

옥천변성대 규장질 변성응회암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대: 신원생대(약 7.5억년전) 화산활동

조문섭^{1*} · 김태훈² · 김현철¹

¹서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부, ²동경대학교 지진연구소

SHRIMP U-Pb Zircon Age of a Felsic Meta-tuff in the Ogcheon Metamorphic Belt, Korea: Neoproterozoic (ca. 750 Ma) Volcanism

Moonsup Cho^{1*}, Taehoon Kim² and Hyeoncheol Kim¹

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

²Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 111-0032, Japan

요약: 옥천변성대의 소위 문주리층에 분포하는 규장질 변성응회암의 U-Pb 저어콘 연대를 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)를 사용해 측정하였다. 10개의 저어콘 입자로부터 얻어진 13개의 점분석 자료는 대부분 일치연선성(concordia) 상에 찍히며, 이들로부터 구한 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 가중평균연대는 747±7 Ma이다. 이 연대는 Lee *et al.*(1998)이 전통적 방법으로 구한 U-Pb 저어콘 연대(756±1 Ma)보다 약간 젊지만 두 연대측정 결과 모두 약 7.5억년 전 쌍모식 화산활동과 함께 대륙내 분지가 옥천대에서 발달하였음을 지지한다.

핵심어: 옥천대, 문주리층, 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP), 저어콘, 신원생대

Abstract: Using a SHRIMP ion microprobe, we have dated zircon grains of a felsic meta-tuff from the so-called Munjuri Formation, Ogcheon metamorphic belt. The weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U zircon ages obtained from 13 spot analyses of 10 grains provide an essentially concordant age of 747±7 Ma. This result corroborates the conventional U-Pb zircon age (756±1 Ma; Lee *et al.*, 1998) for the Neoproterozoic bimodal volcanism in the Ogcheon belt. Thus, proto-basins associated with intracontinental, high-volcanicity rift in the Ogcheon belt are most likely to have formed at ca. 750 Ma.

Key words: Ogcheon belt, Munjuri Formation, SHRIMP ion microprobe, zircon, Neoproterozoic

서론

한반도의 중남부를 북동-남서 방향으로 가르는 옥천대는 우리나라의 대표적인 조산대로서 태백산분지와 옥천변성대로 나뉘어진다. 전자는 주로 퇴적암 또는 저온변성암으로 이루어지나, 후자는 녹색편암 또는 각섬암상의 변성암으로 구성된다. 옥천대의 생성 및 진화 과정에 대해서는 그동안 많은 연구자들에 의해 다양하게 연구되어 왔다(예, Chough *et al.*, 2000; 조문섭과 김현철, 2002). 특히 중국에서 친링-다비-수루(Qinling-Dabie-Sulu) 대륙충돌대가 보고된 이래 옥천변성대의 대륙 관계에 대한 논의는 국내외적으로 많은 관심을

불러 일으켰다. 하지만 조문섭과 김현철(2002)에 의해 정리된 바와 같이, 옥천변성대의 지각진화에 관한 지체구조 모델은 아직 정립되지 못하고 있다. 이는 무엇보다도 다변성-변형작용의 영향으로 인해 믿을만한 절대연령 자료를 얻기가 어려운데 기인한다.

옥천변성대의 변성암류를 대상으로 폐쇄온도가 높은 동위원소계를 사용한 연대측정 연구는 비교적 최근에야 수행되었으며, 예외적으로 잘 정의된 U-Pb 저어콘 연대가 Lee *et al.*(1998)과 박종길 외(2003)에 의해 제공된 바 있다. Lee *et al.*(1998)이 보고한 소위 문주리층 내 규장질 변성화산암의 U-Pb 저어콘 연대는 옥천변성대의 초기 진화사에 대해 중요한 정보를 제공한

*Corresponding author: Tel: 82-2-880-6732, E-mail: moonsup@snu.ac.kr

다. 이들은 전통적인 동위원소 희석-열이온화 질량분석기(ID-TIMS)를 사용해 옥천변성대의 쌍모식(bimodal) 화산활동이 756±1 Ma에 일어났음을 보고하였다. 이 신원생대 화산활동은 대륙내 열개 기원으로서, 특히 로디니아(Rodinia) 초대륙의 분열에 수반되어 남중국지대에서 광역적으로 일어난 화성활동과 연계될 수 있기 때문에 지체구조적으로 중요한 의미를 지닌다(조문섭과 김현철, 2002). 한편 박종길 외(2003)는 계명산층의 규장질 변성용회암으로부터 분리한 저어콘을 대상으로 국내 최초로 고분해능 이차이온질량분석기(SHRIMP)를 사용한 U-Pb 연대(2686±11 Ma)를 발표하였다. 이 시생대 연대는 화성기원의 진동누대구조(oscillatory zoning)를 보이는 5개 저어콘 입자로부터 얻어졌으며, 박종길 외(2003)는 계명산층이 약 27억년전 분출한 옥천변성대의 기반암으로 다른 경기육괴의 편암암류와 달리 부분용융이나 고온변성작용을 받지 않았다고 해석하였다. 만약 이러한 해석이 사실이라면, 옥천변성대의 진화과정에 대한 기존 모델은 크게 수정되어야 할 것이다.

이 연구는 옥천변성대의 지각진화사를 규명하는데 중요한 U-Pb 저어콘 연대를 얻고자 SHRIMP 연대측정법을 사용하였다. 연구 대상 시료는 Lee *et al.*(1998)이 756±1 Ma의 저어콘 연대를 보고한 문주리층 내 규장질 변성화산암과 비슷한 위치에서 채집되었으며, ID-TIMS와 SHRIMP 연대측정 방법으로 얻은 결과들을 직접 비교할 수 있는 기회를 제공한다. 참고로 소위 계명산층과 문주리층이란 용어는 층서학적 개념에 근거한 퇴적층명으로 각섬암상의 변성작용과 연성변형작용을 받은 연구지역의 경우 적용이 불가능하다(조문섭과 김현철, 2002). 더구나 계명산층과 문주리층의 주된 구성암이 변성퇴적암이라는 충주도폭(김기완과 이홍규, 1965)의 설명은 수정되어야 한다. 따라서 옥천변성대의 층명에 대한 전면적인 개정작업이 필요하며, 이 연구에서 편의상 사용된 소위 계명산층과 문주리층이란 명칭은 유보적으로 받아들여져야 한다.

연대 측정

분석 시료

SHRIMP 연대측정에 사용한 한개 시료(C9)는 충주시 남쪽 팔봉 부근의 채석장에서 채집한 규장질 변성화산암이다(N36°53'35.7", E127°56'10.7"; Fig. 1). 이 채석장에는 문주리층을 구성하는 전형적인 규장질 변성화산암이 산출하며, 이들과 동일한 양질의 노두가 팔봉과 칼바위를 중심으로 부근의 426번 지방도를 따라

넓게 분포한다. 화쇄류나 용암류 기원으로 보이는 규장질 변성화산암이 대부분이지만, 충상 각섬암이 드물게 산출하여 전형적인 다화산작용 열개(high-volcanicity rift) 기원임을 시사한다(조문섭과 김현철, 2002). 각섬암은 두 종류로, 엽리를 잘 보이는 편암질 각섬암과 행인 조직을 보이는 비교적 괴상의 각섬암들이 관찰된다(Cho *et al.*, 1994). 이 두 암상은 전형적인 쌍모식 성분 분포를 보여주며(Lee *et al.*, 1998), 남동쪽으로 향하는 대규모의 습곡구조를 비롯해 전체적으로 동일한 구조지질학적 특성을 지닌다.

분석 시료는 채석장의 입구에서 보아 오른쪽에 노출된 변성용회암으로서 다른 변성화산암류에 비해 거정의 정상석 반정을 포함하며 부분적으로 강한 변형작용을 받았다. 주구성광물은 석영, 정상석, 백운모, 티탄철석 등이며, 티타나이트(스펜), 저어콘, 흑운모가 소량 산출한다. 각섬암은 물론이고 일부 규장질 변성화산암류 중에는 각섬석과 녹립석이 흔히 관찰되며, 이러한 광물들의 산출은 각섬암상의 변성조건을 지시한다. 분석시료 주변의 변성퇴적암에서 석류석-흑운모 지온계를 사용해 구한 온도는 약 540°C이다(Min and Cho, 1998). 각섬암의 굳입연대는 아직 정확히 밝혀지지 않았기 때문에, 쌍모식 화성활동에 대한 해석은 주의가 필요하다. 하지만, 연구지역의 규장질 변성화산암과 각섬암 모두 동일한 변형-변성사를 지니는 물론이고, 드물기는 하지만 야외에서 서로 협재되므로 동원마그마의 산물로 해석하는데 무리가 없다.

분석 방법

연대측정용 저어콘을 분리하기 위해 약 2-3 kg의 변성화산암 시료(C9)를 소형 조분쇄기(jaw crusher)로 깨뜨려 작은 알갱이와 분말로 만들었다. 이들을 70메쉬(약 212 μm) 체로 체질한 후 팬닝(panning)을 통한 수작업으로 저어콘을 분리하였다(조동룡, 2004). 상당한 양의 저어콘이 회수 되었으며, 이들 중 약 100개 입자를 저어콘 표준시료와 함께 에폭시 마운트(epoxy mount)로 만들었다. 대략 저어콘 입자의 중앙부가 노출될 때까지 연마한 후에, 1 μm와 0.25 μm의 다이아몬드 연마제를 각각 사용하여 최종적으로 처리하였다. 마운트에 준비된 저어콘 입자들을 편광 및 반사현미경으로 관찰 및 사진촬영한 후, 전자 현미경 영상 분석을 위해 마운트를 금으로 코팅하였다. 서호주대학교 전자현미경센터에 설치되어 있는 JEOL 주사전자현미경을 사용해 후방산란전자(BSE; back-scattered electron) 및 음극선발광(CL; cathodoluminescence) 영상을 얻었고, 분석할 저어콘 결정의 누대구조 및 변질 조직 등에 대

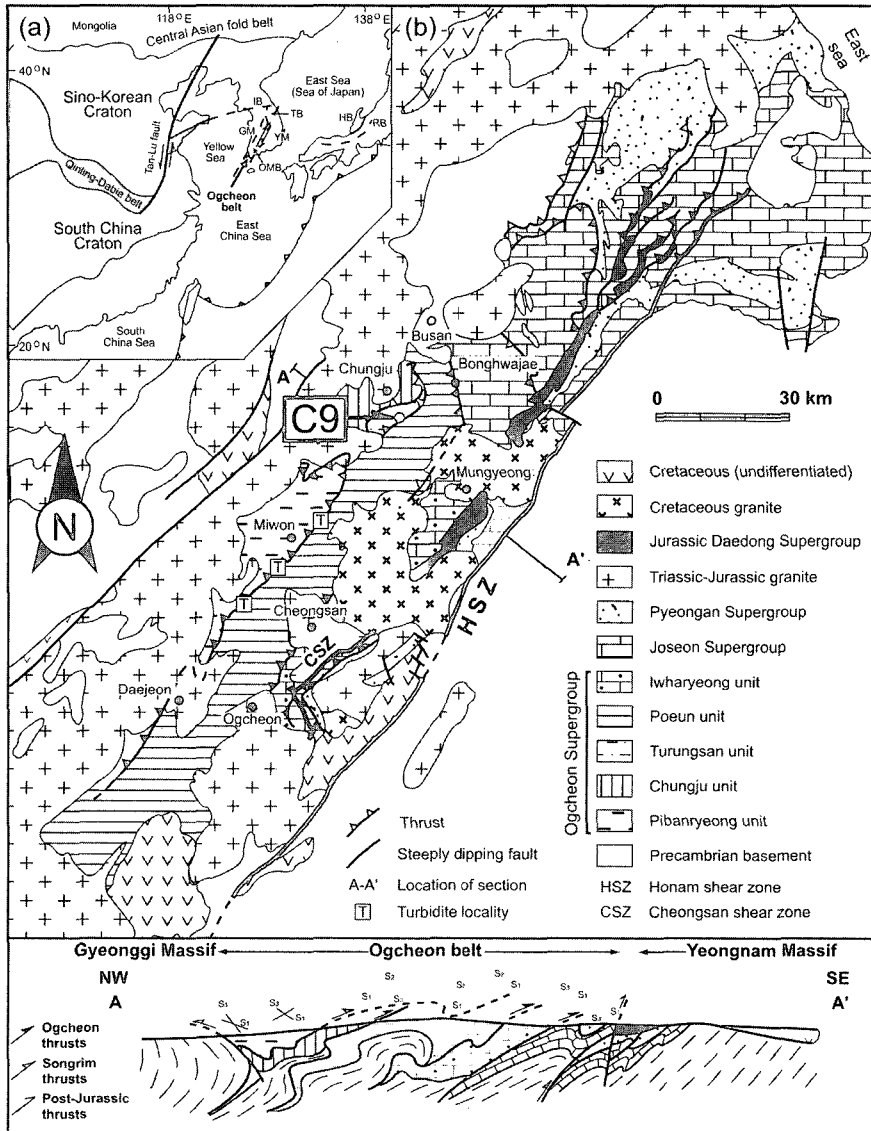


Fig. 1. (a) A simplified tectonic province map of East Asia showing the present-day subduction zone along the Pacific margin (after Ernst *et al.*, 1988); (b) A geologic map showing various lithotectonic units in the Ogcheon metamorphic belt and the Taebaeksan basin (modified from Cluzel *et al.*, 1990). Sample location of C9, belonging to the Turungsan unit of Cluzel *et al.* (1990), is also shown. Abbreviations are TB, Taebaeksan basin; IB, Imjingang belt; GM, Gyeonggi Massif; YM, Yeongnam Massif; OMB, Ogcheon metamorphic belt; HB, Hida belt; RB, Renge belt.

해 검토하였다(Fig. 2). 이를 바탕으로 SHRIMP 분석을 위한 저어콘 입자의 분석 점(spot)들을 정하였다.

U-Pb-Th 분석을 위해서는 서호주 퍼스(Perth)의 커튼(Curtin) 대학에 설치되어 있는 SHRIMP II를 사용하였다. 커튼대학교의 고분해능 이차이온질량분석기에 대한 자료는 Kennedy and de Later(1994)와 Kinny *et al.*(1999)에 의해 보고된 바 있다. SHRIMP를 사용한

분석방법 자체에 관한 자세한 논의는 Compston *et al.* (1984), Williams(1998), Ireland and Williams(2003) 등에서 찾아볼 수 있다. 한편, 이차이온질량분석기 전반에 관한 소개는 최변각(2001)에 의해 정리되어 있다. 이온 빔(beam)은 약 25 μm 정도의 크기로 원형 내지 타원형의 모습을 지닌다. U-Pb-Th 동위원소 비는 스리랑카 산 저어콘 표준시료(CZ3; 564 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} =$

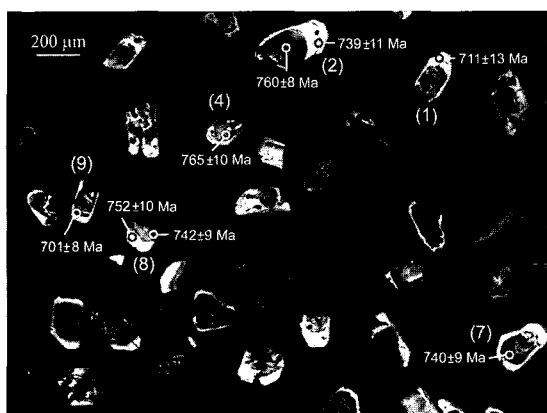


Fig. 2. A cathodoluminescence image showing the analytical spots of zircon. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages together with one sigma errors are given. Zircon grains show magmatic oscillatory zoning, which are partly blurred in some grains because of possible Pb loss. Inherited cores are apparently absent. Numbers in parentheses refer to those of the analyzed zircon listed in Table 1.

0.09432)를 사용해 구하였다. 동위원소 분석치의 신뢰도를 높이기 위해, 8개의 상이한 질량을 갖는 원소 및 분자들에 대해 각각 6번씩 반복 측정하였다: 즉 ^{90}Zr , ^{16}O , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{238}U , ^{232}Th , ^{16}O , ^{238}U 이다. 분석 시료의 Pb/U 비율은 표준시료로부터 측정된 $\ln(\text{Pb}/\text{U})/\ln(\text{UO}/\text{U})$ 비가 일정한 값(2.0)을 가진다고 가정해 계산하였다(Ireland and Williams, 2003). U과 Th의 붕괴상수는 Steiger and Jager(1977)의 값을 사용하였다. 아래에 기술하는 연대는 모두 ^{206}Pb 로 보정된(Compston *et al.*, 1984) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연대를 나타낸다. 보고된 연대의 불확실도(uncertainty)는 측정오차뿐만 아니라 ^{206}Pb 보정법에 따른 오차들을 포함한다. Table 1에 실린 각 점 분석 자료와 일치연선 그림(Fig. 3)에 표시된 오차범위는 1σ 를 나타낸다. 반면 평균연령치에 딸린 오차범위는 2σ (약 95% 신뢰도)를 정의한다. 저어콘의 동위원소 자료들은 SQUID(Ludwig, 2001a)와 Isoplot(Ludwig, 2001b) 프로그램을 사용해 처리하였으며, 그 결과는 Table 1과 Fig. 3에 나타나 있다.

분석 결과

변성응회암 시료(C9)의 저어콘은 대부분 자형 내지 반자형의 주상 결정으로 산출하며, 큰 것은 약 $400\ \mu\text{m}$ 에 달한다. 드물게는 저어콘의 양끝 종결면(termination)이 관찰되기도 한다. 저어콘은 흔히 세립의 규산염광물이나 자철석을 포획하며, 부분적으로 용식된 조직도 보인다. 주사전자현미경 영상들은 저어콘의 성장사를

해석하는데 유용하다. BSE 보다는 CL 영상이 더 자세한 내부조직을 보여주며, 양자 모두 화성기원의 다양한 증거들을 나타낸다. 분석된 저어콘 입자들의 내부에서 상속핵(inherited core)은 관찰되지 않는다.

음극선발광의 정도는 중앙부와 주변부가 뚜렷한 차이를 보이는데, 전자는 대부분 어두운 CL 색깔을 보이는데 반해 주변부에서는 매우 밝은 CL 띠가 발달한다(Fig. 2). 또한 저어콘의 내부는 화성기원임을 지시하는 진동누대구조를 보이는 경우가 흔하다. 저어콘 입자의 주변 띠는 흔히 수십 μm 의 두께를 가지며, 중앙부에 비해 U+Th 양이 적은 대신(Table 1) CL 발광소로 작용하는 다른 미량원소가 포함되어 있으리라 예상된다. 이 띠는 물론 중앙부보다 나중에 성장했음이 확실하지만, 특별한 CL 내부조직이 발달하지 않는 경우 변성작용 중에 만들어졌을 가능성도 배제하기 어렵다. 그러나 일부 결정에서는 진동누대구조가 발달하여, 중앙부와 마찬가지로 화성기원임을 지시한다(Fig. 2의 2번 입자). 한편, 이들 띠를 구성하는 저어콘의 Th/U 비는 0.2-0.8로서(Table 1), 화성기원임을 지지한다(Rubatto, 2002). 이러한 해석은 실제 U-Pb 연대측정 결과에 의해서도 확인되었다(아래 참조). U과 Th 농도는 각각 41-837 ppm과 17-962 ppm의 범위를 보인다.

대부분의 점분석 자료는 일치연선 선상에 찍힌다. 그러나, 2개의 점분석치는 납순실에 따른 젊은 연대를 보인다(C9-1.1, 9.1). 이들 점분석 자료를 제외한 나머지 13개 분석점에 대한 기중평균연대는 $746.7 \pm 6.8\ \text{Ma}$ 이다(Fig. 3).

토의 및 결론

옥천대의 지구조적 진화과정을 이해하기 위해서는 무엇보다 믿을만한 연대자료들이 확보되어야 한다. 특히 변성응회암의 U-Pb 저어콘 연대는 옥천변성대의 화산활동 시기에 대해 중요한 정보를 제공하므로 옥천대의 초기 진화사를 이해하는데 매우 중요하다. 우리는 SHRIMP 연대측정을 통해 Lee *et al.*(1998)이 전통적인 ID-TIMS방법으로 구한 신원생대 화산활동을 확인할 수 있었다. 즉 문주리층의 변성응회암류는 약 750 Ma에 분출하였으며, 옥천변성대 지역에 쌍모식 화산활동을 수반한 대륙열개가 발달하였을 것으로 생각된다. 이 연대는 또한 Lee *et al.*(2003)이 경기육괴 북서부의 갑악산 변성알칼리화강암류로부터 최근 보고한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대($742 \pm 13\ \text{Ma}$)와도 일치한다. 따라서 경기육괴와 옥천변성대 모두 신원생대 대륙열개 사건에 수반된 화성활동을 경험했을 것으로 생각된다.

Table 1. SHRIMP U-Pb isotopic data of the analyzed zircons.

Spot	²⁰⁶ Pb _c (%)	U (ppm)	Th (ppm)	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* (ppm)	(1) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U age (Ma)	(2) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U age (Ma)	(3) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U age (Ma)	(1) ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U age (Ma)	(1) ²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U age (Ma)	(1) ²⁰⁷ Pb* ⁸⁶ / ²³⁵ Pb* age (Ma)	(1) ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb* age (Ma)	(1) ²⁰⁷ Pb* ⁸⁶ / ²³⁵ Pb* age (Ma)	(1) ²⁰⁷ Pb* ⁸⁶ / ²³⁵ Pb* age (Ma)	(1) ²⁰⁶ Pb* ⁸⁶ / ²³⁸ U age (Ma)	Error correlation factor
C9-1.1	0.17	41	29	0.72±0.0087	5	711±13	709±13	707±13	795±169	742±44	11	8.582±0.0023	0.0656±0.0053	1.054±0.090	0.1165±0.0023	0.23
C9-2.1	0.10	91	58	0.64±0.0049	12	739±11	739±11	740±11	726±65	724±22	-2	8.231±0.0019	0.0635±0.0019	1.064±0.038	0.1215±0.0019	0.43
C9-2.2	0.02	625	962	1.54±0.0045	104	760±8	760±8	758±8	749±19	769±10	-1	7.990±0.0015	0.0642±0.0006	1.108±0.017	0.1252±0.0015	0.75
C9-3.1	0.14	145	82	0.57±0.0034	19	743±10	744±10	744±10	676±54	729±20	-10	8.186±0.0017	0.0621±0.0016	1.045±0.032	0.1222±0.0017	0.45
C9-4.1	-0.38	151	117	0.78±0.0065	21	765±10	765±10	765±10	766±30	757±16	0	7.934±0.0018	0.0647±0.0009	1.125±0.024	0.1260±0.0018	0.67
C9-5.1	0.64	52	54	1.04±0.0125	7	742±13	738±13	746±13	881±175	562±35	16	8.198±0.0023	0.0684±0.0057	1.150±0.102	0.1220±0.0023	0.21
C9-6.1	-0.12	279	244	0.88±0.0050	38	728±9	728±9	727±9	752±21	739±13	3	8.360±0.0016	0.0643±0.0006	1.061±0.019	0.1196±0.0016	0.76
C9-7.1	0.05	452	367	0.81±0.0033	62	740±9	740±9	740±9	747±21	742±11	1	8.224±0.0015	0.0642±0.0006	1.076±0.018	0.1216±0.0015	0.73
C9-8.1	0.17	122	72	0.59±0.0041	16	752±10	753±10	752±10	700±81	761±26	-7	8.079±0.0018	0.0628±0.0024	1.071±0.045	0.1238±0.0018	0.34
C9-8.2	0.20	191	112	0.59±0.0034	25	742±9	742±9	743±9	738±46	725±17	-1	8.197±0.0016	0.0639±0.0014	1.075±0.029	0.1220±0.0016	0.50
C9-9.1	0.13	837	552	0.66±0.0027	105	701±8	700±8	701±8	734±24	698±12	4	8.710±0.0014	0.0638±0.0007	1.009±0.018	0.1148±0.0014	0.70
C9-10.1	-0.02	210	170	0.81±0.0051	29	754±10	753±10	754±10	795±26	752±14	5	8.060±0.0017	0.0656±0.0008	1.123±0.022	0.1241±0.0017	0.70
C9-11.1	0.56	43	17	0.40±0.0043	5	735±13	737±13	737±13	659±141	697±57	-12	8.283±0.0023	0.0616±0.0040	1.025±0.072	0.1207±0.0023	0.27
C9-12.1	-0.14	70	40	0.57±0.0068	9	764±14	764±14	764±14	773±48	744±24	1	7.946±0.0024	0.0650±0.0015	1.127±0.035	0.1258±0.0024	0.60
C9-12.2	0.24	662	462	0.70±0.0036	90	744±9	742±9	744±9	818±33	740±14	9	8.177±0.0016	0.0664±0.0011	1.119±0.024	0.1223±0.0016	0.59

Errors are one sigma; Pb_c and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively.

(1) Common Pb corrected using measured ²⁰⁴Pb.

(2) Common Pb corrected by assuming ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U age-concordance

(3) Common Pb corrected by assuming ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁸Pb/²³²Th age-concordance

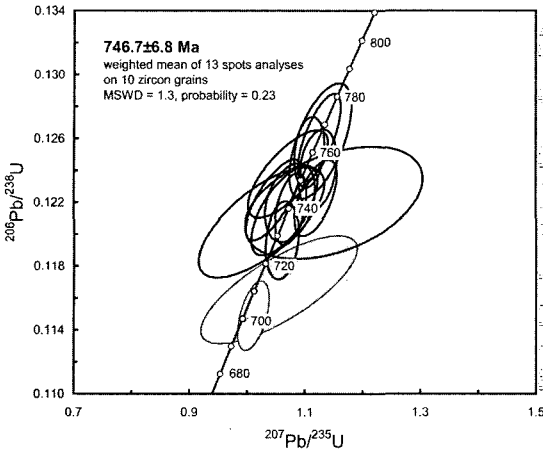


Fig. 3. Concordia diagram showing SHRIMP U-Pb ages of zircon. Two spot analyses not included in the age calculation are shown as gray ellipsoids. Data-point error ellipsoids and weighted mean ages are at 68% and 95% confidence levels, respectively.

신원생대의 대륙열개와 초대륙 분열은 전지구적으로 최근 중요하게 인식되고 있으며, 소위 눈덩이 지구 (Snowball Earth) 이론의 핵심을 이룬다(Hoffman, 1991; Hoffman *et al.*, 1998; Li *et al.*, 1999; Zheng *et al.*, 2003). Li *et al.*(2003a, b)이 최근 정리한 바와 같이, 남중국지괴는 거대한 맨틀 플룸의 상승작용으로 약 820 Ma 경에 대륙분열이 시작되었고, 약 740 Ma까지 계속되었다. 이러한 대륙분열 사건은 빙하퇴적물과 밀접히 수반되는데, 이는 눈덩이 지구 이론으로 잘 설명된다. 즉 왕성한 대륙열개에 따른 화산활동의 증가는 대기 중의 탄산가스 양을 증가시켰고, 그 결과 온실효과를 불러일으킨다. 이에 따라 탄산염 광물이 다량 침전되어 석회암층이 형성된다. 그러나 계속된 대륙분열은 판구조론에 따른 초대륙의 형성으로 이어지며, 화산활동의 급격한 감소는 결국 기온을 하강시켜 빙하시대를 초래한다. 남중국지괴에서 잘 보고된 신원생대 빙하퇴적층(Nantuo Formation)과 덮개암으로 산출하는 석회암층, 그리고 이에 수반된 쌍모식 화산암들은 눈덩이 지구 이론으로 잘 설명된다(Zheng *et al.*, 2003). 우리나라에서 보고된 약 750 Ma의 화산활동이 과연 남중국지괴와 대비되는지에 대해서는 앞으로의 연구에 의해 검토되어야 할 것이다. 그러나 현재까지의 자료들에 의하면, 옥천변성대에도 남중국지괴와 마찬가지로(Li *et al.*, 2003b) 로디니아 초대륙의 분열에 따른 쌍모식 화산활동이 기록되어 있을 것으로 추정하는데 무리가 없다. 한편 문주리층에서 구한 약 750 Ma의 화산활동 연

대는 박종길 외(2003)가 계명산층의 변성응회암으로부터 SHRIMP를 사용해 구한 저어콘 U-Pb 연대(2686 ± 11 Ma)와 큰 대조를 이룬다. 이 시생대 연대를 바탕으로, 박종길 외(2003)는 계명산층이 약 27억년전 분출한 화산암층으로 옥천변성대의 기반암을 이루지만 예외적으로 고온변성작용을 받지 않은 독특한 암체로 해석하였다. 만약 이러한 해석이 사실이라면, 옥천변성대의 기존 모델은 크게 수정되어야 할 것이다. 그러나 야외 산상이나 지구화학적 증거들은 계명산층이 시생대 암체라는 해석에 의문을 갖게 한다. 즉 계명산층과 문주리층에 분포하는 변성화산암류는 모두 쌍모식 화산활동을 지시하며(Cluzel, 1992; Lee and Chang, 1997; Lee *et al.*, 1998), 야외에서도 구분이 어려운 경우가 허다하다. 이 두 층 사이에서 변성도는 연속적으로 변화하며(Min and Cho, 1998) 변성화산암 내에 기록된 변성광물조합 및 성분도 별 차이가 없다. 또한 결핍(depleted) 맨틀을 기준으로 한 Nd 모델 연대(TDM) 또한 옥천대의 화산암류가 원생대 이후에 맨틀로부터 분리된 지각물질 기원임을 시사한다(Lan *et al.*, 1995). 그러므로 박종길 외(2003)가 보고한 저어콘 U-Pb 연대는 화산활동 자체보다는 화산작용시 유입된 외래결정(xenocryst)으로부터 얻어졌지 않았을까 추정해 본다. 박종길 외(2003)는 SHRIMP로 분석된 변성응회암에 대한 자세한 암석기재를 생략하였기 때문에 이 가능성에 대한 면밀한 검토가 요구된다. 이상의 논의에도 불구하고, 옥천변성대에서 얻은 약 27억년의 저어콘 결정 연대는 이제까지 T_{DM} 연대 또는 저어콘의 상속핵 연대로만 보고되었기에 그 중요성은 매우 크다. 경기육괴에서도 시생대 암체가 현재까지 보고된 바 없기에, 앞으로 이 시생대 연대의 재현성을 확인하는 시도가 긴급하다고 생각된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단의 목적기초연구비(R01-2001-00070) 및 선도기초과학연구비(R14-2003-017-01002-0)에 의해 지원되었다. 초고를 읽고 유익한 비평들을 제공해준 조동룡 박사와 박계현 교수에게 감사한다.

참고문헌

- 박종길, 김성원, 오창환, 김형식, 2003, 옥천변성대 북서부 계명산층 내 변성화산암류의 지구화학 및 지구연대학적 연구와 그 지구조적 의의. 암석학회지, 12, 155-169.
김기완, 이홍규, 1965, 한국지질도, 1:50,000 충주도폭, 국립지질조사소.

- 조동룡, 2004, 저온 아입자분석을 위한 효율적인 광물분리 기술과 시료준비 방법. 암석학회지 (인쇄중).
- 조문섭, 김현철, 2002, 중부 옥천변성대의 변성진화: 최근의 연구결과 논평 및 문제점. 암석학회지, 11, 121-137.
- 최변각, 2001, 이차이온질량분석기의 원리와 지질학적 응용. 암석학회지, 10, 222-232.
- Cho, M., Min, K. and Kim, H., 1994, Metamorphism in the central Ogcheon belt. In: Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T. and Kim, J.H. (eds.), Structure and Metamorphism of the Ogcheon Belt - Field Trip Guidebook, IGCP 321 4th Int. Symp. Field Excur., Harn Lim, Seoul, 97-120.
- Chough, S.K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D.K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean peninsula: a review and new view. Earth-Sci. Rev., 52, 175-235.
- Cluzel, D., 1992, Formation and tectonic evolution of early Mesozoic intramontane basins in the Ogcheon belt (South Korea): a reappraisal of the Jurassic "Daebo orogeny". J. Southeast Asian Earth Sci., 7, 223-235.
- Cluzel, D., Cadet, J.P. and Lapierre, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea): Tectonophysics, 183, 41-56.
- Compston, W., Williams, I.S. and Myer, C., 1984, U-Pb geochronology of zircons from Lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. J. Geophys. Res., 89B, 525-534.
- Ernst, W.G., Cao, R. and Jiang, J., 1988, Reconnaissance study of Precambrian metamorphic rocks, northeastern Sino-Korean shield, People's Republic of China. Geol. Soc. Am. Bull., 100, 692-701.
- Hoffman, P.F., 1991, Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? Science, 252, 1409-1412.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. and Schrag, D.P., 1998, A Neoproterozoic Snowball Earth. Science, 281, 1342-1346.
- 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, Rev. Mineral. Geochem., 53, 215-241.
- Kennedy, A.K. and de Later, J.R., 1994, The performance characteristics of the WA SHRIMP II ion microprobe. In: 8th International Conference on Geochronology, Cosmochronology and Isotope Geology, Berkeley, Abstracts, 1107, 166.
- Kinny, P.D., Friend, C.R.L., Strachan, R.A., Watt, G.R. and Burns, I.M., 1999, U-Pb geochronology of regional migmatites in east Sutherland, Scotland: evidence for crustal melting during the Caledonian orogeny. J. Geol. Soc. London, 156, 1143-1152.
- Lan, C.-Y., Lee, T., Zhou, X.-H. and Kwon, S.-T., 1995, Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea: Evidence for Early Archean crust? Geology, 23, 249-252.
- Lee, K.S. and Chang, H.W., 1997, Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic systematics of the Ogcheon amphibolites from the central Ogcheon belt, Korea: implication for the source heterogeneity. Geochem. J., 31, 223-243.
- Lee, K.S., Chang, H.W. and Park, K.-H., 1998, Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: age and tectonic implication. Precambrian Res., 89, 47-57.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H., and Wingate, M.T.D., 2003, Neoproterozoic alkaline granitoid in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea, and its tectonic implication. Precambrian Res., 122, 297-310.
- Li, Z.X., Li, X.H., Kinny, P.D. and Wang, J., 1999, The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? Earth Planet. Sci. Lett., 173, 171-181.
- Li, Z.X., Cho, M. and Li, X.H., 2003a, Precambrian tectonics of East Asia and relevance to supercontinent evolution: introduction. Precambrian Res., 122, 1-6.
- Li, Z.X., Li, X.-H., Kinny, P.D., Wang, J., Zhang, S. and Zhou, H., 2003b, Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia, Precambrian Res., 122, 85-109.
- Ludwig, K.R., 2001, SQUID 1.00: A user's manual. Berkeley Geochronology Center special publication, No. 2, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 17p.
- Ludwig, K.R., 2001, User's manual for Isoplot/Ex, version 2.49: a geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center special publication, No. 1a, 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA, 59p.
- Min, K. and Cho, M., 1998, Metamorphic evolution of the northwestern Ogcheon metamorphic belt, South Korea. Lithos, 43, 31-51.
- Rubatto, D., 2002, Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chem. Geol., 184, 123-138.
- Steiger, R.H. and Jager, E., 1977, Subcommittee on geochronology; convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. Earth Planet. Sci. Lett., 36, 359-362.
- Williams, I.S., 1998, U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M.A., Shanks, III, W.C. and Ridley, W.I. (eds.), Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes, Rev. Econ. Geol., 7, 1-35.
- Zheng, Y.-F., Fu, B., Gong, B. and Li, L., 2003, Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. Earth-Sci. Rev., 62, 105-161.

(2004년 8월 12일 접수; 2004년 8월 28일 채택)