

영주화강암과 안동 화강암의 인회석 Sr 동위원소 조성: 두 암체의 동위원소적 구분과 경계의 위치

윤리나¹ · 이승구² · 박계현³ · 송용선^{3*}

¹문화재청 천연기념물센터, ²한국지질자원연구원 국토지질연구본부

³부경대학교 환경해양대학 지구환경과학과

Sr Isotopic Composition of Apatite from the Yeongju and Andong Granites: Isotopic Distinction between the Two Granites and Location of the Boundary

Rina Yoon¹, Seung-Gu Lee² and Kye-Hun Park³, and Yong-Sun Song^{3*}

¹Natural Heritage Center, Cultural Heritage Administration of Korea, Daejeon, Korea

²Geological Research Division, Korean Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

³Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

요약: 영남육괴의 북동부에 위치하는 영주화강암과 안동화강암은 동일한 시기에 정치하였지만 서로 다른 Sr 동위원소 초기치를 갖는다. 하지만 기존의 여러 연구에서 두 저반을 구분하는 경계를 서로 다르게 표시하고 있다. 이 중에서 어떤 경계가 합당한지를 확인하기 위하여 이 지역의 화강암들로부터 인회석을 분리하여 Sr 동위원소 조성을 분석하였으며, 분석 결과를 토대로 두 암체의 경계를 제안한다.

핵심어: 영주 화강암, 안동 화강암, 인회석, Sr 동위원소 초기치

Abstract: Yeongju and Andong granites, located in the northeastern Yeongnam massif, reveal very similar emplacement ages but distinct initial isotopic compositions of strontium. However, previous studies used different boundaries to distinguish these batholiths. In this study, we determined Sr isotopic compositions of apatite separated from the granites of the area to find out the proper boundary and propose the location of such boundary based upon analysis.

Keywords: Yeongju granite, Andong granite, apatite, Sr isotope

서론

영주화강암과 안동화강암은 영남육괴의 북동부지역에 위치한 비교적 큰 규모의 저반이며, 생성시기(Lee *et al.*, 1999; Sagong *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2006; Yoon *et al.*, 2014), 마그마의 생성환경과 분화(Lee and Lee, 1991; Jwa, 1997; Lee *et al.*, 1998, 1999; Hwang *et al.*, 1999, 2000, 2002a,

2002b), 그리고 정치 깊이(Cho and Kwon, 1994; Hong, 2001) 등에 대해 여러 연구가 수행되어 왔다. 각섬석 지압계를 이용한 연구결과에 따르면 영주화강암과 안동 화강암은 남한에 분포하는 현생 화강암체들 중에서 가장 깊은 정치압력(각각 7.9 kb, 7.5 kb)을 보이며(Hong, 2001), 두 암체의 사이에 대규모의 전단대가 지나가고 있다. 따라서 두 암체의 생성과 분화, 정치, 정치 이후의 용기 및 전단운동 등에 대한 이해는 북동 영남육괴 뿐만 아니라 한반도의 지각진화사를 이해하는데 매우 중요하다고 할 수 있다(Kim *et al.*, 2008). 최근의 정밀한 저어콘 U-Pb 연대측정

*Corresponding author
Tel: +82-51-629-6627
E-mail: yssong@pknu.ac.kr

결과에 의하면 두 암체는 약 185Ma의 거의 동일한 정치연령을 나타낸다(Yoon *et al.*, 2014). 북동부의 춘양화강암체 역시 동일한 연령을 보이며(Song and Yi, 2015), 동일한 시기의 화성활동에 의해 매우 큰 저방을 형성하였음을 알 수 있다. 비록 정치 시기는 큰 차이가 없는 것으로 밝혀졌지만 영주화강암과 안동화강암의 Sr과 Nd 동위원소 조성은 매우 다르며 (Lee *et al.*, 1999) 이는 두 암체의 마그마를 이루는 근원물질이 뚜렷이 구분됨을 나타낸다.

향후 영주와 안동 화강암체에 대한 연구를 수행할 때 매우 다른 근원물질로부터 두 암체를 확실하게 구분하는 것이 매우 중요하다. 그러나 두 암체의 경계가 연구자에 따라 다르게 확정되어 있음을 발견하였다. 대부분의 연구자들은 Fig. 1의 A 경계를 기준으로 북쪽은 영주화강암, 남쪽은 안동화강암으로 간주하였다(예, Lee and Lee, 1991; Hong, 2001; Hwang *et al.*, 1999, 2000, 2002a, 2002b). 그러나 Lee *et al.*(1998, 1999)은 Fig. 1의 B 경계를 중심으로 영주화강암과 안동화강암을 구분하였다. 이렇게 통일되지 않은 경계로 영주화강암과 안동화강암을 구분하게 되

면 이 암체들에 대한 연구로부터 혼란스러운 결과가 도출될 수도 있으며, 확실한 근거를 바탕으로 두 암체를 구분할 수 있는 기준 마련이 시급하다. 이 연구의 목적은 영주화강암과 안동화강암의 두 암체가 구분되는 중요한 특징이 어떠한 것이 있는지를 검토하고, 이에 따라 두 암체 사이의 합리적인 경계 위치를 제안하는 것이다.

영주화강암과 안동화강암의 화학조성 및 Sr 동위원소 조성

영주화강암과 안동화강암은 약 185 Ma의 거의 동일한 정치연령을 보이지만(Yoon *et al.*, 2014) 각각의 암체 모두 조직과 구성광물이 다른 여러 분화된 암상들로 구성된다(Hwang *et al.*, 1999, 2000a, 2000b, 2000c). 하지만 영주화강암과 안동화강암의 화학적 조성 and 동위원소 조성을 비교연구한 Lee *et al.*(1998, 1999)의 연구결과에 따르면 두 암체가 구분되는 특징이 여러 가지 있음을 알 수 있다. 주원소 조성을 보면 같은 SiO₂ 함량일 경우 영주화강암이 안동화강암

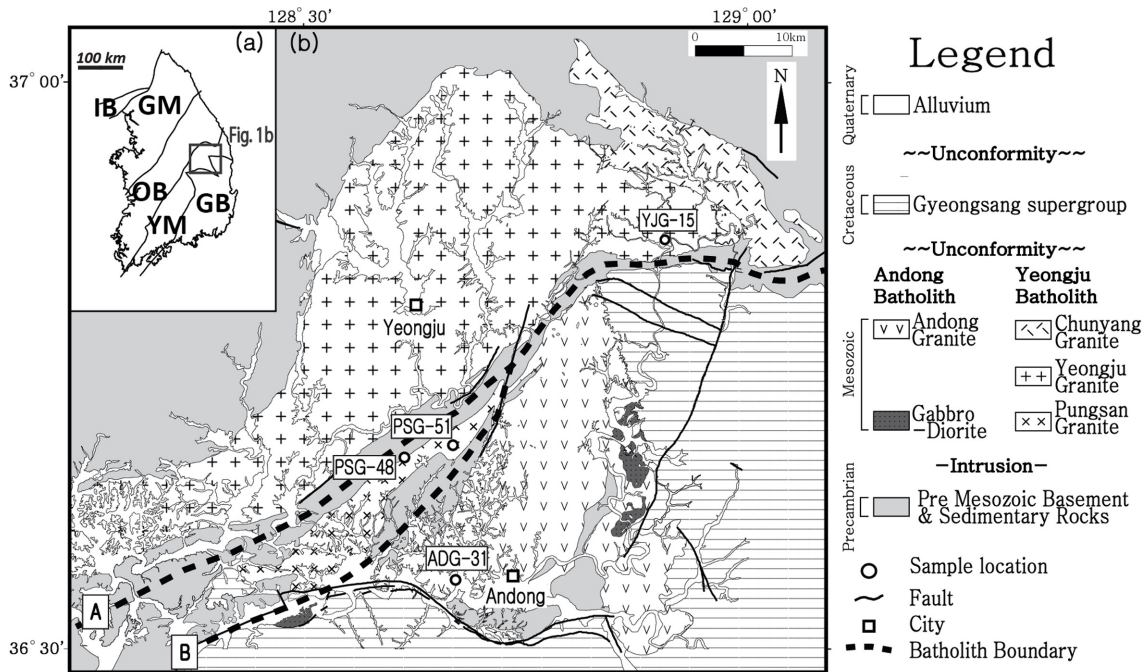


Fig. 1. Geological map of the Yeongju and Andong area, NE Yeongnam massif, modified after Hwang *et al.* (1999, 2002a) and references therein. Abbreviations: GM: Gyeonggi massif; OB: Okcheon belt; YM: Yeongnam massif; GB: Gyeongsang basin.

에 비하여 높은 K_2O , 그러나 낮은 Na_2O 및 P_2O_5 함량을 보인다. 미량원소 중에서도 Rb과 Sr이 상당히 뚜렷한 차이를 보이며, 영주화강암이 안동화강암에 비해 더 높은 Rb, 그리고 더 낮은 Sr 함량을 갖는다.

Lee *et al.*(1999)의 연구결과에 의하면 영주화강암과 안동화강암의 경우 마그마의 정치당시 Sr과 Nd의 방사기원 동위원소 조성이 뚜렷이 구분되는 값을 가지며, 영주화강암이 안동화강암에 비해 더 높은 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 초기치와 더 낮은 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 초기치를 보여준다.

Lee *et al.*(1999)의 연구에서는 Rb-Sr 분석을 통해 영주암체는 267 Ma, 안동암체는 361 Ma의 연령을 갖는다고 보고되었다. 그러나 최근에 훨씬 더 신뢰할만한 연대측정 방법으로 알려진 SHRIMP(Sensitive High-Resolution Ion Micro Probe) U-Pb 저어른 연대측정이 수행되었으며 그 결과는 두 암체 모두 약 185 Ma의 정치연령을 갖는 것으로 나타난다(Yoon *et al.*, 2014). Lee *et al.*(1999)의 연대측정 결과가 최근의 SHRIMP 자료와 큰 차이를 나타내는 이유는 연대측정에 사용된 Rb, Sr의 농도값을 XRF 분석으로 구하였기 때문인 것으로 판단한다. Lee *et al.*(1999)가 분석한 Sr, Nd 동위원소 값의 신뢰도는 함께 보고한 동위원소 표준의 분석값으로 볼 때 충분히 신뢰할 수 있는 값으로 평가할 수 있다. 다만 초기치의 계산에는 Lee *et al.*(1999)가 구한 연령 대신에 최근에 보고된 Yoon *et al.*(2014)의 연령을 사용하여야 할 것이다. 동위원소 초기치의 계산에 Lee *et al.*(1999)가 보고한 XRF 분석으로 구한 Rb, Sr 농도값을 사용하는 것은 다소 부정확한 값이 계산될 가능성도 배제할 수 없지만 Rb의 반감기를 감안할 때 비교적 젊은 연령의 암체이며, 이러한 부정확성은 두 암체에 동일하게 작용할 것이기 때문에 이러한 원소농도 값의 부정확성이 미치는 영향은 제한적일 것으로 판단한다. 실제로 Lee *et al.*(1999)가 보고한 Sr 동위원소 조성 및 Rb, Sr 농도와 185 Ma의 연령을 이용해 계산한 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 초기치는 영주화강암은 0.71564~0.71629, 그리고 안동화강암은 0.70971~0.711892의 범위이다. 이러한 값은 Lee *et al.*(1999)이 보고한 초기치(영주화강암 0.71505±0.00026, 안동화강암 0.70944±0.00011) 보다는 다소 높은 값이며, 이는 새롭게 계산에 사용된 연령이 더 젊기 때문이다. 두 암체에서 구한 값은 각각의 변화범위가 겹치지 않으며, 평균값을 계산해보면 영주화강암은 0.7158±0.0004, 안동화강암은 0.7111±0.0034으로 두 암체가 뚜렷하게 구분된다.

만약 안동화강암의 분석값 중에서 다른 표본들이 형성하는 변화경향에서 가장 벗어나는 1개의 값을 제외하면 0.7098±0.0002으로 편차값이 훨씬 작은 값을 보임과 동시에 영주화강암과는 더욱 차이 나는 값의 평균값이 계산된다. 이 표본의 경우 아마도 Rb, Sr 비율이 가장 잘못 분석된 시료일 가능성이 있으며, 이 시료 때문에 Lee *et al.*(1999)가 제시한 연령이 더 높은 연령으로 계산되었을 수 있다.

연구방법

앞에서 살펴본 바와 같이 영주화강암과 안동화강암은 화학조성과 동위원소 조성에서 상당한 차이를 보이기 때문에 이러한 특징을 이용하면 두 암체를 구분할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 1에서 문제가 되는 A와 B 경계선 사이에 놓여있는 지역은 풍화의 정도가 심하여 기존 연구결과들이 별로 많이 보고되지 못하였다. 이 지역을 영주화강암에 포함시킨 Lee *et al.*(1998)의 연구에서도 단 하나의 암석표본에서만 주원소 및 미량원소 분석값이 보고되었으며, Lee *et al.*(1999)의 Sr과 Nd 동위원소 연구에서는 이 지역으로부터 보고된 자료가 없다. 풍화도가 높은 암석의 경우 주원소와 미량원소 조성 역시 제 값을 구하기 힘들 수도 있기 때문에 이 연구에서는 동위원소 분석을 통해 두 경계선 사이에 분포하는 화강암체(Hwang *et al.*(2002a)의 풍산암체)의 특성을 파악하고자 하였다.

Sr 동위원소 분석을 위하여 북부의 영주화강암, 남부의 안동화강암, 그리고 경계 A와 B 사이에 놓인 풍산화강암체 지역에서 표본을 채취하였으며 Fig. 1에 그 위치를 표시하였다. 채취된 암석으로부터 인회석을 분리하여 Sr 동위원소 조성을 분석하였다.

인회석은 파쇄시료로부터 비이커 팬닝법을 통해 상대적으로 가벼운 석영과 장석 등의 광물들을 상당량 제거하여 무거운 광물들을 농축시킨 뒤에 실체현미경 아래서 순수한 인회석 광물 입자들을 모으는 방식으로 분리하였다. Sr 동위원소의 분석은 한국지질자원 연구원의 열이온화질량분석기(Thermal Ionization Mass Spectrometer, TIMS)로 분석하였다. NIST-987 Sr 동위원소 표준에 대한 30회 반복측정에 의한 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 비율은 0.710207±0.000011(2σ)이며, 동위원소 측정중의 Sr 바닥값은 0.1 ng 이하였다.

Table 1. Rb-Sr isotope composition of apatites from Yeongju and Andong granites

Area	Location	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ
Yeongju	YJG15	-	0.715283	0.000018
Pungsan	PSG51	0.02	0.714923	0.000018
	PSG48	-	0.71586	0.000005
Andong	ADG-31	0.05	0.70978	0.000033

결과 및 토의

이 연구에서 인회석을 분리하여 Sr 동위원소 조성을 분석한 이유는 인회석의 Rb 함량은 매우 낮으며, 반면에 Sr 함량은 상당히 높은 값을 보이기 때문이다. 이렇게 매우 낮은 Rb/Sr 비율을 갖는 인회석은 해당 화성암체가 정지한 이후에도 ^{87}Rb 붕괴에 의한 ^{87}Sr 성장이 거의 무시할만하기 때문에 마그마의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기치를 잘 간직할 수 있다. 이 연구에서 구한 인회석의 값을 보면(Table 1) 경계 A의 북부에 포함되는 YJG-15의 인회석 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값은 0.71528로 Lee *et al.*(1999)의 연구결과로부터 계산된 영주화강암의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초기치와 잘 일치한다. 또한 경계 B의 동쪽에 위치한 안동화강암 지역 ADG-31의 인회석은 0.70978로 Lee *et al.*(1999)의 안동화강암 값과 잘 일치한다. 한편 경계 A와 B 사이에 위치한 PSG-48과 PSG-51의 인회석들은 각각 0.71473과 0.71492의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 값을 가지며 이는 안동화강암보다는 영주화강암에 훨씬 더 가까운 값이라고 할 수 있다. 따라서 경계 A와 B의 사이에 분포하는 풍산암체 화강암은 영주화강암으로 분류하는 것이 타당하다고 생각한다.

사 사

이 논문은 2011학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2011-0364). 이 논문을 상세히 검토하여 유익한 조언을 해주신 김진섭, 홍세선 두 심사위원들에게 감사드린다. 또한 도면 작성에 도움을 준 부경대학교 대학원 서재현 석사에게도 감사를 표한다.

References

- Cho, D.-L. and Kwon, S.-T., 1994, Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in south Korea and the evolution of crustal thickness. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 41-61.
- Hong, S.S., 2001, Implication for the emplacement depth of the granites in the Yeongnam massif, using the aluminum-in-hornblende barometry. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 36-55.
- Hwang, S.K., Kim, S.W., Chang, T.W., Kim, J.M., and Lee, S.K., 1999, Intrusive phases and igneous processes in the Yeongju batholith. *Econ. Environ. Geol.*, 32, 669-668.
- Hwang, S.K., Ahn, U.S., and Kim, S.W., 2000, Spatial compositional variations and their origins in the Buseok pluton, Yeongju batholith. *Econ. Environ. Geol.*, 33, 147-163.
- Hwang, S.K., Chang, T.W., Kim, J.M., Ahn, U.S., and Lee, B.H., 2002a, Lithofacies and multiphase emplacement in the Andong batholiths. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 51-65.
- Hwang, S.K., Jang, Y.D., and Lee, Y.J., 2002b, Petrogenesis of plutonic rocks in the Andong batholith. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 200-213.
- Jwa, Y.-J., 1997, Petrological characteristics of two-mica granites: examples from Cheongsan, Inje-Hongcheon, Yeongju and Namwon areas. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 6, 210-225.
- Kim, S.W., Lee, C.Y., and Ryu, I.-C., 2008, Geochemical and Nd-Sr isotope studies for foliated granitoids and mylonitized gneisses from the Myeongho area in north-east Yecheon Shear Zone. *Economic and Environmental Geology*, 4, 299-314.
- Lee, J.I. and Lee, M.S., 1991, Mineralogy and petrology on the granitic rocks in the Yongju area, Kyoongsang Buk-Do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 626-641.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Park, C.-H., Lee, M.J., and Moutte, 1998, Petrology and geochemistry of the Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam massif, Korea. *Geosciences Journal*, 2, 1-14.
- Lee, J.I., Jwa, Y.-J., Park, C.-H., Lee, M.J., Moutte, J., and Kagami, H., 1999, Sr and Nd isotopic compositions of late Paleozoic Youngju and Andong granites in the northeastern Yeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 33, 153-165.
- Park, K.-H., Lee, H.-S., Song, Y.-S., and Cheong, C.-S., 2006, Sphene U-Pb ages of the granite-granodiorites from Hamyang, Geochang and Yeongju areas of the middle Yeongnam massif. *Journal of the Petrological Society of*

- Korea, 15, 39-48.
- Sagong, H., Kwon, S.-T., and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, 24, TC5002, doi:10.1029/2004TC001720.
- Song, Y.S. and Yi, K., 2015, SHRIMP U-Pb age of the Chunyang granite, NE Yeongnam massif, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 397-402
- Yoon, R., Song, Y.-S., and Yi, K., 2014, SHRIMP U-Pb zircon ages of the Yeongju and Andong granites, Korea and their implications. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 23, 209-220.
-
- 2016년 3월 10일 접수
2016년 3월 16일 심사개시
2016년 3월 26일 채택