

정읍엽리상화강암의 지구화학 및 동위원소 특성과 U-Pb 스피넬 연대

정연중¹ · 정창식¹ · 박천영² · 신인현^{3,*}

¹한국기초과학지원연구원, 305-333, 대전광역시 유성구 어은동 52

²조선대학교 자원공학과, 501-759, 광주광역시 서구 서석동 375

³조선대학교 과학교육학부, 501-759, 광주광역시 서구 서석동 375

Geochemistry, Isotope Properties and U-Pb Sphene Age of the Jeongeup Foliated Granite, Korea

Youn-Joong Jeong¹, Chang-Sik Cheong¹, Cheon-Young Park², and In-Hyun Shin^{3,*}

¹Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

²Department of Resource Engineering, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

³Department of Earth Sciences, Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

Abstract: In this paper, we investigate the geochemical and isotope properties of the Jeongeup foliated granite (hereafter, the JFG) in the Jeongeup area, aiming at establishing the movement age of the Honam shear zone by U-Pb sphene geochronology. In the AMF diagram, the JFG corresponds to the calc alkalic rock series, and belongs to the magnesia region in the diagram of silica versus $\text{FeO}^{\text{total}}/(\text{FeO}^{\text{total}}+\text{MgO})$. Additionally, in the Rb-Ba-Sr diagram, it is classified as granodiorite and anomalous granite with distinctive negative Eu-anomaly in the REE patterns. According to the silica and trace element contents, the JFG falls on the type VAG+syn-COLG, which implies that this was formed under the circumstance of compressional continental margin or volcanic arc. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope ratios range from 0.511495 to 0.511783 and T_{DM} are calculated to be about 1.68~2.36 Ga. U-Pb sphene ages of the JFG are 172.9 ± 1.7 Ma and 170.7 ± 2.8 Ma, based on ^{238}U - ^{206}Pb and ^{235}U - ^{207}Pb ages, respectively. Presumably, the dextral ductile shearing in the Jeongeup area has occurred after 173 Ma.

Keywords: Honam shear zone, Jeoneup foliated granite (JFG), model age. U-Pb sphene age

요약: 본 연구는 정읍지역에 분포하는 정읍엽리상화강암의 지구화학 및 동위원소 특성을 파악하고 U-Pb 스피넬 연대측정으로 구한 관입연대로 호남전단대의 전단작용시기를 밝히는데 있다. 본 암은 AMF삼각도의 칼크-알칼리암계열과 일치하며, 실리카와 $\text{FeO}^{\text{total}}/(\text{FeO}^{\text{total}}+\text{MgO})$ 의 변화도에서 마그네시아 영역에 속한다. Rb-Ba-Sr삼각도의 분화정도에 따른 암상분류에서 화강섬록암과 이상화강암영역에 해당되며, 희토류원소분포에서는 뚜렷한 음(-)의 Eu이상을 나타낸다. 실리카와 미량원소를 이용한 마그마의 지체구조상의 판별도에서 본 암은 화상호형(VAG)과 대륙충돌형(syn-COLG)에 해당되며 판구조운동과 관련된 응력장이 작용하는 대륙주변부나 호상열도 환경 하에서 형성되었음을 시사한다. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비는 0.511495~0.511783의 범위이며, 결핍된 맨틀에 대한 모델연령(T_{DM})은 1.68~2.36 Ga로 초기 원생대 시기의 맨틀에서 분리된 지각물질의 영향을 받았음을 시사한다. U-Pb 스피넬연대는 ^{238}U - ^{206}Pb 연대 172.9 ± 1.7 Ma와 ^{235}U - ^{207}Pb 연대 170.7 ± 2.8 Ma로 조화로운 연대를 나타내어, 정읍주변지역의 전단작용 시기는 173 Ma 이후로 생각된다.

주요어: 호남전단대, 정읍엽리상화강암, 모델연령, U-Pb 스피넬 연대

*Corresponding author: ihshin@chosun.ac.kr

Tel: 82-62-230-7335

Fax: 82-62-230-7371

서 론

한반도 서남부지역의 호남전단대는 옥천습곡대와 영남육괴의 경계지역에 위치한 북동 내지 북북동 방향의 우수향 연성전단대로서 한반도를 포함한 동북아시아에 중생대의 강한 변형 및 변성을 수반하는 조산운동과 관련된 조구적인 특징을 가진 전단대이다. 호남전단대 주변에는 전구조(pre-tectonic) 혹은 동구조(syn-tectonic) 심성암체인 엽리상화강암체가 분포하며, 이들 심성암체의 관입시기는 변형을 일으킨 전단작용 시기를 제한할 수 있다.

연구암체의 관입연대를 구하기 위해 사용된 스피인은 다양한 암석에서 흔히 관찰되는 부수적인 광물이며, Scott and St-Onge(1995)는 변성암의 변성온도-압력 및 U-Pb 연대측정 결과로부터 스피인의 폐쇄온도를 적어도 660-700°C 이상으로 보고하였다. 이 같은 높은 폐쇄온도는 화강암질 마그마의 고상선 온도에 해당되어 화강암질 마그마의 관입, 정치시기를 밝히는데 유용하게 이용된다. 스피인에 대한 U-Pb 연대측정은 Tilton and Grnefelder(1968)에 의해 처음 평가된 이후 폭넓게 사용되었으며, 비교적 폐쇄계를 잘 유지하여 모암의 초기 화강암질 또는 변성암질 연대의 조화로운 U-Pb 연대를 지시하는 경향이 있다(Corfu and Stone, 1998).

호남전단대에 분포하는 암쇄암류인 엽리상화강암체에 대한 암석화학적 및 성인에 대한 연구는 나춘기 외(1997a, 1997b), 김용준 외(1998)와 박영석 외(2001) 등이 있으며, 연대측정에 관한 연구는 김옥준(1971), 김용준 외(1994), Turek and Kim(1995), 사공희(2000), 신인현 외(2001) 그리고 이승렬 외(2003) 등이 발표하였으나, 정읍지역 주변에 분포하는 정읍 엽리상화강암체에 대한 동위원소적인 연구와 정치시기에 대한 연구는 아직 수행되지 않았다.

이번 연구는 정읍지역에 분포하는 정읍엽리상화강암에 대한 화학분석을 토대로 지구화학적인 연구와 Rb-Sr 그리고 Sm-Nd 등의 동위원소적인 연구를 통해 이 암체의 특성을 밝히고, 연구암체의 U-Pb 스피인 연대측정으로 호남전단대의 전단작용시기를 밝히고자 수행되었다.

지질 개요

연구지역은 옥천습곡대의 남서쪽에 위치하고 있으

며, 정읍시를 중심으로 북동과 남서방향에 분포하고 있다. 본 역을 포함한 호남전단대에 분포하는 화성심성암류는 대보 조산운동과 수반된 변형 여부에 따라 변형받은 선캠브리아기 화강편마암류와 트라이아스기-จู라기 엽리상화강암류와 대보화강암류 및 백악기 불국사화강암류로 구분하였으며, 정읍엽리상화강암은 정읍부근에 분포하는 장축 약 15 km 정도의 타원상 관입체로서 엽리상흑운모화강섬록암상과 엽리상반상화강섬록암상으로 구성된다(김용준 외, 1998).

본 암은 정읍부근에 북동-남서방향으로 대상분포하고 있으며, 연성변형을 받은 엽리상화강암체로 등립상 중립질의 흑운모화강섬록암이다. 본 암은 한반도의 옥천습곡대 북동-남서방향과 거의 평형을 이루며, 대보 조산운동에 의해 변형을 받아 암석내의 유색광물이 특정방향으로 재배열된 뚜렷한 엽리구조를 보이는 암쇄암류이다. 본 역의 북서방향으로는 변형받지 않은 주라기화강암류가 분포하며, 남동방향으로는 옥천습곡대의 변성암류와 백악기의 화산암류가 분포한다(Fig. 1).

연구지역 동부의 칠보면에서 정읍방향의 고갯길에서는 편리가 잘 발달한 중립 또는 조립질의 신선한 노두들이 관찰되며, 스피인연대측정에 이용된 시료는 노적도로변에서 채취하였다. 암체의 주 조성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 흑운모 및 각섬석 등이며, 부조성광물은 인회석, 저어콘, 스피인, 석류석 및 불투명광물 등이다. 석영이나 장석은 암쇄작용에 의한 방향성 있는 배열로 엽리구조를 형성하고 있다.

연구 방법

본 연구에 이용된 시료는 주로 도로의 절개지와 하천변에서 총 10개를 채취하였으며, 채취한 시료의 위치는 Fig. 1에 나타났다. 채취된 시료는 주성분원소와 미량성분원소에 대한 화학분석과 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 및 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비를 측정하였으며, JE-5 시료는 스피인을 대상으로 U-Pb법 절대연령을 측정하였다.

채취한 시료는 텅스텐카바이드 재질의 디스크형 암석분말기를 이용하여 약 70 μm 이하의 입도로 분쇄하였다. 분쇄된 시료의 일부는 주성분원소를 위해 영국 런던대학 Royal Holloway and Bedford new college에 의뢰하여 분석하였다. 동위원소 분석을 위한 시료에는 동위원소희석법에 의한 정량분석을 위해 분말시료 약 50 mg에 ^{87}Rb , ^{84}Sr , ^{149}Sm 그리고 ^{150}Nd

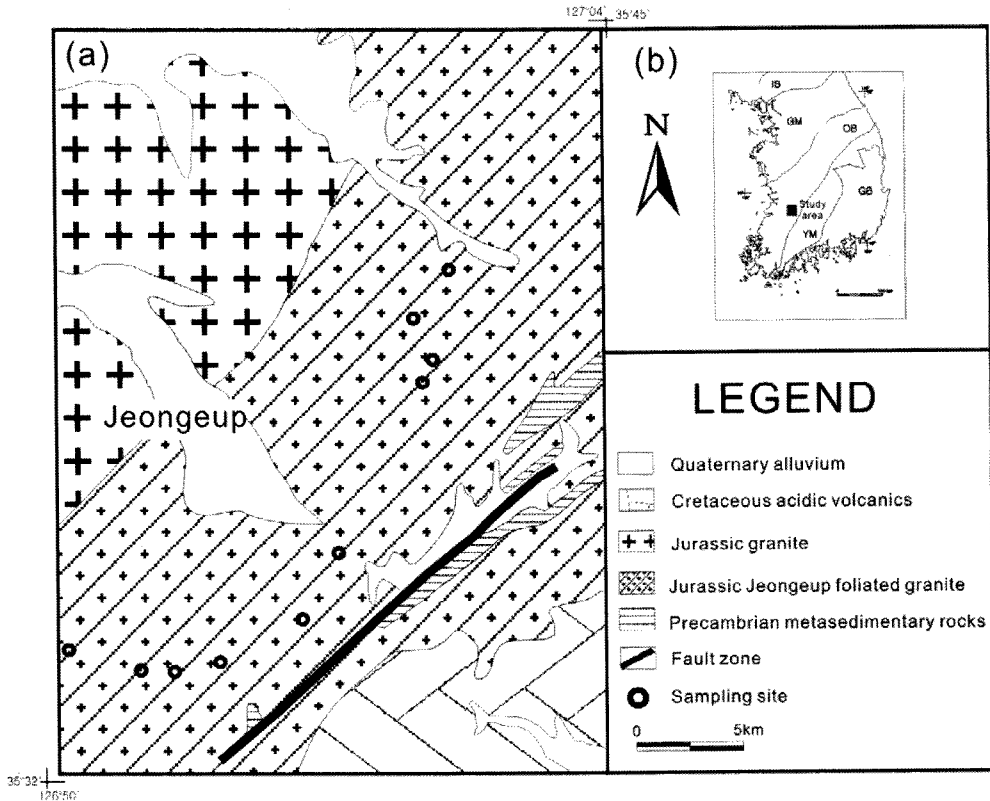


Fig. 1. (a) Geologic map and sampling site of the Jeongeup area. (b) Simplified tectonic province map of Korea Peninsula. (IB, Imjingang belt; GM, Gyeonggi massif; OB, Ogcheon belt; YM, Yeongnam massif; GB, Gyeongsang basin).

의 스파이크를 첨가한 후 혼합산(HF:HClO₄=10:1) 3 ml를 가하여 바이알 뚜껑을 닫고 24시간 가열하였다. 가열된 바이알의 뚜껑을 열고 휘발시킨 후 2.5 N HCl로 매질을 바꾸어 양이온교환컬럼화학(AG50W-X8, H⁺ form, 74~35 μm)에 적용하여 Rb, Sr 그리고 희토류원소를 포함하는 부분으로 분리하였다. 희토류를 포함하고 있는 부분은 묽은 염산과 HDEHP {bis (2-ethylhexyl) hydrogen phosphate}를 코팅시킨 테플론 분말을 이용한 컬럼화학(Richard et al., 1976)으로 Sm과 Nd를 분리하였다. U-Pb 연대측정을 위한 시료는 과분쇄기를 이용하여 약 125 μm의 크기로 체질한 후 실체현미경에서 스피인과 장석을 골라내었다. 스피인 약 0.1 g 정도에 혼합산을 가하여 완전용해 시킨 후 동위원소비 측정과 정량측정을 위한 부분으로 나누었다. U과 Pb의 정량분석은 ²³⁵U(99.987atom%)과 ²⁰⁸Pb (99.874atom%) 스파이크를 더하여 24시간 가열한 후 HBr매질로 바꾸어 음이온교환컬럼화학(AG1-X8, Cl⁻ form, 140~74 μm)에 의해 U과 Pb를 분리하였다.

동위원소 측정은 한국기초과학지원연구원의 열이온화질량분석기(TIMMS; thermal ionization mass spectrometer, VG54-30, Isoprobe-T)로 분석하였다. Rb과 Sm은 정적인 모드(static mode)로 분석하였으며, Sm은 ¹⁵²Sm/¹⁴⁷Sm=1.7831로 질량분별효과를 보정하였다. Sr과 Nd은 각각 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194과 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219로 질량분별효과를 보정하면서 동적인 모드(dynamic mode)로 분석하였으며, 첨가된 스파이크의 영향은 계산에 의해 제거한 후 보고하였다. Sr 동위원소의 표준물질인 NBS987의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 동위원소비는 0.710246±0.000003(N=30, 2σ SE)이었다. Nd 동위원소의 표준물질인 La Jolla와 JNdi-1의 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 동위원소비는 각각 0.511839±0.000004(N=23, 2σ SE)과 0.512099±0.000006(N=27, 2σ SE)이었다. 등시선을 구하기 위한 직선회귀방정식은 Ludwig (1999)을 따랐으며, 계산된 연대와 동위원소 초기값은 95%신뢰도(2σ SE)로 보고하였다. εSr과 εNd 계산을 위한 CHUR(Chondritic Uniform Reservoir)의

현재 값은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7045$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.0816$ 을 사용하였고(Faure, 1986), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 은 각각 0.512638과 0.1966을 이용하였다(Wasserburg et al., 1981). U과 Pb는 정적인 모드로 분석하였으며, 질량분별효과는 U500과 NBS981 표준물질로 보정하였다.

연구 결과

암석 화학

주성분원소: 정음엽리상화강암에 대한 주성분 원소 및 미량원소의 화학분석값은 Table 1에 나타냈으며, 산화물들의 변화 경향을 알아보기 위한 하커(Harker) 변화도는 Fig. 2에 제시하였다. 이 암체의 SiO_2 함량은 66.8~74.5 wt.%의 범위를 가진다. SiO_2 함량에 대한 각 산화물의 변화도는 SiO_2 함량이 증가함에 따라

K_2O 함량은 증가하는 경향을 보이며, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , TiO_2 및 P_2O_5 함량은 감소하는 경향을 나타내나, Na_2O 함량은 다소 분산되면서 감소하는 경향을 보였다. 본 암에서 주성분원소 변화폭은 작게 나타나며, 전체적인 변화양상은 직선적인 성분변화를 보여준다.

Bea(1996)은 화강암류의 미량원소들은 주로 부조성 광물에 존재하며 그것들의 농도는 암체 고유의 조성보다 부조성광물의 존재량에 더 조절되므로 화강암류는 주성분원소를 기준으로 분류해야한다고 제안하였다. Miyashiro(1970)는 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 와 SiO_2 를 이용하여 쏘레이이트질(tholeiitic)과 칼크알칼리질(calc-alkalic)으로 구분하였다. 그러나 Frost et al.(2001)은 암석의 알칼리도가 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ 값과 크게 관련이 없음을 고려하여 페로안(ferroan)과 마그네시아(magnesia)이란 용어를 제안하였으며, 철의 2가와 3

Table 1. Chemical compositions of major and trace elements from Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area

	JE-1	JE-2	JE-3	JE-4	JE-5	JE-6	JE-7	JE-8	JE-9	JE-10
SiO_2	68.8	74.5	73.0	69.6	67.6	67.6	68.2	73.0	66.8	68.8
Al_2O_3	16.3	14.4	15.0	15.9	16.3	16.7	15.9	14.8	17.0	16.0
Fe_2O_3	2.98	2.03	2.04	3.02	3.48	3.10	3.35	1.95	3.00	2.82
MgO	1.30	0.49	0.48	1.23	1.20	1.05	1.14	0.43	1.31	1.23
CaO	3.14	0.88	1.55	1.78	3.71	3.21	3.51	1.92	3.39	3.01
Na_2O	3.93	2.84	3.88	4.41	3.96	4.05	3.89	3.47	4.08	3.74
K_2O	2.89	4.46	3.76	3.43	2.81	3.46	3.08	4.14	3.71	3.76
TiO_2	0.49	0.26	0.26	0.43	0.68	0.63	0.68	0.26	0.53	0.47
P_2O_5	0.17	0.09	0.10	0.17	0.24	0.21	0.23	0.11	0.15	0.15
MnO	0.04	0.02	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05
Ba	672	827	893	1077	920	1211	838	811	790	819
Co	48	37	30	22	62	31	33	56	27	29
Cr	20	8	4	15	7	6	7	4	21	19
Cu	2	2	2	4	4	3	4	2	4	3
Li	57	43	23	35	79	46	39	49	65	49
Nb	13	9	9	9	9	9	9	9	13	11
Ni	16	7	6	9	12	8	9	7	17	13
Sc	5	3	3	5	5	4	4	3	5	5
Rb	118	169	129	90	90	89	84	151	138	162
Sr	464	234	434	726	734	897	709	383	457	410
V	28	13	11	37	45	39	47	14	28	26
Y	12	7	9	11	9	9	9	9	16	14
Zn	58	46	49	59	76	70	71	45	59	57
La	55	49	48	42	57	53	55	45	64	38
Ce	85	86	81	70	91	87	85	76	99	59
Nd	34	33	30	27	36	37	35	29	39	23
Sm	6.0	6.4	5.2	4.6	6.3	6.0	5.9	6.0	5.0	3.3
Eu	1.0	0.8	0.8	0.9	1.1	1.0	1.1	0.6	1.0	0.7
Dy	1.6	1.0	1.2	1.3	1.3	1.1	1.2	1.3	1.8	1.4
Yb	0.7	0.3	0.5	0.7	0.4	0.5	0.5	0.5	0.9	0.7

※ Major elements are in wt.% and trace elements are in ppm; Fe_2O_3^* is total Fe-oxide.

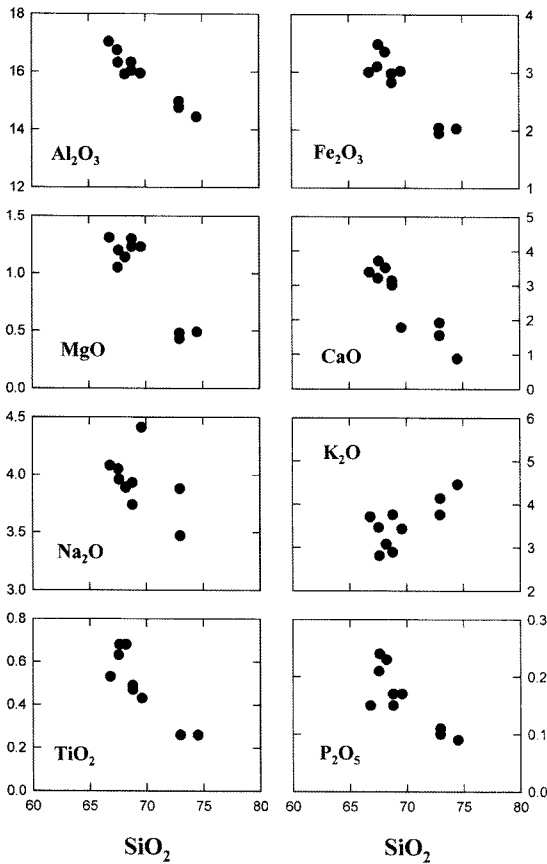


Fig. 2. Harker variation diagrams on SiO₂ vs. major elements for the Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. *Major elements are in wt.%.

가를 구별하지 않는 총철의 양을 이용한 도표를 사용하였다. 정읍엽리상화강암에 대해 $FeO^{total}/(FeO^{total}+MgO)$ 대 SiO₂의 도표에 도시해 보면 연구지역 암체는 마그네시아영역에 도시되며, 이는 마그네슘이 철보다 분자상으로 더 많이 분포함을 보여준다(Fig. 3).

연구암체의 분화경향을 파악하기 위해 AMF 삼각도에 도시하여 보면 모두 칼크-알칼리암 계열에 속하며, 방향성있는 성분변화를 보여 동원마그마의 산물임을 보여주며(Fig. 4.), Frost et al.(2001)의 MALI (Modified alkali-lime index)를 구하여 도시해 보면 정읍엽리상화강암은 알칼리칼릭질(alkalic-calcic)과 칼크알칼리질 영역에 도시된다(Fig. 5).

미량성분원소 및 희토류원소: 미량성분원소는 조암광물에 대한 선택적 치환성 때문에 전하와 원소의 이온반경 차이에 의해 주성분원소를 함유하는 결정 격

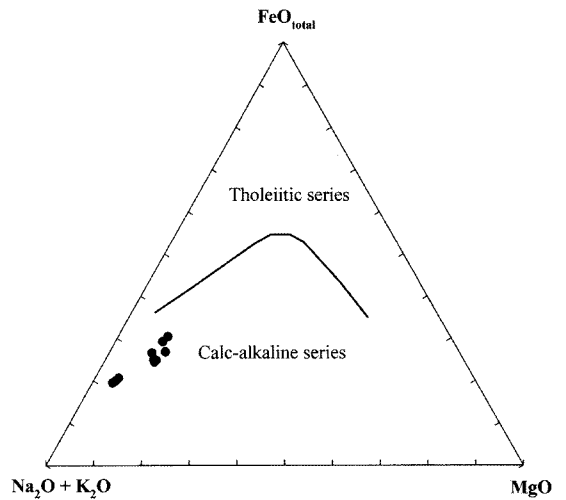


Fig. 3. An AMF diagram for the Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area.

*The boundary between the calc-alkaline field and the tholeiitic field is those recommended by Irvine and Baragar (1971).

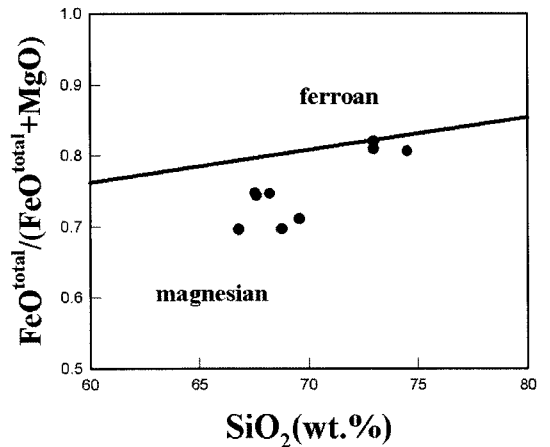


Fig. 4. $FeO^{total}/(FeO^{total}+MgO)$ vs. SiO₂ diagram showing the boundary between ferroan plutons and magnesian plutons for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. Fit to the Fe line is $FeO^{total}/(FeO^{total}+MgO)=0.486+0.0046\times SiO_2$ (Frost et al., 2001).

자 내에 위장, 포획 및 허용되어 함유된다(Mason and Moor, 1982). 또한 마그마가 분화되는 동안 정출 원소와 잔류 마그마사이의 분배계수에 따라 그 함량이 달라진다. 정읍엽리상화강암의 SiO₂ 함량에 대한 미량성분원소들의 함량변화는 Fig. 6에 나타났다. SiO₂ 함량이 증가에 따라 Rb와 Co는 증가하는 분포를 보이고, Sr, V 및 Y 등은 다소 분산되고 감소하

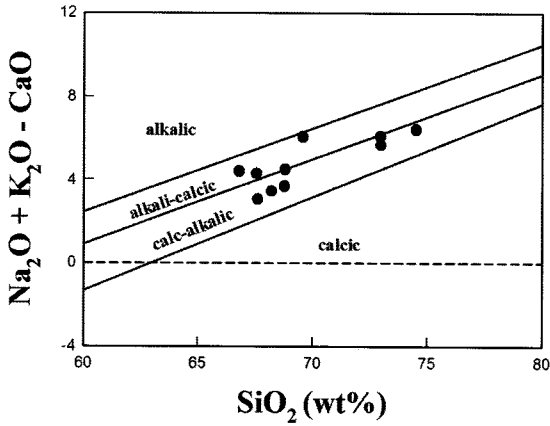


Fig. 5. Plot of Na_2O+K_2O-CaO vs. SiO_2 showing the approximate range for the alkali, alkali-calcic, calc-alkalic and calcic rock series for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area (Frost et al., 2001).

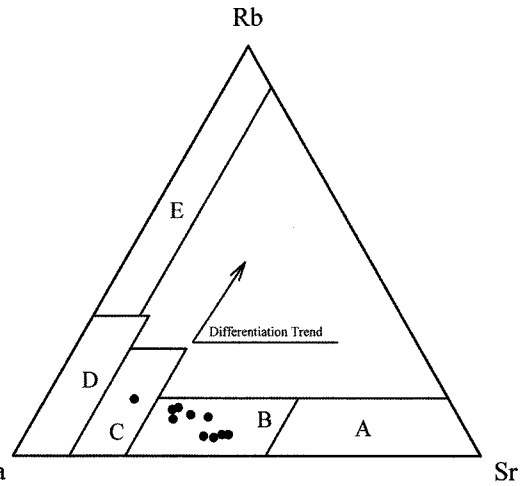


Fig. 7. Triangular diagram of Rb-Ba-Sr for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. (A: Diorite, B: Grandiorte and Diorite, C: Anomalous granite, D: Normal granite, E: Strongly differentiated granite)

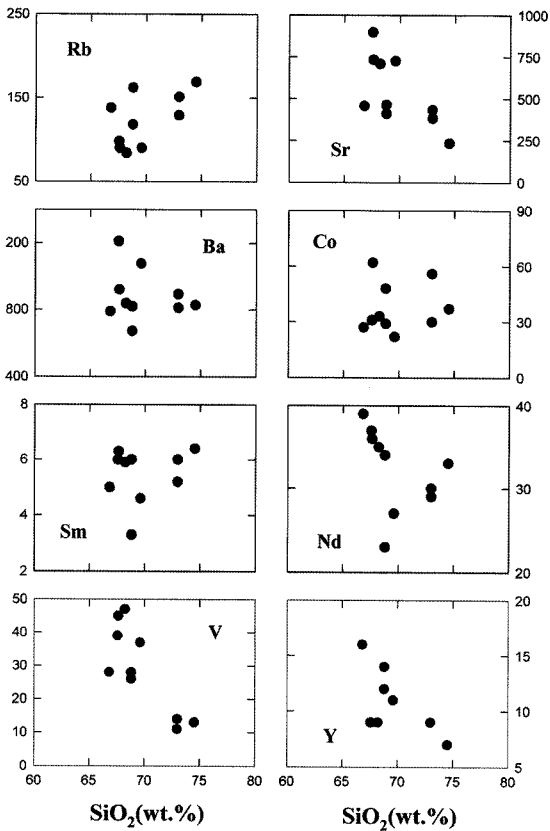


Fig. 6. SiO_2 vs. Trace elements variation diagrams for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. ※Trace elements are in ppm.

는 경향을 보인다. 미량성분원소 중 이온반경이 큰 불호정원소이며 마그마분화 말기에 농집되는 원소인

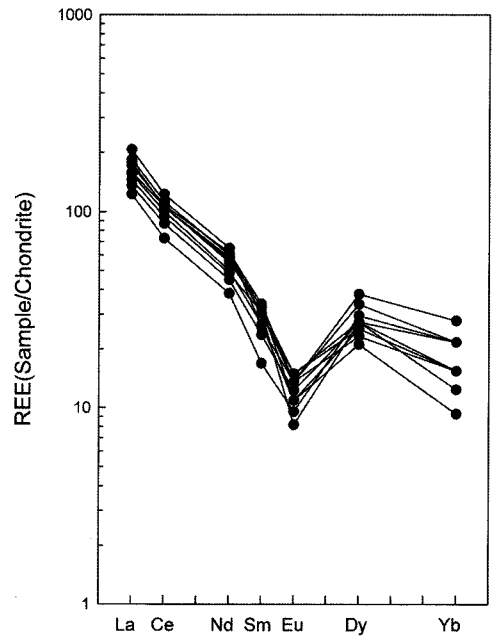


Fig. 8. Chondrite-normalized REE patterns for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. Normalization values are those recommended by Boynton (1984).

Rb는 SiO_2 성분과 정의 상관성을 보여준다. Rb-Ba-Sr 삼각도(Bouseily and Sokkary, 1975)로 분화정도에 따라 암상을 분류한 그림에 연구암체를 도시해보면 화강섬록암과 이상화강암영역에 도시된다(Fig. 7).

희토류원소들은 운석값으로 표준화된 각 원소들의 부

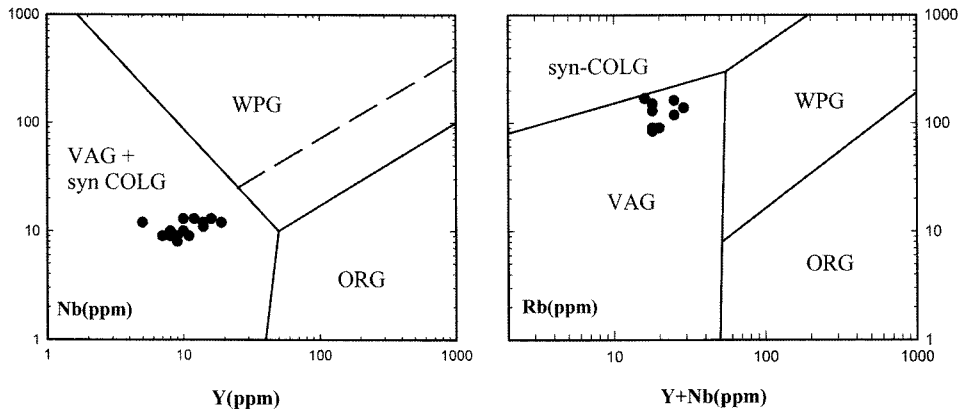


Fig. 9. Nb-Y and Rb-(Y+Nb) tectonic discrimination diagrams Jeongeup the foliated granite in the Jeongeup area (after Pearce et al., 1984).

화정도로 근원암에서의 초기 REE(rare earth elements) 함량, 부분용융의 정도 및 일련의 분별결정화작용과 함수적이기 때문에 화성암류의 암석성인 연구에 이용된다. 정읍엽리상화강암에 대한 REE분산양상을 검토하기 위해 Boynton(1984)의 운석값으로 표준화(normalized)한 후 Fig. 8에 나타냈다. 본 암은 LREE에서 HREE로 점진적으로 결핍되는 경향을 보여주고 있으며, 뚜렷한 음(-)의 Eu 이상은 사장석의 분별결정작용이 매우 강하게 일어났음을 제시하고 있다.

Pearce et al.(1984)는 화성암의 성인을 조구조적 정치에 따라 생성환경을 분류한 결과 화산호형(VAG),

동시충돌형(syn-COR), 판의 내부형(WPG) 그리고 해령형(ORG) 등으로 구분하였다. Y대 Nb와 Y+Nb대 Rb의 도표에서 정읍엽리상화강암은 화산호형+동시충돌형 영역에 점시되며, 이는 본 암이 판구조운동과 관련이 있는 응력장이 작용하는 대륙주변부나 호상열도 환경 하에서 형성되었음을 시사한다(Fig. 9).

동위원소 분석결과

Sr과 Nd 동위원소 조성: 정읍엽리상화강암에 대한 전암의 Sr과 Nd 동위원소조성인 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd과 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 동위원소비, Rb, Sr, Sm과

Table 2. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area

Sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ±2σ SE	ε Sr(T)	initial Sr	Sm (ppm)	Nd (ppm)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd ±2σ SE	εNd(0)	εNd(T)	f _{SmNd}	T _{DM} (Ga)
JE-1	120.6	414.1	0.8431	0.713167±0.000014	93.5	0.7111	4.34	30.6	0.0858	0.511518±0.000020	-21.9	-19.5	-0.56	1.94
JE-2	166.6	202.0	2.3907	0.725698±0.000011	217.4	0.7198	4.40	27.5	0.0969	0.511673±0.000014	-18.8	-16.7	-0.51	1.92
JE-3	132.8	385.0	0.9994	0.720487±0.000013	192.0	0.7180	4.20	26.4	0.0963	0.511521±0.000015	-21.8	-19.6	-0.51	2.11
JE-4	91.6	650.4	0.4074	0.711562±0.000013	86.0	0.7106	3.67	24.8	0.0896	0.511775±0.000015	-16.8	-14.5	-0.54	1.68
JE-5	87.9	646.1	0.3936	0.712169±0.000011	95.1	0.7112	5.17	35.8	0.0873	0.511707±0.000012	-18.2	-15.8	-0.56	1.74
JE-6	98.8	769.9	0.3714	0.712933±0.000013	106.7	0.7120	4.31	28.5	0.0916	0.511723±0.000014	-17.8	-15.6	-0.53	1.78
JE-7	86.8	629.8	0.3988	0.712107±0.000014	94.1	0.7111	4.87	31.6	0.0932	0.511783±0.000014	-16.7	-14.4	-0.53	1.73
JE-8	152.4	342.7	1.2875	0.716718±0.000021	128.5	0.7136	4.06	26.2	0.0938	0.511606±0.000014	-20.1	-17.9	-0.52	1.96
JE-9	132.6	404.8	0.9481	0.713588±0.000010	95.9	0.7113	4.79	29.4	0.0986	0.511495±0.000036	-22.3	-20.2	-0.50	2.18
JE-10	162.3	365.9	1.2844	0.714034±0.000014	90.5	0.7109	3.77	20.9	0.1089	0.511520±0.000016	-21.8	-19.9	-0.45	2.36

1) ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios were corrected for mass fractionation relative to ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194

2) Calculated from CHUR value: ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7045

3) ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd ratios were corrected for mass fractionation relative to ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219

4) Calculated from CHUR value: ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512638

5) For DM model age calculation; ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.51315, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.2137

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

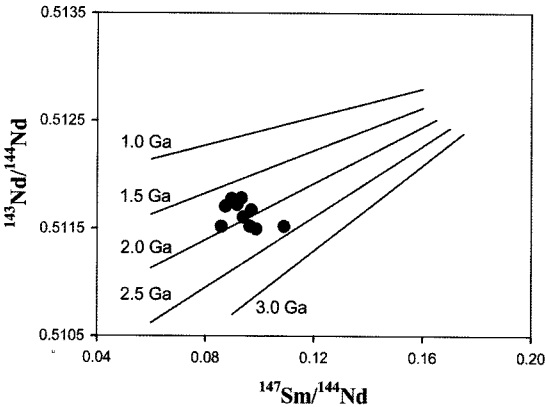


Fig. 10. Compiled $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope data for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. Reference lines for Nd model ages are drawn by an approximation from Peucat et al. (1988).

Nd 함량 그리고 모델연대 등은 Table 2에 나타났다. 본 암의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비는 0.7116~0.7257의 범위이며, Rb와 Sr의 정량분석 결과로부터 계산된 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비는 0.37~2.39이다. Sr 초생값은 0.7106~0.7136의 범위를 가진다. 본 암의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 과 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소비는 각각 0.511495~0.511783 과 0.858~0.1311이며, Sm과 Nd 함량은 각각 3.67~5.17과 24.8~35.8 ppm이다. 관입연대를 적용하여 계산된 $\epsilon_{\text{Nd}(T)}$ 값은 -14.4~-20.2이며, Nd 모델연대 T_{DM} 는 1.68~2.36 Ga를 지시한다.

지각을 구성하는 암석의 Nd 모델연대는 Table 2의 식과 같은 정의에 따라 암석이 맨틀로부터 분리된 시간을 의미한다(Jahn et al., 2001). 대부분의 화강암이나 세립질 퇴적물에서 보여주는 비교적 일정한 Sm/Nd는 대부분의 지각용융이나 퇴적과정동안 Sm/Nd의 분별작용이 일어나지 않았다는 것을 지시하며(Jahn et al., 1990), 맨틀에서 Nd이 분리되어 지각에 체재한 시간으로 간주될 수 있어 구성암의 고기지각 진화과정을 이해하는데 이용되기도 한다(Depaolo and Wasserburg, 1976). 본 암에서 얻어진 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 는 -0.45~-0.56의 범위로 이는 화강암계열의 지각구성 암석들의 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}=-0.4$ (DePaolo, 1981)과 유사하며,

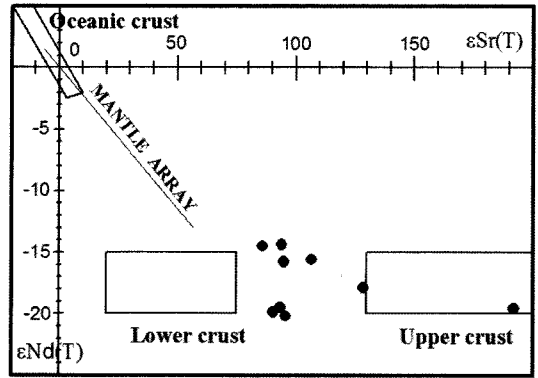


Fig. 11. Initial $\epsilon_{\text{Nd}(T)}$ vs. $\epsilon_{\text{Sr}(T)}$ digram of Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area. The isotopic compositions of oceanic crust, lower crust and upper crust area from DePaolo (1981).

Wu et al.(2005)가 제안한 화강암류 Nd 모델연대의 신뢰구간인 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}=-0.4\pm(-0.2)$ 의 영역에 포함된다. 결핍된 맨틀(depleted mantle)의 모델연대(T_{DM})는 현재 결핍된 맨틀의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 와 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 값인 0.51315와 0.2137을 이용하여 계산되었다(Peucat et al., 1988).

Fig. 10은 정음엽리상화강암에 대한 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 와 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 의 도표에 Peucat et al.(1988)에 의해 계산된 T_{DM} 값의 참고선과 같이 도시한 그림이다. 도시된 연구암체의 모델연대는 1.68~2.36 Ga로 분산되는 특징을 보이는데, 이는 정음엽리상화강암의 기원암이 초기 원생대의 다양한 연대를 갖는 기원물질로부터 유래되었음을 지시한다.

맨틀기원의 마그마인 해령 현무암은 양(+)의 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 와 음(-)의 $\epsilon_{\text{Sr}(t)}$ 값을 가지나, 지각기원물질의 마그마는 음(-)의 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 와 양(+)의 $\epsilon_{\text{Sr}(t)}$ 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Depaolo and Wasserburg, 1976). 정음엽리상화강암의 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 는 -14.4~-20.2로 음(-)의 값으로 부화되어 있으며, $\epsilon_{\text{Sr}(t)}$ 은 86~217의 넓은 분포범위를 가진다. Fig. 11에 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 과 $\epsilon_{\text{Sr}(t)}$ 의 도표에서 맨틀 어레이(mantle array)의 우측하단에 도시되어 본 암을 형성시킨 마그마는 지각물질이 재용융에 의한 분화산물임을 시사한다.

Table 3. U-Pb sphene age determined for Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area

Sample	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (2σ)	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (2σ)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (2σ)	U (ppm)	Pb (ppm)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (2σ, Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ (2σ, Ma)
JE-5 Feldspar	18.224±0.026	15.723±0.029	38.923±0.031				
JE-5 Sphene	47.601±0.098	17.156±0.100	90.134±0.092	22.93	2.858	172.9±1.7	170.7±2.8

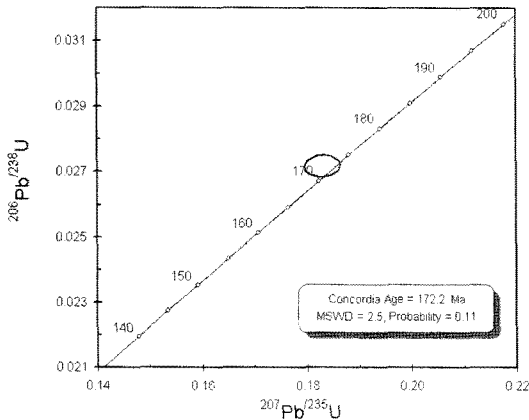


Fig. 12. Conventional concordia diagram for JE-5 sample of Jeongeup foliated granite in the Jeongeup area.

스핀의 연대측정: JE-5시료의 스피인에 대한 Pb 동위원소비, U과 Pb의 함량(ppm) 그리고 계산된 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 과 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 의 연대(Ma)는 Table 3에 나타냈으며, 오차는 95% 신뢰수준(2 σ SE)이다. U-Pb 연대계산을 위한 스피인의 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 와 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 동위원소비에 대한 초기값 보정은 JE-5시료의 사장석 Pb 동위원소비를 사용하였으며, 계산된 $^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ 과 $^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ 연대는 각각 172.9 ± 1.7 과 170.7 ± 2.8 Ma로 조화적인 연대를 나타낸다.

Fig. 12의 콘코디아(concordia) 다이어그램에 정읍엽리상화강암의 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 과 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 동위원소비를 도시해 보면 172.2 Ma를 지시한다. 스피인의 U-Pb 연대 측정시 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 보다 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 동위원소비가 더 큰 오차를 가지며 측정된 연대에서도 큰 오차범위를 지시한다. 이는 젊은 중생대 암석에서 U의 방사성붕괴에 의한 Pb가 충분히 축적되기 어렵고, 스피인의 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 동위원소비는 초기값 보정에 사용되는 장석의 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 동위원소비와의 차이가 매우 작아 큰 영향을 받으므로 중생대 화강암의 스피인 연대를 해석할 때는 $^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ 연대가 더 신뢰성이 있다(사공희, 2000).

토 의

정읍엽리상화강암에서 얻어진 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 동위원소비는 0.7116~0.7257로 주변암체인 전주엽리상화강암의 0.7147~0.7308(신인현 외, 2001)과 0.7112~0.7173(나춘기 외, 1997b)의 값과 유사하게 나타났다. -14.4~

-20.2값의 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 과 86~217의 $\epsilon\text{Sr}(t)$ 는 본 암을 형성시킨 마그마가 지각물질의 재용융에 의한 분화산물임을 시사한다.

정읍엽리상화강암의 결핍된 모델연대는 1.68~2.36 Ga로 나타나 비교적 광범위한 연대의 기원물질이 맨틀에서 분리된 후 지각내에 머물러 있다가 쥬라기의 화성활동으로 정치되었을 것이다. 본 암체의 결핍된 맨틀의 모델연대는 옥천습곡대 중생대 화강암류의 1.7~2.2 Ga, 전주엽리상화강암의 1.83~2.19 Ga 그리고 순창엽리상화강암의 1.76~2.24 Ga와 유사하다.(Na, 1994). 또한 대전에서 원주를 잇는 한반도의 북동-남서방향에 분포하는 흑운모화강암인 대보화강암류의 모델연대인 1.6~2.3 Ga(정창식, 개인통신)와도 유사한 시기를 지시한다. 이는 쥬라기 화강암류인 대보화강암류와 옥천습곡대에 분포하는 엽리상화강암류 등은 약 20억년을 전후한 초기 원생대(Proterozoic)시기에 맨틀에서 분리된 지각물질의 영향을 받아 쥬라기에 관입정치된 화강암류들임을 지시한다.

호남전단대 엽리상화강암체에 대한 절대연령측정은 연성변형작용을 일으킨 조산운동시기를 제한하고 전단대를 형성시킨 지구조적인 모델을 만드는 데 기여한다. 따라서 정읍엽리상화강암의 절대연령측정은 폐쇄 온도가 높고 U과 Pb의 폐쇄계를 잘 유지하는 스피인을 대상으로 실시하였다. U-Pb법 연대측정에 많이 이용되는 저어콘과 모자나이트 등은 U/Pb의 비(ratio)가 크기 때문에 낮은 온도에서 방사성 기원의 Pb 손실이 일어나는데(Teufel and Heinrich, 1997), 상대적으로 U/Pb의 비(ratio)가 낮은 스피인은 방사성 붕괴에 의한 결정격자의 손실이 심하기 않기 때문에 완벽하게 폐쇄계를 유지하며 조화로운 U-Pb 연대를 나타낸다(Corfu and Stone, 1998).

본 연구에서 얻어진 스피인의 $^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ 연대 172.9 ± 1.7 Ma와 $^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ 연대 170.7 ± 2.8 Ma의 조화적인 연대는 사공희(2000)의 전주지역 중립질 반상 흑운모 화강암에 대한 스피인의 $^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ 등시선 연대 170 ± 12 Ma와 $^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ 등시선 연대 170 ± 21 Ma, 이승렬 외(2003)의 금산사 지역 엽리상화강섬록암과 흑운모 화강암에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 172.7 ± 1.4 Ma와 $169.6\sim 167.5$ Ma와 비교하면 조화적이다. 이는 호남전단대내에 분포하는 전주-금산사-정읍지역으로 이어지는 화강암체들이 173~170 Ma 시기에 관입 정치되었음을 지시한다. 정읍지역에서는 전단작용 이후인 후구조 화강암체인 비엽리화강암체

가 관찰되지 않지만, 전주지역에서 전단대를 관입하는 합열 화강암체의 ^{238}U - ^{206}Pb 연대 $165 \pm 1.7 \text{ Ma}$ (사공희, 2000)가 제시되었으며, 이 결과는 전주주변지역의 전단작용의 시기를 170~165 Ma로 제한하고 있다. 따라서 정읍지역 엽리상화강암체도 이들 암체들과 유사한 시기에 관입정착하고 173 Ma 이후 우수향 연성전단작용을 받아 엽리를 발달시켰을 것으로 생각된다.

이와 같은 전주-금산사-정읍지역의 관입정착시기와 전단작용 시기는 약 400 km의 길이와 약 100 km의 폭을 가진 것으로 알려진 호남전단대(Yanai et al., 1985; 김용준 외, 1994)의 활동시기를 제한하는데 이용될 수 있을 것이다. 호남전단대의 전단작용의 시기는 변형받은 엽리상화강암체와 이를 관입하는 변형받지 않은 화성암체의 관입시기를 결정하고 이를 이용하여 그 시기를 추정하였다. 순창엽리상화강암에 대해 Kim and Turek(1996)과 Cho et al.(1999)은 전단작용시기를 180 Ma로 지시하고 있어, 전주-금산사-정읍지역 암체들과는 약 10 Ma 이상의 차이를 보인다. 또한 Cheong et al.(2006)는 무안지역 압쇄암에 대해 신키네마틱 광물(synkinematic mineral)인 백운모를 대상으로 한 변형연대를 138 Ma로 발표하여 백악기 전기의 전단작용시기를 지시하기도 하였다. 연구지역을 포함하는 옥천대 서남부지역에서 전단작용시기가 다양하게 나타나는 것은 호남전단대에서의 전단작용이 동시에 발생한 것이 아니라 지역에 따라 시기를 달리하며 불연속적으로 이루어진 것으로 생각된다. 따라서 호남전단대 전반의 전단작용시기를 밝히기 위해서는 전단대내에 분포하는 다수의 압쇄암에 대한 정정시기와 지구조 운동시기를 동시에 밝히는 연구가 수행되어야 할 것이다.

결론

정읍엽리상화강암에 대한 지구화학과 동위원소적인 특성 그리고 U-Pb법 편 연대측정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. AMF 삼각도에서 정읍엽리상화강암은 칼크-알칼리암 계열과 일치하며, 실리카와 $\text{FeO}^{\text{total}}/(\text{FeO}^{\text{total}} + \text{MgO})$ 의 변화도에서 마그네시아 영역에 해당된다.
2. Rb-Ba-Sr 삼각도의 분화도에 따른 암상 분류에서 본 암은 화강섬록암과 이상화강암영역에 해당된다. 희토류원소의 특징은 경희토류가 중희토류보다

부화되고 뚜렷한 음(-)의 Eu 이상을 나타낸다.

3. 실리카와 미량원소를 이용한 마그마의 지체구조상의 판별도에서 정읍엽리상화강암은 화산호형(VAG)과 대륙충돌형(syn-COLG)에 해당되어 판구조운동과 관련이 있는 응력장이 작용하는 대륙주변부나 호상열도 환경 하에서 형성되었음을 시사한다.

4. 결핍된 맨틀의 모델연대는 1.68~2.36 Ga로 초기 원성대 시기에 맨틀에서 분리된 지각물질의 영향을 받았으며, 본 암을 형성한 마그마는 지각물질의 재용융에 의한 분화산물임을 시사한다.

5. 정읍엽리상화강암의 U-Pb 스핀연대는 ^{238}U - ^{206}Pb 연대 $172.9 \pm 1.7 \text{ Ma}$ 와 ^{235}U - ^{207}Pb 연대 $170.7 \pm 2.8 \text{ Ma}$ 의 조화로운 연대를 보여주며, 173 Ma 이후 우수향 연성전단작용을 받아 엽리를 발달시켰을 것으로 생각된다.

사사

이 논문은 2006년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 지원해주신 조선대학교에 감사드립니다. 논문의 질적 향상을 위해 건설적인 의견 제시와 조언을 해주신 익명의 심사위원에게 깊은 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김용준, 1971, 남한의 신기화강암류의 관입시대와 지각변동. 광산지질, 4, 1-9.
- 김용준, 박영석, 강상원, 1994, 호남전단대내에 분포하는 엽리상화강암류의 지질시대와 생성과정에 관한 연구. 자원환경지질, 27, 247-261.
- 김용준, 이창신, 김희남, 1998, 전주-정읍지역에 분포하는 화성섬록암류의 암석화학과 성인. 지구과학회지, 19, 56-77.
- 나춘기, 이인성, 정재일, 1997a, 전주 및 순창지역에 분포하는 엽리상화강암류의 성인에 대한 연구(I)-암석지화학적 특성을 중심으로-. 한국지구과학회, 18, 480-492.
- 나춘기, 이인성, 정재일, 1997b, 전주 및 순창지역에 분포하는 엽리상화강암류의 성인에 대한 연구(II)-Sr 및 Nd 동위원소적 특성을 중심으로-. 자원환경지질학회, 30, 249-262.
- 박영석, 김중균, 김진, 2001, 영광-김제지역 화강암류의 암석화학적 연구. 자원환경지질학회, 34, 55-70.
- 사공희, 2000, 남한의 현생이인 화강암류에 대한 U-Pb 스핀 지질연대와 알칼리 장석의 납 동위원소연구: 한반도의 지각의 진화에 대한 의미. 연세대학교 박사학위논문, 165 p.

- 신인현, 박천영, 정연중, 2001, 전주지역 엽리상화강암의 암석화학 및 Sr · Nd 동위원소 조성. 한국지구과학회, 22, 1-9.
- 이승렬, 이병주, 조동룡, 기원서, 고희재, 김복철, 송교영, 황재하, 최범영, 2003, 전주전단대 화강암류의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령측정: 호남전단대의 운동시기에 대한 고찰. 한국암석학회 · 한국광물학회 공동학술발표회 논문집, p. 55.
- Bea, F., 1996, Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths, implications for the chemistry of crustal melts. *Journal of Petrology*, 37, 521-552.
- Bouseily, A.M. and Sokkary, A.A., 1975, The relation between Rb, Ba and Sr in granitic rocks, *Chemical Geology*, 16, 207-219.
- Boynnton, W.V., 1984, Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In Henderson P. (ed.), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, USA, 63-114.
- Cheong, C.-S., Kee, W.S., Jeong, Y.-J., and Jeong, G.Y., 2006, Multiple deformations along the Honam shear zone in southwestern Korea constrained by Rb-Sr dating of synkinematic fabrics: Implication for the Mesozoic tectonic evolution of northeastern Asia. *Lithos*, 87, 289-299.
- Cho, K.-H., Takagi, H., and Suzuki, K., 1999, CHIME monazite age of granitic rocks in the Sunchang shear zone, Korea: Timing of dextral ductile shear. *Geoscience Journal*, 3, 1-15.
- Corfu, F. and Stone, D., 1998, The significance of titanite and apatite U-Pb ages: Constraints for the post-magmatic thermal-hydrothermal evolution of a batholithic complex, Berens River area, northwestern Superior Province, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 17, 2979-2995.
- DePaolo, D.J., 1981, A Neodymium and Strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. *Journal of Geophysical Research*, 86, 10470-10488.
- DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J., 1976, Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophysical Research Letters*, 3, 249-252.
- Faure, G., 1986, *Principles of isotope geology*. John Wiley and Sons, USA, 589 p.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.M., and Frost, C.D., 2001, A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42, 2033-2048.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 523-548.
- 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 Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59, 171-198.
- Kim, C.B. and Turek, A., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 30, 323-338.
- Ludwig, K.R., 1999, *Isoplot/Ex(v.2.06)-A geochronological tool kit for Microsoft Excel*. Berkely Geochronology Center, Special Publication No. 1a, USA, 49 p.
- Mason, B. and Moor, C.B., 1982, *Principles of geochemistry*. John Wiley and Sons, USA, 329 p.
- Miyashiro, A., 1970, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274, 321-355.
- Na, C.K., 1994, genesis of granitoid batholiths of Okchon zone, Korea and its implications for crustal evolution. Ph. D. dissertation, University of Tsukuba, 154 p.
- Pearce, J.A., Harris, N.B., and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
- Peucat, J.J., Vidal, P., Bernard-Griffiths, J., and Condie, K.C., 1988, Sr, Nd and Pb isotopic systematics in the Archaean low-to high-grade transition zone of southern India: Syn accretion vs. post-accretion granulites. *The Journal of Geology*, 97, 537-550.
- Richard, P., Shimizu, N., and Allegre, C.J., 1976, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ a natural tracer: An application to oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 31, 269-278.
- Scott, D.J. and St-Onge, M.R., 1995, Constrains on Pb closure temperature in titanite based on rocks from the Ungava orogen, Canada: Implications for U-Pb geochronology and P-T-t path determination. *Geology*, 23, 1123-1126.
- Teufel, S. and Heinrich, W., 1997, Partial resetting of the U-Pb isotope system in monazite through hydrothermal experiments: An SEM and U-Pb isotope study. *Chemical Geology*, 137, 273-281.
- Tilton, G.R. and Grünenfelder, M.H., 1968, Sphene: Uranium-Lead Ages. *Science*, 159, 1458-1461.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1995, U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryeongnam massif, Korea. *Geochemical Journal*, 29, 243-258.
- Wasserburg, G.J., Jacobson, S.B., DePaolo, D.J., McCulloch, M.T., and Wen, T., 1981, Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45,

2311-2323.

Wu, F.-Y., Zhao, G., Wilde, S.A., and Sun, D., 2005, Nd isotope constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 523-545.

Yanai, S., Park, B.S., and Otoh, S., 1985, The Honam shear zone (South Korea): Deformation and tectonic implication in the Far East. *Scientific Papers of the College of Arts and Sciences*, 35, 181-210.

2007년 6월 19일 접수

2007년 11월 16일 수정원고 접수

2008년 12월 4일 채택