철원분지 화성암류의 SHRIMP 연령측정과 화산작용 시기

황상구^{1*} · 안유미¹ · 이기욱²

¹안동대학교 지구환경과학과, ²한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

SHRIMP Age Datings and Volcanism Times of the Igneous Rocks in the Cheolwon Basin, Korea

Sang Koo Hwang^{1*}, Yu Mi An¹ and Keewook Yi²

¹Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 760-749, Korea

²Korea Basic Science Institute, Ochang 363-883, Korea

요약: 경기육괴 북서부에 위치하는 철원분지 철원층군은 경상분지 유천층군에 대비되어 왔지만 이의 연령은 이보다 상당히 오래되었다는 것이 밝혀졌다. 이 연구에서는 철원분지 화성암류에 대해 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령을 측정하였다. 저어콘에서 구한 평균연령은 유문암이 115.0 ± 1.1 Ma, 화강반암이 111.24 ± 0.85 Ma와 109.1 ± 1.1 Ma를 보여준다. 그리고 지장봉응회암의 최소연령은 113 Ma를 보여준다. 유문암의 연령은 동막골응회암의 분출 직후에 칼데라 함몰을 지시하는 환상암맥의 관입시기를 한정하고, 지장봉응회암의 최소연령은 아마도 철원분지에서 마지막 화산작용을 의미한다. 따라서 철원분지의 화산암류는 아티안 후기에 분출되었으며 철원층군은 경상분지 신동층군에 대비된다. 그리고 철원분지에서 심성작용은 화산작용이 끝나면서 111.2~109.1 Ma 시기에 일어났다. 지장봉응회암의 저어콘들로부터 측정한 연령분포는 철원분지 주변의 백악기, 유라기, 트라이아스기, 신원생대, 고원생대와 시생대 근원암에서 유래된 외래 저어콘의 존재를 지시한다. 그러나 시생대 연령은, 지표에 노출되지 않지만, 아마도 지하에 시생대 암층이 존재함을 암시해준다. 이와 같은 다양한 연령분포에 의하면 지장봉응회암이 분출시킨 화구는 연대가 다른 여러 암층이 층서적으로 겹치고 관입암이 교차하는 지역에 위치한다.

핵심어: 철원층군, SHRIMP U-Pb 연령, 유문암, 화강반암, 지장봉응회암, 외래 저어콘

Abstract: Cheolwon Group in the Cheolwon Basin, which lies northwest of the Gyeonggi massif, has been correlated to the Yucheon Group in the Gyeongsang Basin, but its ages and volcanic times are defined to be considerably earlier than the other one. In this study, SHRIMP zircon U-Pb ages were determined from the igneous rocks in the Cheolwon Basin. The mean ages from zircons are 115.0 ± 1.1 Ma in rhyolite, and 111.24 ± 0.85 Ma and 109.1 ± 1.1 Ma in granite porphyry. The minimum age is 113 Ma in the Jijangbong Tuff. Such age in the rhyolite define the intrusion time of ring dykes, suggesting a caldera collapse following eruption of the Dongmakgol Tuff. Such age in the Jijangbong Tuff represent latest volcanism as postcaldera in the basin. The volcanic rocks in the basin were erupted during late Aptian, and are correlated to the Sindong Group in the Gyeongsang Basin. The plutonism in the basin occurred during 111.24 ± 0.85 Ma~ 109.1 ± 1.1 Ma, following the volcanism. The age distribution of the analyzed zircons in the Jijangbong Tuff indicates the presence of foreign zircons derived from protoliths, regarding a wide span of zircon ages from Cretaceous to Jurassic, Triassic, early and late Proterozoic, and Archean. The Archean age suggests the possible presence of the Archean protoliths with such age, which have not been exposed on the surface. The age distribution with wide span suggests that its vent is located in an area that several strata with different ages piled up and intercepted with some intrusives.

Key words: Cheolwon Group, SHRIMP U-Pb age, Rhyolite, Granite porphyry, Jijangbong Tuff, Foreign zircon

*Corresponding author

Tel: 054-820-5469

E-mail: hwangsk@andong.ac.kr

서 언

경기육괴 북서부의 백악기 철원분지는 하부에서 퇴적층이 소규모로 산출되지만 유용한 화석이 산출되지 않는다. 그러나 퇴적층에는 화산암류가 협재하고 상부는 대부분 화산암류로 구성된다. 그래서 이 화산암류는 절대연령 측정법을 적용하여 분출시기를 정량적으로 알아낼 수 있다. 하지만 철원분지에서 화산암류는 염기성에서 산성 조성을 갖는 폭발성 내지 비폭발성 분출로 형성된 다양한 암석들로 구성되기 때문에 대상 암석을 선정할 때 신중을 기해야 한다.

Zr 원소는 지구화학적으로 LIL원소로서 불호정원소(incompatible element)이고 친원소(hygro-magmatic element)로서 마지막까지 마그마에 남기 때문에 저어콘은 후기 분화물에서 주로 산출된다. 따라서 저어콘은 현무암에서 찾기가 매우 어려우며, 폭발성 분출에 의한 용회암으로부터 회수하기도 무척 어렵고 회수한 저어콘도 매우 작고 대부분 파편상을 이룬다. 그러므로 화산암에서 저어콘을 이용하여 분출시기와 관입시기를 한정하는 것은 화성쇄설암보다 용암에서 유리하고 현무암과 안산암보다 유문암에서 더 용이하게 적용될 수 있으며, 이들보다 더 조립질인 관입암에서 더 쉽게 회수할 수 있다. 그렇지만 규모가 큰 화산암체는 앞으로의 적용성을 검토하기 위해서 한번 시도해볼 필요도 있을 것이다.

철원분지에서 백악기 철원층군은 하부에 약간의 화산성 퇴적암이 협재되는 것을 제외하면 대부분 화산암류로 구성된다. 이 철원층군은 중간에 퇴적암과 각력암의 지표쇄설암층이 두 차례 협재되기 때문에 이들을 기준으로 하여, 하부로부터 신흥층, 궁평층, 중리층, 금학산안산암, 동막골용회암, 유문암, 신서각력암, 지장봉용회암 등의 8개 층서단위로 나누어졌다. 백악기 관입암류로는 보장산안산암, 화강반암, 산성암맥 등이 있다.

철원층군의 연대는 기존 연구에 의하면 아마도 백악기 후기에서 제3기 전기에 해당하는 것으로 보고되었다. 궁평층의 상부 현무암(자살바위)의 K-Ar 전암연령은 73.1 ± 1.6 Ma(Lee, 1989)와 94 ± 5 Ma(이윤수 외, 2001)로 보고되었지만 연구자에 따라 관입암으로 취급하기도 하였다(이대성 외, 1983). 금학산안산암의 K-Ar 전암연령은 고문리에서 78.6 ± 2.5 Ma(Lee, 1989)와 동현리에서 89.5 ± 4.7 Ma(이윤수 외, 2001)로 보고되었으며, 산성 화산암류에서 저콘 피선타랙 연

령이 52 ± 2 Ma(김규한 외, 1984)로 측정되었다. 그리고 동막골용회암의 Rb-Sr 동위원소 연령은 103.1 ± 3.2 Ma로 측정되었다(황상구와 류한영, 2011). 한편 철원층군의 화산암류는 전체를 대상으로 한 고지자기 연구를 통해 약 83 Ma에 분출된 것으로 보고되었다(김광호와 송무영, 1995). 그러므로 이 철원층군은 전체적으로 경상분지의 유천층군에 대비시켰다.

이와 같이 철원층군의 화산암류에서 K-Ar 연령과 피선타랙 연령이 측정된 바 있고 고지자기에 의한 연대 추정이 있었지만 고분해능 이차이온 질량분석기(SHRIMP: Sensitive High Resolution Ion Micro Probe)를 이용한 저어콘의 연령측정 같은 보다 정확한 연령측정이 없었다. 그래서 이들 암층 중에 동막골용회암(1개), 유문암(1개), 지장봉용회암(1개), 화강반암(2개)을 선정해서 SHRIMP 저어콘 연령측정을 실시함으로써 이들의 정치시기와 상호 시간적 관계를 확실하게 하고자 한다.

이 연구에서는 이러한 화산암류로부터 분리한 저어콘에 대해 SHRIMP를 이용하여 U-Pb 연령측정을 수행하였다. 이를 통해 구한 연령들로부터 정치시기를 정량적으로 한정하고 층서관계를 검토하였다. 이와 더불어 저어콘 연령분포로부터 분출암에 대해 분출 당시의 화도(conduit) 주변의 벽암(wall rock)들의 연령 분포와 그 의미에 대해서도 알아보았다.

지질개요

경기육괴와 임진강대의 경계부 추가령 지구대 내에는 철원분지가 형성되어 있다. 이 철원분지와 주변의 지질은 크게 선캄브리아기 변성암류, 고생대 연천층군, 중생대 적성층, 중생대 심성암류, 백악기 화산암류, 그리고 제4기의 현무암으로 구성된다(Fig. 1).

철원분지는 동두천단층과 동송단층 사이에서 철원읍 남부에서 전곡읍 북부에 이르는 지역으로서 하부에 약간의 화산성 퇴적암이 협재되지만 대부분 화산암류로 채워져 있다.

철원분지에서 화산암류는 하부에 염기성 화산암류, 중부에 중성과 산성 화산암류, 상부에 산성 화산암류로 구성된다. 염기성 화산암류는 분지 남부에서 측방으로 제한적인 분포를 하며 그 위에 응회질 퇴적암이 국지적으로 놓인다. 중성 화산암류는 분지 북부의 금학산에서 두껍지만 남쪽으로 가면서 점점 얇아지고 산성 화산암류에 의해 덮인다. 산성 화산암류는 지표

쇄설성 각력암(epiclastic breccia)을 사이에 두고 상·하부로 구분된다. 즉 하부 산성 화산암류는 분지 중 남부에 두껍게 분포하고 측방으로 넓게 퍼지며 북쪽으로 가면서 점점 얇아진다. 상부 산성 화산암류는 지장봉, 화인봉과 북대의 능선부에만 소규모로 분포한다.

이 화산암류는 조성 차이가 확실할 뿐만 아니라 중간에 지표쇄설암이 두 차례 협재되기 때문에 이들을 기준으로 하여 7개 암층으로 구분시키고 이 모두를 철원층군이라 하였다(기원서 외, 2008). 이 철원층군은 하부로부터 신흥층, 궁평층, 중리층, 금학산안산암, 동막골응회암, 신서각력암, 지장봉응회암으로 놓인다

(Fig. 1). 궁평층은 현무암을 하부와 상부에 협재하며, 하부 현무암은 이대성 외(1983)에 의해서 장탄리 현무암으로 칭한 바 있지만 기원서 외(2008)에 의해 관입암으로 분류하였다.

관입암류는 화강반암이 있으며 모두 화산암류를 관입하고 이들과 관련되어 있기 때문에 화산암류와 함께 일단 백악기로 간주되었다. 화강반암은 암주로 산출되고 지역에 따라 조성 차이가 약간 있다.

신생대 제4기 현무암은 한탄강을 따라 분포하며 용암대지를 이룬다. 이 용암은 전곡 지역에서 최상위 현무암에 대한 K-Ar 전암연령의 측정결과 0.27 Ma로 확인되었다(Choi, 1982).

Fig. 1. Geological map of the Cheolwon Basin, showing sample locations of the present study together.

분석방법

방법은 먼저 연령측정을 위해 선정된 암석표본으로부터 저어콘을 분리하여 회수하였다. 시료 제조는 암석표본을 부경대 실험실에서 파쇄하여 조분쇄기(Jaw crusher)로 분쇄한 후, 표준 망체를 이용하여 #180~#230에 해당하는 부분을 회수하였다. 회수된 시료는 비커를 이용해 팬닝(panning)하여 중광물을 분리하였다. 분리한 중광물 입자들은 안동대 실험실에서 실체현미경을 이용하여 핀셋으로 비교적 깨끗한 저어콘 입자만을 골라냈다. 선별한 저어콘 입자들은 표준물질과 함께 에폭시로 마운트를 제작하였다. 저어콘 마운트는 입자가 반쯤 드러날 때까지 갈아낸 후 다이아몬드 연마제로 광택이 나도록 연마하였으며, 마지막으로 금으로 코팅하였다.

저어콘 마운트는 한국기초과학지원연구원의 주사전자현미경(JEOL JSM-6610LV 모델)을 이용하여 음극선발광(CL; Cathodoluminescence) 영상과 후방산란전자(BSE; Backscattered Electron) 영상을 얻어 저어콘 내부구조를 관찰하고 분석 위치를 선정하였다. 연령측정은 한국기초과학지원연구원의 SHRIMP II를 이용하여 저어콘의 U-Pb 연령측정을 실시하였다. 이온빔의 직경은 25 μm 이며, 분석절차는 Williams(1998)과 Ireland and Williams(2003)의 방법을 적용하였다. 분석에 사용한 저어콘 표준물질은 FC-1과 SL13이며, 측정된 분석자료는 SQUID 2.5 프로그램(Ludwig,

2008)을 이용하여 처리하였다.

철원분지 화성암류에서 채취한 표본 중에서 저어콘 입자를 15개 이상을 회수한 것만 분석결과를 기재하고 해석하기로 하였다. 저어콘 입자가 15개 이하일 경우에 여러 가지 해석이 수반될 수 있기 때문이다. 따라서 동막골응회암은 다른 표본에 비해 몇 배의 많은 작업을 투입했음에도 불구하고 6개 입자만 회수되었기 때문에 해석에서 제외시켰다.

분석결과

선별한 저어콘 입자들은 모든 시료에서 모두 투명하고 연황색 내지 연녹황색을 띤다. 저어콘 입자들은 대부분 자형의 작은 주상(prismatic) 결정을 이루고 있지만(Fig. 2), 파편상(fragmental)을 이루는 것도 있다. 이에 반해 화강반암 중에서 YC1100의 저어콘 입자들은 대부분 장주상(long prismatic) 결정을 보여주고 YC1200의 것들은 대부분 단주상(short prismatic) 결정을 나타내거나 몽땡한 모양을 보여준다.

저어콘에 대한 SHRIMP U-Pb 분석결과는 대부분 백악기 전기에 밀집되지만 일부는 시생대 말까지 넓은 범위의 연령분포를 보인다(Table 1). 특히 지장봉 응회암 표본에서 회수한 저어콘의 수가 15개임에도 불구하고 백악기 전기를 비롯하여 중생대, 신원생대, 고원생대, 시생대까지 다양한 연령을 나타내는 특징을 보여준다.

Fig. 2. Representative Cathodoluminescence images of the analysed zircons with the spot U-Pb ages from the Rhyolite(A), Jijangbong Tuff(B), Granite porphyry I(C) and II(D).

Table 1. SHRIMP U-Pb zircon data of the igneous rocks in Cheolwon Basin

Spot no.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}^*$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^{**}$ (Ma)
Rhyolite (YC888)										
YC888_1.1	3.21	246	290	1.22	0.074	4.0	0.0366	1.5	112 $\pm$ 2	-
YC888_2.1	20.28	169	227	1.39	0.209	3.0	0.0345	2.0	102 $\pm$ 2	-
YC888_3.1	3.63	140	151	1.11	0.077	5.7	0.0298	4.7	103 $\pm$ 6	-
YC888_4.1	2.43	176	399	2.34	0.068	4.3	0.0371	1.5	110 $\pm$ 2	-
YC888_5.1	16.03	222	437	2.04	0.175	2.6	0.0385	1.4	108 $\pm$ 1	-
YC888_6.1	10.64	663	584	0.91	0.133	2.8	0.0259	4.8	133 $\pm$ 1	-
YC888_7.1	1.86	194	227	1.21	0.063	11.3	0.0329	1.6	108 $\pm$ 1	-
YC888_8.1	6.66	156	142	0.95	0.101	3.8	0.0388	1.7	110 $\pm$ 4	-
YC888_9.1	2.73	138	189	1.41	0.070	5.2	0.0332	1.9	103 $\pm$ 1	-
YC888_10.1	4.78	198	225	1.17	0.086	9.8	0.0188	6.7	111 $\pm$ 2	-
YC888_11.1	1.51	182	246	1.40	0.060	5.2	0.0314	1.8	108 $\pm$ 1	-
YC888_12.1	1.46	219	284	1.34	0.060	4.3	0.0353	1.5	115 $\pm$ 2	-
YC888_13.1	1.43	214	256	1.24	0.060	10.8	0.0375	1.4	113 $\pm$ 1	-
YC888_14.1	1.72	443	594	1.39	0.060	5.6	0.0335	1.2	117 $\pm$ 1	-
YC888_15.1	--	2632	1823	0.72	0.060	1.9	0.0331	1.8	116 0.7	-
YC888_16.1	4.64	200	259	1.34	0.060	10.5	0.0298	1.8	114 $\pm$ 3	-
YC888_17.1	1.07	156	162	1.07	0.060	6.9	0.0292	2.3	108 $\pm$ 2	-
YC888_18.1	1.96	1048	703	0.69	0.060	2.0	0.0358	0.7	114 0.8	-
YC888_19.1	4.28	200	314	1.62	0.060	9.2	0.0282	1.9	123 $\pm$ 3	-
YC888_20.1	4.28	131	308	2.43	0.060	5.0	0.0353	2.0	108 $\pm$ 3	-
YC888_21.1	5.12	2647	2512	0.98	0.060	3.1	0.0368	1.4	115 0.8	-
YC888_22.1	23.03	369	597	1.67	0.060	4.6	0.0283	1.5	110 $\pm$ 2	-
Jijangbong Tuff (YC999)										
YC999_1.1	4.16	4591	6587	1.48	0.082	4.2	0.0432	0.3	123 0.9	-
YC999_2.1	0.11	5299	6250	1.22	0.049	0.8	0.0388	0.3	123 0.7	-
YC999_3.1	0.19	3442	2498	0.75	0.050	1.7	0.0395	0.9	121 0.7	-
YC999_4.1	0.76	395	90	0.23	0.114	0.5	0.5933	0.4	1757 $\pm$ 13	1844 $\pm$ 11
YC999_5.1	0.38	83	56	0.69	0.071	2.1	0.2719	0.9	868 $\pm$ 11	-
YC999_6.1	12.98	628	605	0.99	0.153	2.0	0.0393	1.7	181 $\pm$ 3	-
YC999_7.1	--	166	72	0.45	0.152	2.8	0.9122	0.5	2726 $\pm$ 34	2363 $\pm$ 48
YC999_8.1	0.32	5957	7261	1.26	0.051	0.8	0.0379	0.3	123 0.7	-
YC999_9.1	9.93	2522	1903	0.78	0.127	11.8	0.0363	3.0	113 $\pm$ 3	-
YC999_10.1	6.62	3639	2634	0.75	0.101	2.3	0.0375	1.4	117 $\pm$ 1	-
YC999_11.1	1.03	232	174	0.78	0.059	3.2	0.0564	1.1	216 $\pm$ 2	-
YC999_12.1	7.12	657	424	0.67	0.105	3.1	0.0343	0.9	115 $\pm$ 2	-
YC999_13.1	0.38	161	71	0.45	0.071	1.6	0.2610	0.7	851 $\pm$ 9	-
YC999_14.1	6.53	280	45	0.17	0.159	2.2	0.5461	3.1	1672 $\pm$ 67	2440 $\pm$ 38
YC999_15.1	0.14	573	477	0.86	0.066	0.9	0.2379	0.4	773 $\pm$ 9	-

Errors are 1-sigma; Pb_c indicate the common portions.

*Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age-concordance

**Common Pb corrected using measured ^{204}Pb .

Isotopic ratios and apparent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages > 1,000 Ma were calculated on the basis of ^{204}Pb correction method, but apparent ages < 1,000 Ma were calculated on the basis of ^{207}Pb correction method (Williams, 1998).

Table 1. Continued

Spot no.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}^*$ (Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^{**}$ (Ma)
Granite porphyry I (YC1100)										
YC1100_1.1	2.13	144	195	1.39	0.065	4.7	0.0336	1.7	104 $\pm$ 1	-
YC1100_2.1	5.29	195	237	1.26	0.090	3.5	0.0341	1.5	114 $\pm$ 2	-
YC1100_3.1	28.89	304	800	2.72	0.278	7.4	0.0277	7.5	109 $\pm$ 4	-
YC1100_4.1	11.39	259	357	1.42	0.139	2.6	0.0365	1.3	108 $\pm$ 2	-
YC1100_5.1	1.92	188	176	0.97	0.063	11.3	0.0334	1.5	109 $\pm$ 2	-
YC1100_6.1	2.60	240	256	1.10	0.069	3.6	0.0346	1.3	112 $\pm$ 3	-
YC1100_7.1	0.77	139	167	1.24	0.054	11.8	0.0365	1.7	115 $\pm$ 3	-
YC1100_8.1	8.66	205	382	1.92	0.117	10.4	0.0385	2.5	112 $\pm$ 2	-
YC1100_9.1	2.72	112	136	1.25	0.070	13.0	0.0333	2.0	109 $\pm$ 3	-
YC1100_10.1	0.76	242	317	1.35	0.054	4.3	0.0325	1.4	111 $\pm$ 1	-
YC1100_11.1	1.95	154	263	1.77	0.064	8.5	0.0361	1.6	111 $\pm$ 1	-
YC1100_12.1	1.51	171	213	1.29	0.060	4.5	0.0352	1.5	114 $\pm$ 1	-
YC1100_13.1	13.36	240	302	1.30	0.154	7.9	0.0388	1.3	113 $\pm$ 3	-
YC1100_14.1	6.05	139	199	1.48	0.096	4.2	0.0341	1.8	114 $\pm$ 2	-
YC1100_15.1	1.22	329	321	1.01	0.058	3.3	0.0353	1.1	110 $\pm$ 2	-
YC1100_16.1	10.12	217	472	2.25	0.129	3.0	0.0388	1.4	113 $\pm$ 2	-
YC1100_17.1	16.88	225	305	1.40	0.182	11.4	0.0415	2.2	110 $\pm$ 4	-
YC1100_18.1	0.95	392	642	1.69	0.056	3.3	0.0335	2.1	110 $\pm$ 1	-
YC1100_19.1	3.38	147	222	1.56	0.075	9.5	0.0356	2.0	110 $\pm$ 2	-
YC1100_20.1	2.07	170	226	1.37	0.065	4.8	0.0314	1.7	104 $\pm$ 1	-
Granite porphyry II (YC1200)										
YC1200_1.1	9.48	267	250	0.97	0.124	2.6	0.0401	1.2	112 $\pm$ 2	-
YC1200_2.1	2.32	151	124	0.85	0.067	4.7	0.0347	1.7	106 $\pm$ 1	-
YC1200_3.1	0.30	1504	1626	1.12	0.051	1.6	0.0366	0.5	114 0.9	-
YC1200_4.1	0.59	695	609	0.90	0.053	2.5	0.0337	0.8	110 $\pm$ 1	-
YC1200_5.1	1.43	163	192	1.22	0.060	8.2	0.0344	1.6	109 $\pm$ 2	-
YC1200_6.1	1.27	691	424	0.63	0.058	3.8	0.0341	0.8	109 0.8	-
YC1200_7.1	2.51	283	300	1.10	0.068	4.7	0.0262	1.7	111 $\pm$ 2	-
YC1200_8.1	1.33	241	244	1.05	0.059	9.2	0.0338	1.3	109 $\pm$ 1	-
YC1200_9.1	0.11	1690	1290	0.79	0.049	3.4	0.0331	1.0	111 1.0	-
YC1200_10.1	2.71	143	140	1.01	0.070	8.3	0.0343	1.7	110 $\pm$ 2	-
YC1200_11.1	1.86	296	238	0.83	0.063	3.6	0.0329	1.3	106 $\pm$ 1	-
YC1200_12.1	0.49	2443	2413	1.02	0.052	1.3	0.0371	0.4	115 0.8	-
YC1200_13.1	1.26	179	161	0.93	0.058	5.4	0.0322	1.6	110 $\pm$ 1	-
YC1200_14.1	14.61	174	145	0.86	0.164	4.0	0.0257	3.9	102 $\pm$ 2	-
YC1200_15.1	0.26	1261	743	0.61	0.050	1.9	0.0333	0.6	110 0.7	-
YC1200_16.1	1.65	186	170	0.95	0.061	4.6	0.0338	1.6	108 $\pm$ 1	-
YC1200_17.1	79.14	234	150	0.67	0.677	1.3	0.0792	1.1	100.0 $\pm$ 5	-
YC1200_18.1	1.83	182	142	0.80	0.063	4.7	0.0325	1.6	106 $\pm$ 1	-
YC1200_19.1	3.97	1633	927	0.59	0.080	1.5	0.0316	0.6	113 $\pm$ 1	-
YC1200_20.1	32.77	107	130	1.25	0.308	2.9	0.0416	1.9	99.6 $\pm$ 2	-

Errors are 1-sigma; Pb_c indicate the common portions.

*Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age-concordance

**Common Pb corrected using measured ^{204}Pb .

Isotopic ratios and apparent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages > 1,000 Ma were calculated on the basis of ^{204}Pb correction method, but apparent ages < 1,000 Ma were calculated on the basis of ^{207}Pb correction method (Williams, 1998).

표품 YC888은 환상암맥에서 채취한 유문암이다. 이 표품의 저어콘들은 22개 입자에서 각 1점씩을 분석하였는데 102 Ma에서 133 Ma까지 비교적 좁은 분포를 보인다(Table 1). 이 분석치들은 일치곡선상에 놓이거나 가까운 위치에 놓이지만 다소 분산되어 있으므로 의미있는 연령을 얻을 수 없었다. 그래서 이 중에서 10개를 추려내어 ^{207}Pb 에 보정해 통계적으로 계산하여 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연령으로 115.0 ± 1.1 Ma를 얻었다(Fig. 3A). 가중평균시 분석결과의 취사여부

Fig. 3. Concordia diagrams for SHRIMP zircon U-Pb analyses. (A) Tera-Wasserburg plots for zircons separated from the Rhyolite (YC888); Calculation of weighted mean ages included only spot analyses in red eclipses, not in blue ones. (B) Tera-Wasserburg plots for the zircons analyzed from the Jijangbong Tuff (YC999).

는 통계적 처리(t test)를 수행한 결과와 보통납의 함량, 분석오류 여부 등을 바탕으로 수행하였다. 이들로 부터 측정된 115.0 ± 1.1 Ma 연령은 철원분지에서 칼데라 함몰 직후에 수반되는 환상암맥의 정치시기를 나타내는 것으로 해석된다.

표품 YC999는 지장봉응회암의 하부에서 채취한 회류응회암이다. 이 표품의 저어콘들은 15개 입자에서 각 1점씩을 분석하였는데 2440 Ma에서 113 Ma까지 다양한 연령이 분포한다(Table 1). 이 분석치들은 일치곡선상 또는 매우 가까운 위치에 놓이지만 분산되기 때문에 의미있는 연령을 얻기란 곤란하였다(Fig. 3B). 하지만 가장 젊은 연령이 113 ± 3 Ma인데 이 연령이 아마도 칼데라 함몰 후의 응회암 분출시기를 암시하는 것으로 해석된다. 그리고 중요한 점은 이 표품이 폭발성 분출에 의한 것이기 때문에 화도의 벽암으로부터 다양한 연령을 가진 외래 저어콘(foreign zircon)들이 포함되었다는 것이다. 즉 고원생대 연령(1844 Ma, 2363 Ma)이 있는가하면 시생대 연령(2440 Ma)도 있고 신원생대 연령(868 Ma, 851 Ma, 773 Ma)이 폭넓게 있다(Table 1). 중생대 연령으로서 트라이아스기 연령(216 Ma)이 있고 주라기 연령(181 Ma)이 존재한다, 따라서 이 응회암을 분출시킨 화도 주변은 층서적으로 여러 시대의 지층이 겹치는 매우 복잡한 지역일 것으로 해석된다.

표품 YC1100은 동막골응회암을 관입한 작은 암주에서 채취한 화강반암이다. 이 표품의 저어콘들은 대부분 장주상을 나타내며 20개 입자에서 각 1점씩을 분석하였는데 다소 불일치 연령을 나타낸다(Table 1). 분석치들은 군집에서 벗어난 3개를 제외하고 17점을 ^{207}Pb 에 보정해 통계적으로 계산하면 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연령은 111.24 ± 0.85 Ma를 나타낸다(Fig. 4A). 이 연령은 철원분지에서 화산작용(volcanism)이 끝나면서 심성작용(plutonism)으로 전환되었던 시기를 암시한다.

표품 YC1200은 신서각력암을 관입한 작은 암주에서 채취한 화강반암이다. 이 표품의 저어콘들은 대부분 단주상을 나타내며 20개 입자에서 각 1점씩을 분석하였는데 약간의 불일치 연령을 나타낸다(Table 1). 분석치들은 불일치도가 큰 5개를 제외하고 15점을 ^{207}Pb 에 보정해 통계적으로 계산하면 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 가중평균연령은 109.1 ± 1.1 Ma를 나타낸다(Fig. 4B). 이 연령은 철원분지에서 심성작용이 끝나면서 마지막 관입시기를 의미한다.

Fig. 4. Concordia diagrams for SHRIMP zircon U-Pb analyses from the Granite porphyry. (A) Tera-Wasserburg plots for zircons separated from Granite porphyry I (YC1100). Calculation of weighted mean ages included only spot analyses in red ellipses, not in blue ones. (B) Tera-Wasserburg plots for zircons separated from Granite porphyry II (YC1200).

토 의

이 연구는 철원분지 화성암류의 활동시기를 검증해 보기 위하여 시작되었기 때문에 화성활동 시기에 대하여 먼저 토의하고, 그 다음에 화성쇄설물을 공급한 화도 주변의 근원암들에 대한 연령을 논의하기로 한다.

화산작용 시기

철원분지 환상암맥의 유문암에서 회수한 저어콘들

로부터 구한 연령 115.0 ± 1.1 Ma는 철원분지에서 화산 작용 중에 발생한 칼데라의 함몰시기를 가리키는 것으로 해석된다. 왜냐하면 철원분지에서 유문암은 환상암맥을 이루고 있고 이 암맥은 큰 용적의 동막골응회암을 분출한 후에 일어난 칼데라 함몰을 따라 관입한 산물이기 때문이다. 그러므로 이 유문암의 연령은 동막골응회암을 구성하는 회류응회암 분출의 마지막 절정기로 볼 수도 있다. 흔히 규장질 화산작용에서는 회류응회암이 짧은 기간에 용적 1 km^3 이상의 큰 규모로 분출된 후에 칼데라 함몰을 동반하기 때문이다 (황상구와 김상욱, 1990). 실제로 동막골응회암은 두께가 450 m 정도이고 대부분 용결되어 있을 정도로 상당히 큰 규모의 용적을 나타낸다(기원서 외, 2008).

철원분지에서 화산작용의 시작은 궁평층에 협재되어 있는 현무암이 그 열쇠를 가지고 있다. 이 현무암은 저어콘을 회수할 수 없기 때문에 SHRIMP에 의한 저어콘 연령측정을 수행할 수 없었다. 그러나 이 현무암은 K-Ar 전암연령이 측정된 바 있지만 유문암의 115.0 ± 1.1 Ma 연령보다 오래되지 않고 훨씬 젊기 때문에 여기서 논의하기에 무리가 있다.

그러면 철원분지에서 화산작용의 종말은 칼데라를 채운 신서각력암 위를 덮은 지장봉응회암에서 찾아야 한다. 따라서 이 지장봉응회암의 회류응회암에서 회수한 저어콘들은 2440 Ma에서 113 Ma까지 매우 다양한 연령을 나타낸다. 그러나 이 연령분포 가운데 가장 젊은 113 ± 3 Ma 연령은, 오차가 비교적 크다고 볼 수 있지만, 아마도 칼데라 함몰 후의 응회암 분출시기를 암시하는 것으로 해석할 수도 있다. 그러므로 이 연령이 아마도 철원분지에서 화산작용이 끝나는 잠정적 시기를 가리키는 것으로 보인다.

이 연구에서 측정한 지장봉응회암의 저어콘 최소연령은 유문암의 저어콘 연령과도 오차범위 내에서 서로 중첩된다. 지장봉응회암 표품이 채취된 위치가 지장봉응회암의 하부인 것을 감안하고 동막골응회암이 분출한 직후에 유문암이 관입했다는 것을 고려하면 양 응회암층 사이의 신서각력암이 수백만년 이내의 아주 짧은 기간에 매우 두껍게 쌓였다는 것을 가리킨다. 이러한 해석은 칼데라 퇴적층으로 구성된 신서각력암이 매우 짧은 기간에도 불구하고 매우 두껍게 집적될 수 있었음을 나타낸다.

위에서 구한 철원분지 화산암류의 최소연령은 지장봉응회암에서 113 Ma이고 유문암에서 115.0 ± 1.1 Ma 이므로 Gradstein et al.(2004)의 지질연대표와 비교해

보면 압티안(Aptian) ($125.0 \pm 1.0 \sim 112.0 \pm 1.0$ Ma) 후기에 대비된다. 그런데 철원층군은 암층 구성원에 의하여 경상분지의 유천층군에 대비하였지만(기원서 외, 2008), 위의 연령측정 자료에 따르면 적어도 경상분지 신동층군에 대비해야만 되기 때문에 일반적인 기대와는 크게 상충되는 결과를 나타낸다. 왜냐하면 신동층군 낙동층, 하산동층, 진주층은 LA-ICPMS U-Pb 저어콘으로부터 각각 118 Ma, 111 Ma, 106 Ma의 최소연령이 측정되었으며(Lee et al., 2008), 한편 신동층군 진주층은 최하부 역질사암의 저어콘들로부터 112.4 ± 1.3 Ma의 최소연령이 나왔으며 이를 진주층의 최고 퇴적연령으로 해석하기 때문이다(이태호 외, 2010).

이러한 층서대비 결과는 신동층군에서 유문암질에 해당하는 광역 강하회층(ash-fall bed)이 협재될 수 있다는 것을 부인할 수 없을 것이다. 철원층군에서의 동막골응회암과 지장봉응회암은 광역적으로 공급될 수 있는 강하응회암층이 여러 차례 협재되어 있고(기원서 외, 2008; 황상구와 김재호, 2010) 여기서부터 경상분지까지 직선거리는 약 250-350 km 정도 떨어져 있어 그렇게 멀지 않기 때문이다.

철원분지에서 심성작용은 화산작용이 끝나면서 111.24 ± 0.85 Ma 시기에 전환되었던 것으로 판단된다. 그리고 이 심성작용은 아마도 109.1 ± 1.1 Ma 시기에 마지막 관입을 하면서 끝난 것으로 보인다. 두 연령을 제공한 표본의 채취위치가 남북으로 멀리 떨어져 있기 때문에(Fig. 1) 공간적으로 생각하면 심성작용은 전체적으로 아마도 남쪽 부분에서 먼저 일어났고 점차 북쪽으로 진행되었던 것으로 짐작된다.

그러나 이 분석자료는 이것만으로 화산작용과 심성작용의 여러 단계를 정확히 해석할 수 없으며, 각 암층들의 분출시기와 관입시기를 단정하기에는 부족한 면이 상당히 있기 때문에 암층별로 보다 정밀한 연령을 구하기 위해 앞으로 추가적인 작업이 요구된다.

외래 저어콘의 근원암

지장봉응회암에서 회수한 저어콘 연령들은 응회암의 공급지인 화도를 지나는 당시 암층들의 연령분포를 알게 해준다. 현재 철원분지 주변에 노출되어있는 암층들을 고려해 보면 선백악기 암층들은 선캄브리아기 변성암류, 고생대 연천층군, 중생대 적성층, 중생대 심성암류까지가 대부분이라고 할 수 있다.

선캄브리아기 변성암류는 장락층군과 심성암류로

구성된다. 장락층군은 주로 편암으로 구성되고 규암과 대리암을 협재한다. 흑운모 편암에서 회수한 쇄설성 저어콘을 측정한 SHRIMP U-Pb 연령은 1928 ± 220 Ma로 고원생대에 속한다(기원서 외, 2008).

선캄브리아기 심성암류는 고남산각섬암, 감악산변성섬암, 화강편마암 등이 포함된다. 고남산 각섬암은 본역 동부 고남산을 중심으로 노출되며 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령이 861 ± 7.3 Ma로서 신원생대에 속한다(Cho et al., 2001). 감악산변성섬암은 본역 남동부에서 산출되며 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령이 742 ± 13 Ma로서 역시 신원생대에 속한다(Lee et al., 2003). 화강편마암은 본역 남서부에 노출되며 730 ± 19.6 Ma로서 역시 신원생대에 속한다(기원서 외, 2008).

고생대 연천층군은 미산층, 대광리층과 천덕산층으로 구성된다. 미산층의 석류석 편암과 변성사질암에서 회수한 쇄설성 저어콘의 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 각각 447-397 Ma와 440-390 Ma로 측정되어(Cho et al., 2001; 조동룡, 2007) 연천층군의 퇴적시기가 적어도 390 Ma 이후일 것으로 해석된다.

중생대 적성층은 본역 중남부에 분포하며 김포층군에 속하고 식물화석에 의해 트라이아스기 후기에서 쥐라기 전기에 온난한 열대 내지 아열대의 호소환경에서 퇴적되었다고 보고된 바 있다(전희영 외, 1988; 유강민 외, 1992).

중생대 심성암류는 본역 남동부의 쥐라기 흑운모 화강암과 북동부의 명성산화강암의 두 화강암체로 노출된다. 그 중에 남동부의 쥐라기 흑운모 화강암은 포천도폭에서 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령측정 결과에 의해 184 ± 1.5 Ma로서 쥐라기 암체로 밝혀졌다(기원서 외, 2005). 북동부의 명성산화강암은 기존에 대보화강암으로 생각되었지만 지포리도폭에서 SHRIMP 저어콘 연령측정 결과로 112 ± 2 Ma로서 백악기 초엽 암체로 밝혀졌다(황재하와 김유홍, 2007).

특히 지장봉응회암의 회류응회암에서 회수한 저어콘들은 2440 Ma에서 113 Ma까지 매우 다양한 연령 분포를 나타낸다. 그런데 지장봉응회암에서 외래 저어콘의 연령분포는 철원분지 주변의 지표지질과 대체로 일치하는 양상을 보여주며 일부는 그렇지 않다. 즉 고원생대 연령(1844 Ma)은 장락층군(약 19억년)에 거의 접근하고, 시생대 내지 고원생대 연령(2440 Ma, 2363 Ma)은 철원분지 주변에는 노출되지 않는다. 비록 이 연령의 암석들이 지표에는 노출되지 않을지라도 장락층군 아래에는 이러한 연령의 암체가 존재한다는 것

을 암시한다. 또한 신원생대 연령(868 Ma, 851 Ma, 773 Ma)은 고남산각섬암(861 ± 7.3 Ma)에 대비되며, 트라이아스기 연령(216 Ma)은 아마도 적성층(트라이아스기 후기-จู라기 전기)에 대비되고,จู라기 연령(181 Ma)은จู라기 흑운모 화강암(184 ± 1.5 Ma)에 거의 접근된다.

지장봉응회암에서 채취한 표품은 폭발성 분출에 의한 것이기 때문에 화도의 벽암으로부터 다양한 연령을 가진 외래 저어콘들이 포함될 수 있다. 지장봉응회암에 포함된 암편은 안산암, 퇴적암, 편암, 용결응회암으로 구성되고(기원서 외, 2008) 실제로 매우 다양한 종류를 가진다. 그리고 부석들이 청회색을 나타내고 부분적으로 용결되어 있는 모습이다. 따라서 이 응회암에서 회수한 저어콘들은 마그마에서 유래된 본질편(essential fragment)과 함께 외래에서 유래된 이질편(accidental fragment), 유질편(accessory fragment)에서 분리한 것으로 추정할 수 있다. 암편들은 지표에 노출되어 있던 기존의 암석들도 일부 포함될 수도 있겠지만 대부분 화도벽에서 기존 암층으로부터 뜯겨져 나온 것이다. 그러므로 지장봉응회암의 저어콘들이 나타내는 다양한 연령 분포는 화도벽에서의 다양한 기존 암층에 기인하는 것으로 생각된다.

그러므로 이 응회암을 분출시킨 화도는 연령 분포가 수직으로 다양한 지층으로 되어 있고 수평으로도 이질적인 화성암이 존재하는 암석분포를 나타낸다. 다시 말하면 화도 주변은 층서적으로 여러 연대의 지층이 겹치고 관입암이 교차하는 지역일 것으로 해석된다.

그리고 화성쇄설암에서 저어콘들로부터 연령을 측정하여 분석한다면 화성쇄설물을 분출시킨 화구(vent)의 위치를 찾는 데 이용할 수 있고, 분출당시의 화성쇄설물의 근원지에 대한 보다 유용한 정보를 구할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 지하의 암석분포와 층서를 알아내고 지표와 전혀 다른 지질시대의 암층을 찾아낼 수도 있을 것으로 생각된다. 앞으로 이를 위해서 화성쇄설암에서 외래 저어콘의 연령분포에 대한 연구를 진행할 필요가 있다고 생각된다.

결 론

경기육괴 북서부의 임진강대와 경계부에는 철원분지가 놓이는데 철원분지 화성암류에 대해 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령측정을 수행하였다.

철원분지 화성암류에서 회수한 저어콘으로부터 분석된 SHRIMP U-Pb 연령은 유문암이 115.0 ± 1.1 Ma, 화강반암이 111.24 ± 0.85 Ma와 109.1 ± 1.1 Ma의 평균연령을 보여준다. 그리고 지장봉응회암의 최소연령은 113 Ma를 보여준다. 유문암의 연령은 동막골응회암의 분출 직후에 칼데라 함몰을 지시하는 환상암맥의 관입시기를 한정하고 지장봉응회암의 최소연령은 아마도 철원분지에서 마지막 화산작용을 의미하는 것으로 해석된다. 따라서 철원분지의 화산암류는 압티안 후기에 분출되었으며 철원층군은 경상분지 신동층군에 대비되는 것으로 해석된다. 그리고 심성작용은 화산작용이 끝나면서 111.24 ± 0.85 Ma ~ 109.1 ± 1.1 Ma 시기에 일어난 것으로 해석된다.

지장봉응회암의 외래 저어콘들로부터 측정한 연령 분포는 철원분지 주변의 백악기,จู라기, 트라이아스기, 신원생대와 고원생대 암층의 시기와 일치되거나 유사한 연령이 포함되어 있다. 그러나 주변에서 노출되지 않는 시생대 연령도 포함되어 있는데 이 연령은 아마도 지하에 시생대 암층이 존재함을 암시해준다. 이와 같이 다양한 연령분포에 따르면 지장봉응회암이 분출한 화구는 연대가 다른 여러 암층이 층서적으로 겹치고 관입암이 교차하는 지역에 위치하는 것으로 해석된다.

하지만 각 암층의 정확한 화산작용 시기와 기간을 구하고 화구의 위치와 지하 암층의 층서를 밝히기 위해 앞으로 더 많은 SHRIMP 저어콘 연령측정 작업이 필요하다고 생각된다.

사 사

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 일반연구자지원사업(과제번호 2010-0009118)의 지원으로 수행된 연구이다. 저어콘 분리에 협조해 준 부경대 박계현 교수님과 SHRIMP U-Pb 분석에 도움을 준 한국기초과학지원연구원 관계자분께도 감사를 드린다. 심사과정을 통하여 논문의 질을 향상시켜준 부경대 송용선 교수님과 서울대 조문섭 교수님께도 사의를 표한다.

참고문헌

기원서, 임순복, 김현철, 황상구, 김복철, 송교영, 김유홍, 2008, 연천도폭 지질조사 보고서. 한국지질자원연구원, 83p.

- 기원서, 조등룡, 김복철, 진광민, 2005, 포천도폭 지질조사 보고서. 한국지질자원연구원, 69p.
- 김광호, 송무영, 1995, 한반도 중서부 지각구조와 물성 연구: 전곡-연천 일대에 분포하는 백악기 화산암류의 고지자기. 지구과학회지, 16, 65-73.
- 김규한, 김옥준, 민경덕, 이윤수, 1984, 추가령 지구대의 지질구조, 고지자기 및 암석학적 연구. 광산지질, 17, 215-230.
- 유강민, 권영인, 전희영, 1992, 연천지역에 분포하는 대동층군의 층서와 사암의 광물조성. 지질학회지, 28, 152-166.
- 이대성, 유기주, 김광호, 1983, 추가령 열곡의 지구조적 해석. 지질학회지, 19, 19-38.
- 이윤수, 민경덕, 황재하, 2001, 고지자기학적 관점에서 본 추가령단층곡의 생성과 진화. 자원환경지질, 34, 555-571.
- 이태호, 박계현, 천종화, 이기욱, 2010, 경상분지 진주층 및 신라역암의 SHRIMP U-Pb 연령분포 및 그 의미. 암석학회지, 19, 89-101.
- 전희영, 봉필운, 이호영, 최성자, 김복철, 권영인, 1988, 경기탄전지역 함탄퇴적분지의 생층서 연구. KR-88-1A, 한국동력자원연구소, 44p.
- 조등룡, 2007, 임진강대의 연대층서. In: 기원서 외(Eds.) 동북아 지각의 지체구조적 대비 및 지질정보 구축. GP2007-00402007(1), 한국지질자원연구원, 63-78.
- 황상구, 김상욱, 1990, 밀양·양산 간의 칼데라를 동반한 규질 화용회암. 지질학회지, 26, 329-340.
- 황상구, 김재호, 2010, 철원분지 동막골응회암의 유황과 공급. 암석학회지, 19, 51-65.
- 황상구, 류한영, 2011, 철원분지 백악기 화쇄류암의 화산과정: 동막골응회암의 마그마 과정. 지질학회지, 47, 647-664.
- 황재하, 김유홍, 2007, 지포리도폭 지질조사보고서. 한국지질자원연구원. 54p.
- Choi, M.C., 1982, Report of the Third Excavation in Cheonkok Palaeolithic Site. J. of Liberal of art, 14, Konkuk Univ.
- Cho, D.-L., Kwon, S.-T., Jeon, E.-Y. and Armstrong, R., 2001, SHRIMP U-Pb zircon geochronology of an amphibolite and a paragneiss from the Samgot unit, Yeoncheon Complex in the Imjingang belt, Korea: Tectonic implication. Abstracts at the 56th Annual Meeting of Geol. Soc. Korea, p.89.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., Bleeker, W., and Lourens, L.J., 2004, A new Geologic Time Scale, with special reference to Precambrian and Neogene. Episodes, 27, 83-100.
- Ireland, T.R. and Williams, I.S., 2003, Considerations in zircon geochronology by SIMS. In: Hanchar, J.M. and Hoskin, P.W.O. (eds.), Zircon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineral. Soc. Am., 53, 215-241.
- Lee, J.S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic volcanics of Seoul, Korea: Geodynamic implication on the east Eurasian margin. Ph.D. dissertation, Orleans Univ., 349p.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H., Wingate, M.D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. Precambrian Research, 122, 297-310. et al., 2003.
- Lee, Y.-I., Choi, T.-J., Lim, H.-S., Orihashi, Y.J., 2008, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, SE Korea: Implications for a new view on the depositional age and provenance. Annual Meeting of the Geol. Soc. Korea, Abstract Volume, 25.
- Ludwig, K.R., 2008, SQUID 2: A User's Manual. Berkeley, CA, Berkeley Geochronology Center Special Publication, No 2, 100p.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben, M.A., Shanks, W.C.P., and Ridley, W.I. (eds.), Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology, 7, Society of Economic Geologists, 1-35.

2011년 12월 14일 접수

2011년 12월 15일 심사개시

2011년 12월 24일 채택