리를 이용한 것이다. 이 연구에서는 내덕리 화강암과 농거리 화강암의 희토류원소의 분포도를 일반적인 작성법인 운석의 함량을 기준으로 하여 작성한 희토류원소 분포도(Fig. 3a와 3c)와 각 구성광물의 모암(ND1-2, NG1-1)을 기준으로 각각 희토류원소 분포도(Fig. 3b와 3d)를 작성하여 상호 비교 하였다.

Fig. 3의 자료 중, 전암(ND1-2과 NG1-1)에 대한 자

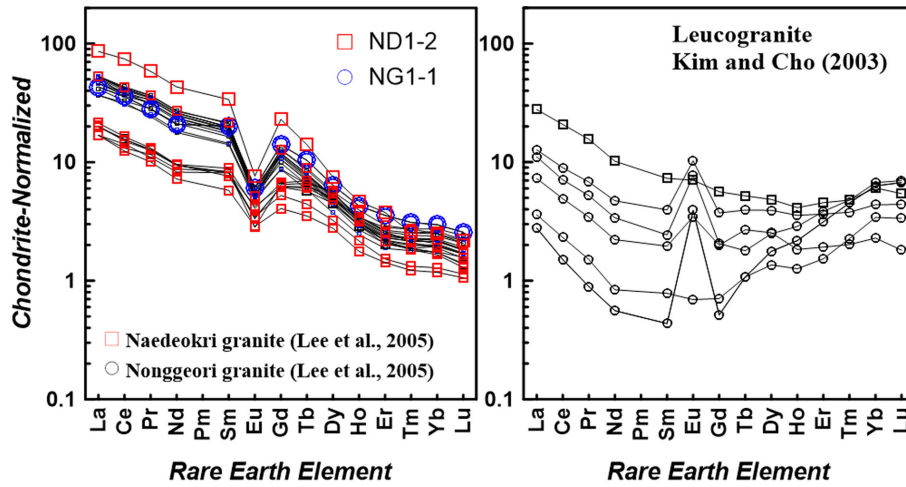


Fig. 2. Chondrite-normalized REE patterns of (a) Nonggeori and Naedeohri granites, (b) Leucogranite near to Nonggeori and Naedeokri area. The REE patterns of the Nonggeori, Naedeohri granites and Leucogranites were plot by the data from Lee *et al.* (2005) and Kim and Cho (2003), respectively.

Table 1. REE abundance (ppm) of whole rocks (ND1-2 and NG1-1) and their minerals

REE	ND1-2 (Naedeokri granite)						NG1-1(Nonggeori granite)			
	Whole rock	Biotite	Feldspar	Quartz	Zircon	Tourmaline	Whole rock	Quartz	Muscovite	Tourmine
La	21.21	67.8	10.18	5.15	103.96	42.65	10.64	6.44	10.85	8.79
Ce	46.90	149.51	21.71	11.35	253.43	93.24	22.50	13.97	24.06	18.91
Pr	5.60	18.22	2.61	1.37	30.46	11.16	2.69	1.66	2.88	2.23
Nd	20.93	67.55	9.81	5.10	121.58	40.44	10.11	6.04	10.68	8.24
Sm	5.25	16.02	2.45	1.24	38.55	9.80	3.14	1.53	2.65	2.21
Eu	0.46	0.25	0.56	0.14	2.59	0.24	0.37	0.10	0.17	0.16
Gd	4.81	12.96	2.29	1.07	51.59	8.41	2.93	1.21	2.03	1.57
Tb	0.53	1.27	0.25	0.11	7.74	0.88	0.39	0.15	0.25	0.17
Dy	1.93	3.63	0.92	0.38	47.04	2.68	1.64	0.57	0.99	0.60
Ho	0.26	0.42	0.12	0.05	10.56	0.31	0.24	0.08	0.14	0.08
Er	0.63	1.05	0.31	0.13	39.89	0.75	0.59	0.20	0.34	0.19
Tm	0.07	0.08	0.03	0.01	7.86	0.07	0.08	0.03	0.04	0.02
Yb	0.42	0.62	0.23	0.11	70.77	0.51	0.50	0.19	0.30	0.16
Lu	0.06	0.08	0.03	0.02	13.43	0.07	0.07	0.03	0.04	0.02
Eu/Eu* ¹⁾	0.27	0.05	0.71	0.36	0.18	0.08	0.36	0.22	0.22	0.26

¹⁾The magnitude of Eu anomaly is defined as the ratio Eu_N/Eu^* where Eu^* is $SQRT(Sm_N \times Gd_N)$.

료는 Fig. 2에도 도시(붉은 색과 푸른 색의 열린 도형) 되어 있다. 그리고 Fig. 3a와 3c에서의 전암과 광물의 희토류원소 분포도에서 관찰되는 중요한 특징 중의 하나는 경희토류의 경우 전암과 그 구성광물의 양상이, 저어콘을 제외하고는 대체적으로 유사한 특성을 보여 준다. 단지 내터리 화강암의 경우, Eu의 이상에 있어서는

암석 및 광물의 종류에 따라 다르며, 특히 장석의 경우 다른 광물들에 비해 Eu의 부(-)의 이상이 현저하게 작다. 하지만, Eu의 정(+)의 이상이 강하게 나타나는 장석의 일반적인 분포도와 비교했을 때, ND1-2내 장석의 희토류원소 분포도는 기원마그마의 특성을 이해하는데 있어서 중요한 정보를 제공해줄 수도 있다. 그리고 Fig.

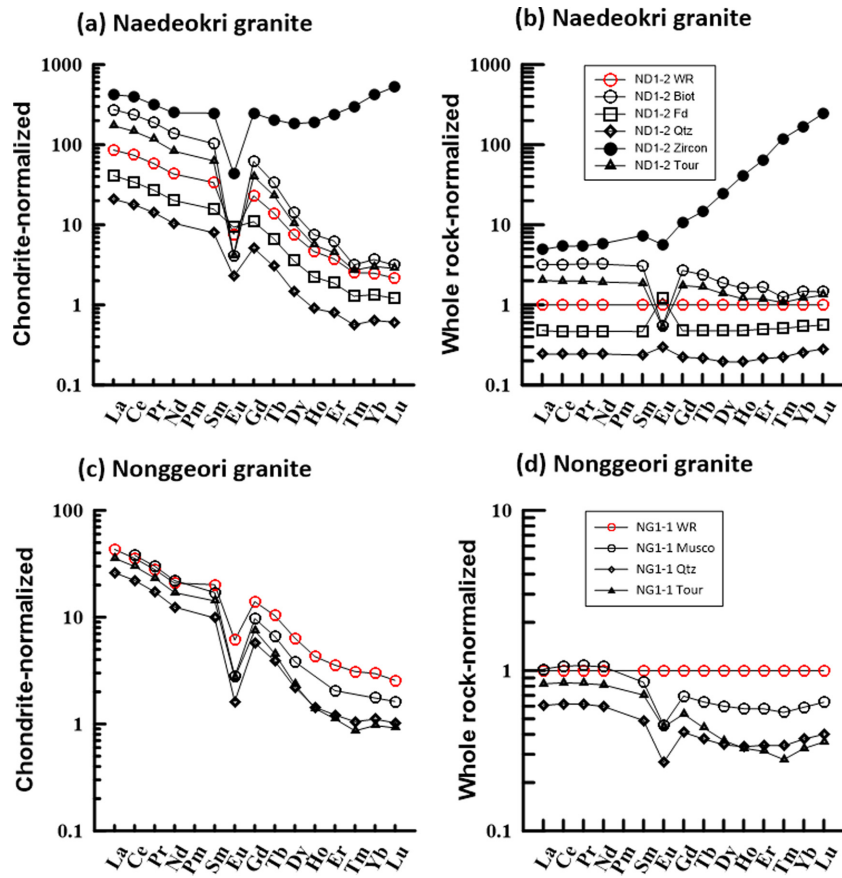


Fig. 3. (a) Chondrite (McDonough and Sun, 1995)-normalized REE patterns of ND1-2 and its constituent minerals (b) ND1-2-normalized REE patterns of the constituent minerals of ND1-2, (c) Chondrite-normalized REE patterns of NG1-1 and its constituent minerals (b) NG1-1-normalized REE patterns of the constituent minerals of NG1-1.

3b의 도면과 비교했을 때, 장석은 명확하게 Eu의 정(+)³의 이상을 보여준다. 이는 장석의 정출과정이 ND1-2 전암의 희토류원소 분포도 특히 Eu의 거동에 영향을 주었음을 알 수 있게 해준다. 이와 같은 경우, 일반적인 화강암질 마그마의 분화과정에서 장석이 먼저 정출되면서 그 결과 전암에서의 희토류원소 분포도가 영향을 받은 것으로 볼 수 있을 것이다.

또한 Fig. 3a의 내덕리 화강암(ND1-2)의 저어콘이 보여주는 희토류원소 분포도는 열수변질을 받은 저어콘의 전형적인 희토류원소 분포도 양상이다(Long *et al.*, 2012; Vlach, 2022). Fig. 3b와 Fig. 3d 같이 구성광물들의 희토류원소 함량을 전암시료의 희토류원소 함량으로 나눈 값들을 토대로 하여 도시한 도면을, Eu의 이상을 고려하지 않은 상태에서 경희토류의 경우 저어

콘을 제외한 흑운모, 장석, 석영, 전기석 모두 거의 수평선이거나 중희토류가 약간 결핍된 희토류원소 분포도 양상을 보여준다. 특히 ND1-2의 장석은 Eu를 제외하면 희토류원소 분포도 자체가 거의 수평선으로 나타나며, 석영도 강한 수평성을 지시해주고 있다. 하지만 흑운모, 백운모, 전기석은 중희토류가 조금씩 결핍된 양상을 보여준다. 저어콘의 경우는 경희토류는 약간의 결핍된 양상을 보여주지만, 중희토류는 부화되어 있다.

따라서 전암의 희토류원소 분포도에 대한 구성광물의 영향을 비교하고자, 내덕리 화강암 시료 ND1-2의 현미경하에서의 광물조성을 토대로 하여, 이들의 조성비를 변화시켜가면서 희토류원소의 광물별 함량에 적용하여 Fig. 4에서 도시하였다. 이때 암석내 저어콘의 함량을 0.07% 정도로 추정하여 계산하였다. Fig. 4a는 현미경

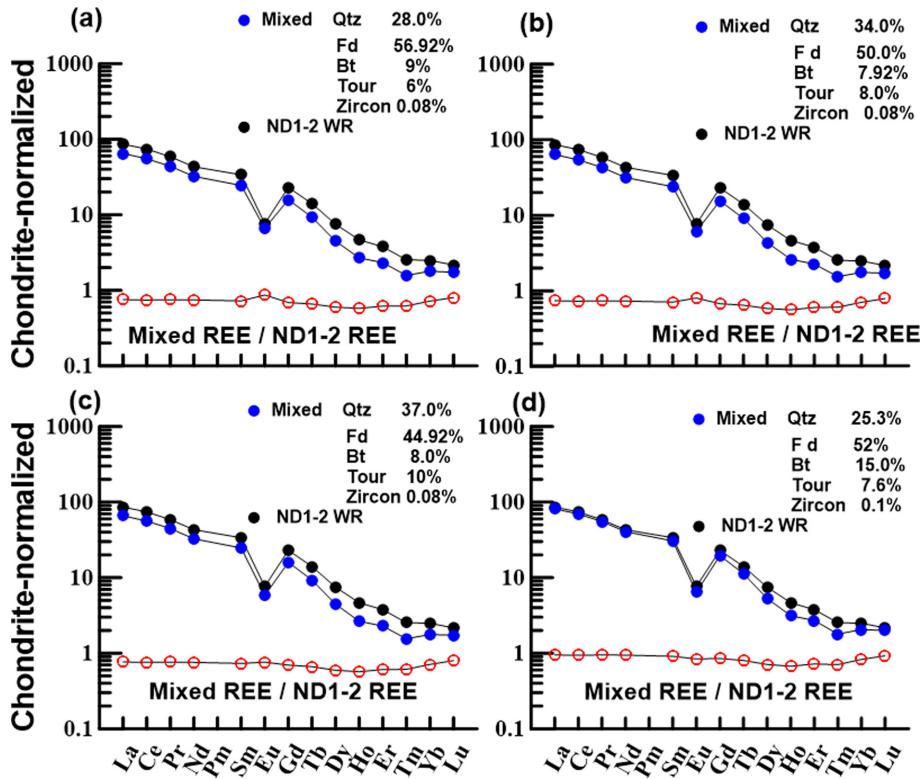


Fig. 4. Comparison of the Chondrite-normalized REE pattern of ND1-2 between based on the REE concentration determined by ICP-MS and the calculated REE concentration based on the composition of its constituent minerals. (a) was drawn by the mineral composition rate under microscope. (b), (c) and (d) were drawn based on the modified rate of the minerals.

및 암석시료에서 관찰된 광물조성비를 토대로 하여 작성한 도시하였고, Fig. 4b에서 4d는 광물간의 조성비를 인위적으로 변화시킨 후의 조합에 의해 계산된 값으로 도시하였다.

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이, 실제 측정값을 토대로 하여 그려진 Fig. 4a는 전반적인 희토류원소 분포도 양상은 유사하다고 볼 수 있다. 그리고 실제 측정자료와 광물조성비를 토대로 하여 계산된 자료를 비교해 볼 때 (Fig. 4a의 붉은 색 열린 원), 계산된 값에 의한 분포도 도면은 Eu의 정(+)의 이상 즉 Eu의 계산된 값이 약간 높은 것으로 나타나지만, 전체적인 분포도의 양상은 대체적으로 일치하고 있음을 지시해준다. 이는 전암의 희토류원소 함량과 개개의 광물에서 측정된 희토류원소 함량과 광물조성간의 비율이 유의미하다는 것을 지시해준다고 판단된다. 하지만, Fig. 4a의 계산된 값은 대부분이 측정값에 비해 25% 정도 낮게 계산되었기 때문에, Fig. 4b~Fig. 4d에서는 희토류원소 분포도내 Eu의

이상 즉 Eu의 분포도 양상 및 기타 원소들에 영향을 준 광물의 유추와 더불어 가능한 한 측정값과 계산값과의 오차를 줄이고자 하였다. 그 결과, Fig. 4d와 같은 광물 조합은 La에서 Gd까지의 분포도는 거의 일치하였고, 중희토류에 속하는 Tb에서 Lu까지의 분포도도 측정값과 계산값과의 간격도 좁혀지는 효과가 나타났다. 그리고 Fig. 3에서의 광물에 따른 희토류원소 분포도와 Fig. 4에서의 개개의 광물별 영향을 고려해 볼 때, 전암에서의 Eu의 이상은 장석의 존재 즉 함량에 깊은 영향을 받았다고 판단된다. 그리고 전반적인 분포도의 양상을 토대로 볼 때는 경희토류는 장석과 운모류, 중희토류는 저어콘의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다. 하지만, 광물조성의 영향을 보다 더 정확히 판단하기 위해서는 저어콘을 포함한 여러 구성광물과 전암에서의 희토류 함량에 대한 측정값의 정확도를 향상시킬 필요가 있다고 본다.

Rb-Sr 광물연대측정결과

Lee *et al.*(2005)은 농거리-내덕히 화강암에 대해 1,720±150 Ma의 Rb-Sr 전암연대와 1,865±120 Ma의 Sm-Nd 전암연대값을 보고하였다. 이외에 Park *et al.* (1993) 또한 내덕리 화강암체에 대해 약 1,825±86(1σ) Ma의 Pb-Pb 연대를 보고한 바 있다. 그리고 Yun and Lee(1986)은 내덕리 화강암내 백운모에 대해 1,787±10 Ma ~1,642±23 Ma, 농거리 화강암에서는 1,802±18 Ma ~1,736±16 Ma의 K-Ar연대를 보고하였다. 이는 농거리-내덕리 화강암의 기원마그마가 약 1.80 Ga에서 1.87 Ga사이에 지각내에서 형성되어졌을 가능성이 높다는 것을 시사해준다.

Rb-Sr 동위원소계는 일반적으로 Sm-Nd 동위원소계에 비해 열수변질이나 변성작용의 영향을 쉽게 받는다. 그리고, 이 논문에서 사용된 ND1-2 전암 및 광물들로부터의 Rb, Sr 농도 및 Sr 동위원소비는 Table 2와 같으며, 이 자료를 토대로 작성한 등시선은 Fig. 5와 같다.

Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이, Rb의 함량은 1,384 ppm(μg/gr)으로 매우 높고, Sr은 8.01 ppm(μg/gr)을 매우 낮다. 따라서, 실험방법에서 언급한 바와 같이, 이 연구에서는 Rb과 Sr의 함량을 정확히 측정하기 위해 1차적으로 Rb과 Sr의 함량을 측정 한 후, 이를 바탕으로 표준용액을 재조정하여 Rb과 Sr의 함량을 재 측정하였으며, 1%전후의 오차를 갖고 측정하였다. 이와는 별도로, TIMS를 이용하여서도 Sr 동위원소비를 측정하였지만, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비 값이 10.2 정도로 너무 낮게 나와서 이 논문에서는 제외시켰다. 일반적으로는 TIMS를 사용해서 Sr 동위원소비를 측정할 때에는 ⁸⁷Sr에 대한 동중동위원소(isobar)인 ⁸⁷Rb의 간섭을 제외하기 위

해 먼저 가열시켜 Rb의 불순물을 제거할 수가 있다. 하지만 Table 2에서 볼 수 있는 바와 같이, Rb의 함량이 Sr에 비해 100 배 이상이 넘는 경우 Sr의 손실이 없이 Rb을 완전히 제거하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 Table 2의 ND1-2의 흑운모가 보여주는 Rb의 함량은 99.9%이상을 제거한다 하더라도 Sr분리액내 불순물로 남아있는 Rb의 농도가 Sr에 영향을 준다. 이 경우, TIMS로 측정할 시, 필라멘트를 가열시켜 Rb을 제거할 때 시간이 경과하면서 Sr도 같이 소모되어, 앞에서 언급한 낮은 수치의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr비를 얻게 된다. 연구초기에 얻어진 낮은 Sr 동위원소비비는 이와 같은 원인에 의해 낮은 값이 나온 것으로 판단된다.

Rb-Sr 전암-광물 연대계산은 Vermeesch(2018)의 IsoplotR 프로그램을 이용하였다. 등시선 계산시, Fig. 5a와 5b에서는 흑운모의 자료를 넣어서 계산하였고, Fig. 5c와 5d에서는 비교를 위해 흑운모를 제외하고 계산하였다.

Fig. 5에서 Rb-Sr 광물연대에 있어서 광물분리한 시료만을 이용한 내덕리 화강암에서의 Rb-Sr 광물연대는 1,814±142 Ma의 연대치를 시사해준다(Fig. 5a). 그리고 기존의 보고된 농거리와 내덕리 화강암에서의 Sr동위원소 자료와 함께 통합하여 계산했을 때는 1,707±74 Ma의 연대치를 시사해주며(Fig. 5b), 이 값은 걸보기에는 Lee *et al.*(2005)가 페그마타이트를 넣어서 계산한 1,720±150 Ma의 Rb-Sr 전암연대치와 유사하다. 하지만 흑운모를 제외하고 다시 계산하면 Fig. 5c와 Fig. 5d와 같이 Rb-Sr의 광물 및 전암 연대가 더 젊어지는 것을 볼 수 있다. 최근 Lee and Ko(2023)은 MC-ICP-MS를 이용하여 Sr 동위원소비를 측정하면서 Sr의 농도 또한 측

Table 2. Rb, Sr abundance (ppm) and Sr isotopic data from whole rock and its minerals of Naedeokri granite ND1-2

Sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2SE	Method ¹⁾
ND1-2_WR	263.40	88.20	8.860	0.955023	0.000012	ID-TIMS, TIMS
ND1-2_WR-re	256.13	86.75	8.747	0.952709	0.000014	ICP-MS, MC-ICP-MS
ND1-2_PL	455.60	100.60	13.600	1.090911	0.000014	ID-TIMS, TIMS
ND1-2_PL-re	295.03	114.62	7.603	0.922017	0.000014	ICP-MS, MC-ICP-MS
ND1-2_Tour	48.50	27.80	5.117	0.859341	0.000256	ID-TIMS, TIMS
ND1-2_Tour-re	47.75	28.14	4.984	0.861928	0.000014	ICP-MS, MC-ICP-MS
ND1-2_Zr	0.30	1.40	0.630	0.754160	0.000016	ID-TIMS, TIMS
ND1-2_QTZ	84.12	25.90	9.640	0.974225	0.000016	ICP-MS, MC-ICP-MS
ND1-2 Biot	1498.41	8.11	530.50	16.95329	0.00009	ICP-MS, MC-ICP-MS

¹⁾In method, ID-TIMS and ICP-MS indicate the determination method of Rb and Sr concentrations whereas TIMS and MC-ICP-MS indicate the method used in the determination of Sr isotope ratios in this study. Data measured by ICP-MS and MC-ICP-MS are shown by bold characters.

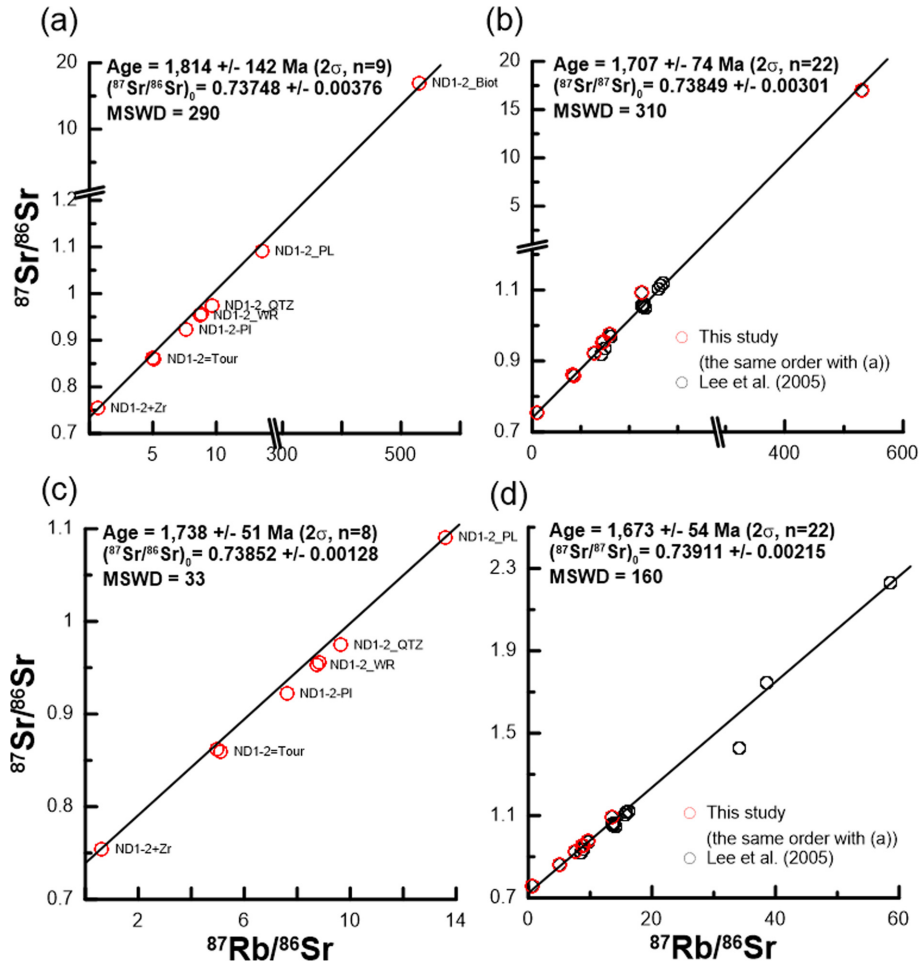


Fig. 5. (a) Rb-Sr mineral isochron of constituent minerals in ND1-2 Naedeokri granite (b) Mineral-whole rock isochron of Naedeokri-Nonggeori granite including previous data by Lee *et al.* (2005). The isochron ages of (c) and (d) were calculated excluding biotite of ND1-2. The program used for isochron age is IsoplotR (Vermeesch, 2018).

정할 수 있는 방법을 개발하였다. Lee and Ko(2023)의 실험법 즉 Sr 분리법은 Sr의 농도가 Rb의 농도와 유사하거나 더 높은 경우에는 회수율이 높기 때문에 Sr의 정량에도 유용하다. 하지만, 이 연구에서의 흑운모와 같이 Sr의 함량이 Rb에 비해 매우 낮을 때에는 여러 번의 컬럼분리가 필요하기 때문에 회수율이 다소 떨어지게 된다. 이 경우, 약간의 회수율 손실은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비는 큰 영향을 주지는 않지만 정량값은 오류의 원인이 된다. 이 연구에서도, MC-ICP-MS에 의한 Sr 동위원소 측정시의 농도값은 5ppm 이하로 측정되어졌다. 이와 같은 경우, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 값이 매우 커지고, 그 결과 등시선 연대는 훨씬 더 젊어지게 된다. Rb과 Sr의 농도차가 매우

큰 시료에서의 원소 정량 및 동위원소 측정실험법에 대해서는 추가 논문에서 언급하고자 한다.

하지만 Fig. 3a에서의 내덕리 화강암(ND1-2)의 저어콘이 보여주는 희토류원소 분포도를 토대로 내덕리 화강암은 부분적으로 열수변질을 받은 흔적을 갖고 있다고 해석한 바 있다. 운모류는 다른 광물들에 비해 열수변질의 영향을 쉽게 받는 광물군이며, Eberlei *et al.* (2015)는 화강암류의 변형과정에서 Sr의 손실에 의해 Rb/Sr비가 현저하게 바뀔 수 있다고 하였다. 따라서 기존 발표된 Rb-Sr의 전암연대값과 이번 연구에서의 Rb-Sr 광물연대값이 Sm-Nd계의 연도보다 짧게 계산되는 것은 화강암의 정치과정에서 Rb-Sr 동위원소계가 열수

변질과 같은 2차 지구화학적 반응의 영향을 받았을 가능성을 지시해준다고 해석된다.

요약 및 결론

영남육괴 북동부 지역에 분포하는 내덕리 화강암의 구성광물에서의 희토류원소 분포도와 Rb-Sr 광물연대를 광물연대를 토대로 화강암에 대한 기존 연대자료와 비교하여 생성연대와 전암의 희토류원소 분포도 형성에 어떤 광물조성이 많은 영향을 주었는지를 조사하였다. 전암을 구성하고 있는 각각의 광물들의 조성비를 토대로 비교하였을 때, 내덕리 화강암의 희토류원소 분포도는 장석류의 영향을 많이 받은 것임을 지시해준다. 그리고 Rb-Sr 연대에 있어서 광물분리한 시료만을 이용한 Rb-Sr 광물연대는 $1.814 \pm 142(2\sigma)$ Ma, 기존의 전암 자료와 함께 통합하여 계산했을 때는 $1,707 \pm 74(2\sigma)$ Ma의 연대치를 지시해주었다. 이 광물연대값은 겉보기에서는 기존의 $1,720 \pm 150$ Ma의 Rb-Sr 전암연대보다는 더 오래됐고, $1,865 \pm 120$ Ma의 Sm-Nd 전암연대보다는 더 젊다. 이와 같이 광물연대와 전암연대가 서로 다르게 나타나는 것은, 저어콘의 희토류원소 분포도가 지시해주는 바와 같이 Rb-Sr 동위원소계가 약 18억년전 내덕리 화강암의 형성 및 정치과정에 있어서 열수용액의 영향에 의한 열수변질에 의한 영향으로 해석된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 국토 지질조사 및 지질도-지질주제도 발간(과제번호 23-3111-1, GP2020-003) 및 한국연구재단의 기본연구사업(화강암질 마그마의 분화과정이 희토류원소의 방사성 동위원소와 안정동위원소 조성변화에 미치는 영향(2020R1F1A1075924, NP2020-012) 과제의 지원 하에 수행되었다. 이 기술보고의 내용이 향상되도록 세밀하게 검토해주신 부경대학교의 박계현 교수님과 익명의 심사위원께 깊은 감사드립니다.

REFERENCES

Farrar, E., Clark, A.H. and Kim, O.J., 1978, Age of the Sang-dong tungsten deposits ROK and its bearing on metallogeny of the Southern Korean Peninsula. *Economic Geology* 73, 547-566.
 Chang, H.-W., Turek, A. and Kim, C.-B., 2003, U-Pb zircon

geochronology and Sm-Nd isotopic constraint for Precambrian plutonic rocks in the northeastern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 37, 471-491.
 Eberlei, T., Habler, G., Wegner, W., Schuster, R., Körner, W., Thöni, M. and Abart, R., 2015, Rb/Sr isotopic and compositional retentivity of muscovite during deformation. *Lithos*, 227, 161-178.
 Gill, R., 2010, *Igneous rocks and processes: A practical guide*. Wiley-Blackwell, 428p.
 Kim, J. and Cho, M., 2003, Low-pressure metamorphism and leucogranite magmatism, northeastern Yeongnam Massif, Korea: implication for Paleoproterozoic crustal evolution. *Precambrian Research* 122, 235-251.
 Kim, M.J. and Lee, S-G., 2022, Optimal conditions for pre-treated sample for Sr isotope analysis by MC-ICP-MS: A comparison between eichrom (SR-R50-S)'s and bio-rad (AG50W-X8)'s resins. *Korean Journal of Mineralogy and Petrology*, 35/4, 507-520.
 Kim, S.-Y. and Moon, H.-S. 1994, The differential characteristics of tourmalines from pegmatites and its associated rocks, sangdong area. *Economic and Environmental Geology*, 27/5, 441-449.
 Lee, S-G., Kim, T., Han, S., Kim, H-C., Lee, H-M., Tanaka, T., Lee, S-R. and Lee, J-I., 2014, Effect of zircon on rare-earth element determination of granitoids by ICP-MS. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 337-349.
 Lee, S-G., Kim, T., Tanaka, T, Lee, S-R. and Lee, J-I., 2016, Effect on the measurement of trace element by pressure bomb and conventional teflon vial methods in the digestion technique. *Journal of Petrological Society of Korea*, 25, 1-13 (with English abstract in Korean).
 Lee, S-G. and Ko, K-S., 2023, Development of an analytical method for accurate and precise determination of rare earth element concentrations in geological materials using an MC-ICP-MS and group separation. *Frontiers in Chemistry*. 10:906160. doi: 10.3389/fchem.2022.906160
 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. *Precambrian Research* 139, 101-120.
 Lee, Y.I., Choi, T., Orihashi, Y., 2011, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the precambrian yuli group. *Journal of the Geological Society of Korea*. 47(1), 81-87.
 Long, X., Sun, M., Yuan, C., Kröner, A. and Hu, A., 2012, Zircon REE patterns and geochemical characteristics of Paleoproterozoic anatectic granite in the northern Tarim Craton, NW China: Implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research* 222-223, 474-487.
 McDonough, W.F. and Sun, S-S., 1995, The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120, 15-19. <https://doi.org/>

- 10.1016/0009-2541(94)00140-4
- Park, K-H., Cheong, C-S., Lee, K-S. and Chang, H-W., 1993, Isotopic composition of lead in precambrian granitic rocks of the taebaeg area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 29/4, 387-395.
- Slack, J.F., 1996. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. In: Grew, E.S., Anovitz, L.M. (Eds.), *Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, Rev. Mineral, vol. 33. Mineral Soc America, Washington, DC, pp. 559-644.
- Slack, J.F. and Trumbull, R.B., 2011, Tourmaline as a recorder of ore-forming processes. *Elements* 7, 321-326. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.5.321>.
- Vermeesch, P., 2018, Isoplot R: A free and open toolbox for geochronology, *Geoscience Frontiers*, 9/5, 1479-1493, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>.
- Vlach, S.R.F., 2022, On the morphology and geochemistry of hydrothermal crypto- and microcrystalline zircon aggregates in a peralkaline granite. *Minerals*, 12, 628. <https://doi.org/10.3390/min12050628>
- Yun, H.S. and Lee, D.S., 1986, Petrochemical study on the precambrian granitic rocks in the basement area of ham-baeg basin. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, 19/1, 35-55.

Received December 1, 2022

Review started December 4, 2022

Accepted June 13, 2023

[저자정보]

- 이승구 : 한국지질자원연구원/국토우지질연구본부/책임연구원주
- 이승렬 : 한국지질자원연구원/지질재해연구본부/책임연구원