



임진강대에서 보장산조면암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정과 층서적 의미

황상구^{1,‡} · 기원서² · 이기욱³

¹안동대학교 지구환경과학과

²한국지질자원연구원 국토지질연구부

³한국기초과학지원연구원 환경과학연구부

요 약

이 논문은 보장산조면암에 대한 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대측정을 실시함으로써 이들의 정치시기와 층서 관계를 확실하게 하였다. 보장산조면암은 임진강대 남변부에서 김포층군을 관입하는 돔상 화산암체를 나타낸다. 김포층군은 경기육괴의 원생누대 변성암류와 임진강대의 데본기 연천층군과의 경계부에 형성된 신장성 변형작용의 경기전단대 혹은 전곡단층을 따라 고립적으로 발달하는 작은 분지에 퇴적되어 있다. 보장산조면암은 SHRIMP U-Pb 측정에 의하면 230.5 ± 1.5 Ma ($n=10, 2\sigma$)에 집중되는 일치곡선 연령을 나타내며, 임진강대에서 송림 조산운동 중에 일어났던 보장산조면암에 대한 삼첩기 후엽의 새로운 정치시기를 나타낸다. 그러므로 이 연령은 보장산조면암이 삼첩기 후엽의 화산암이라는 것을 암시할 뿐만 아니라, 이 지역의 김포층군이 적어도 보장산조면암이 삼첩기 후엽에 관입되기 이전에 퇴적되었음을 시사해준다.

주요어: 보장산조면암, 김포층군, SHRIMP U-Pb 측정, 정치시기, 삼첩기 후엽

Sang Koo Hwang, Weon-Seo Kee and Keewook Yi, 2017, SHRIMP U-Pb Zircon dating and stratigraphic implications of the Bojangsan Trachyte in the Imjingang belt, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 3, p. 423-432

ABSTRACT: We determined the emplacement timing and stratigraphic relationship of the Bojangsan Trachyte based on field investigation and SHRIMP U-Pb zircon dating. The Bojangsan Trachyte forms a volcanic dome intruding the Gimpo Group in the southern margin of the Imjingang belt. The Gimpo Group is deposited in small basin that developed along Gyeonggi shear zone and Jeongok fault, presumably formed by extensional deformation along the boundary between Imjingang belt and Gyeonggi massif. The concordia age of 230.5 ± 1.5 Ma ($n=10, 2\sigma$) from SHRIMP U-Pb dating indicates the emplacement timing of the Bojangsan Trachyte in the Imjingang belt, suggests the Bojangsan Trachyte to be Late Triassic volcanic rocks. This implies the depositional timing of the Gimpo Group to be constrained as Late Triassic before intrusion of the Bojangsan Trachyte.

Key words: Bojangsan Trachyte, Gimpo group, SHRIMP U-Pb dating, emplacement timing, late triassic

(Sang Koo Hwang, Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; Weon-Seo Kee, Korea Institute of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea; Keewook Yi, Korea Basic Science Institute, Ochang 28819, Republic of Korea)

1. 서 언

임진강대는 한반도의 지질이 연구되기 시작한 이래 많은 논란의 대상이었던 지역이다. 현재도 임진강대와 주변의 생성과 변천에 대한 논의가 계속되고

있으며, 이는 한반도의 지각진화사를 규명하는데 있어 임진강대가 매우 중요함을 말해주고 있다. 임진강대의 남변부에 분포하는 보장산조면암은 아직 연구를 기다리는 미지의 암석으로 남아있다.

예를 들어 보장산조면암의 생성시기에 대해서는

[‡] Corresponding author: +82-54-820-5469, E-mail: hwangsk@anu.ac.kr

백악기라고 여겨져 왔으며(Kee *et al.*, 2008), 층서적 위치는 철원분지의 다른 지층들을 관입했다고 보고 되었고, 구성암석은 안산암으로 기재되었다(Kee *et al.*, 2008). 그러나 이에 대한 정치시기가 언제인지와 화학조성이 어떠한지 등의 여러 의문은 해결되지 못한 채로 남아있다.

한편 임진강대의 보장산조면암 주변에는 미산층과 같은 비화산성의 변성퇴적암류와 적성층 및 신흥층의 비화산성의 퇴적암류가 분포한다(Kee *et al.*, 2008). 미산층은 연천층군에 속하며 쇄설성 저어콘에 의한 퇴적 상한연대가 약 390 Ma로 알려져 있다(Cho, 2007). 적성층은 김포층군에 속하며 쇄설성 저어콘에 의해 삼엽기 후엽에서 주라기 초엽으로 추정되고 있다(Yu *et al.*, 1992). 신흥층은 화산쇄설물을 전혀 포함하지 않는 관개로 백악기 화산활동이 발생하기 전에 퇴적된 최하부층으로 추정하고 철원층군으로 대비시켰다(Kee *et al.*, 2008).

이 논문에서는 임진강대 경계부에서 산출되는 보장산조면암에 대한 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대를 보고하고 이와 더불어 주변의 적성층과 신흥층에 대한 층서적 의미를 다루었다. 이와 같이 보장산조면암의 정치시기를 밝히는 것은 이들과 임진강대 뿐만 아

니라 한반도의 진화와 관련한 중생대 초기의 문제들을 풀어내는데 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

2. 지질개요

철원분지는 지체구조적으로는 경기육괴 북서부와 임진강대 남동부의 경계부에 위치하며 추가령 지구대가 통과한다. 주변의 지질은 크게 선캠브리아기의 변성암류와 고생대의 연천층군, 중생대 김포층군, 주라기의 심성암류, 백악기의 명성산화강암, 철원층군과 관입암류, 제4기의 현무암으로 구분할 수 있다(그림 1).

선캠브리아기의 변성암류는 편암류, 고남산각섬암, 감악산변성섬장암, 화강편마암, 엽리상 우백질 화강암으로 구분된다. 고생대 연천층군은 변성퇴적암류로서 미산층, 대광리층과 천덕산층이 있다(Chwae *et al.*, 1996; Kee *et al.*, 2008).

중생대 김포층군은 적성층과 신흥층이 있으며 변성암류를 부정합으로 덮고 있고, 주라기 심성암류는 본역 남동부에서 변성암류를 관입하며 분포한다.

백악기 명성산화강암은 본역 북동부와 남동부에서 변성암류 혹은 주라기 심성암류를 관입하고 있다. 이 명성산화강암은 절대연대가 지포리도폭에서 SHRIMP

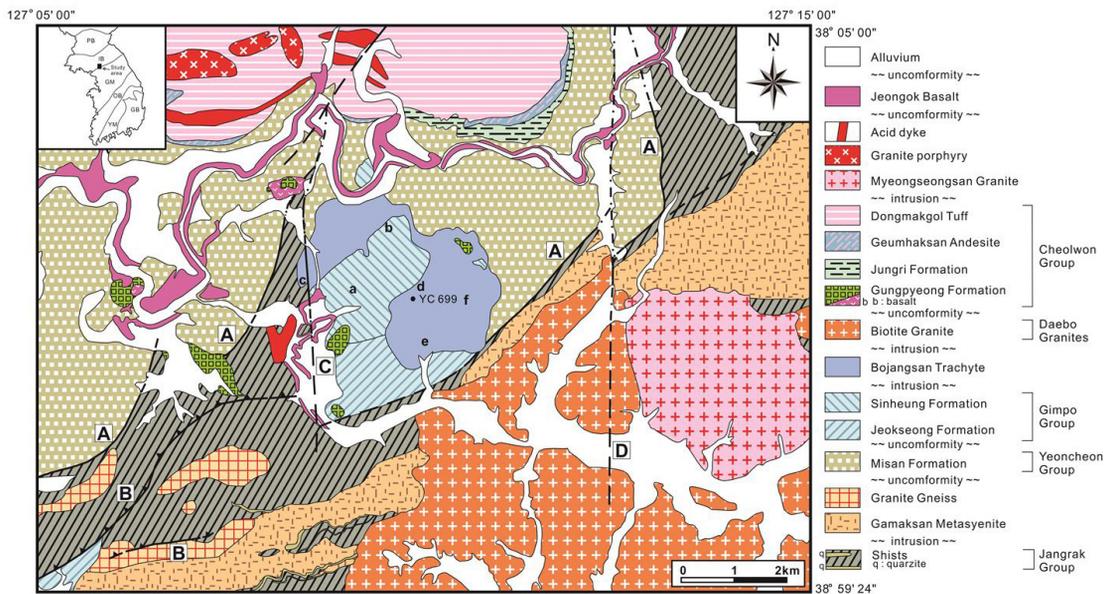


Fig. 1. Geological map around the Bojongsan Trachyte, with an index map showing location of the study area in Korea. A: Jeongok fault, B: Choseong thrust, C: Singo fault, D: Dongsong fault. Small letters a-f and YC 699 represent each site of photographs in the Fig. 2 and sample for the SHRIMP dating.

저어콘 연령측정에 의해 112 ± 2 Ma로 밝혀졌다(Hwang and Kihm, 2007).

백악기 철원층군은 하부에 약간의 화산성 퇴적암이 협재되지만 대부분 화산암류로 채워져 있다. 이 화산암류는 상부의 산성 화산암류를 지장봉 산성 화산암류라 묶어 기재하기도 하였다(Kim *et al.*, 1984). 철원층군은 하부가 비화산성 퇴적암과 현무암질 용암 및 층회암으로 구성된다. 하부로부터 궁평층, 중리층, 금학산안산암, 동막골응회암, 유문암, 신서각력암, 지장봉응회암 등의 8개 층서단위로 나누어진다(그림 1). SHRIMP 저어콘 연령측정에 의하면 유문암이 115.0 ± 1.1 Ma로 측정되었고 지장봉응회암이 113 Ma의 최소 연령으로 측정되었다(Hwang *et al.*, 2011).

백악기 관입암류는 화강반암, 산성암맥 등이 있다. 이들 관입암류는 주로 철원층군의 상부암층을 관입하고 있다. 화강반암은 SHRIMP 저어콘 연령이 111.24 ± 0.85 Ma와 109.1 ± 1.1 Ma으로 측정되었다(Hwang *et al.*, 2011).

3. 김포층군과 보장산조면암

3.1 적성층

적성층은 본역 중앙부 일대에 분포하고 남서부에도 소규모로 분포하며 연장된다(그림 1). 중앙부 일대에서 적성층은 장락층군의 편암 상위에 분포하며, 보장산조면암이 관입하고 있다. 한편 남서부 일대의 적성층은 감악산변성섬암 상위에 부정합적으로 쌓여 있으며, 북서측 경계는 초성드러스트로 인해 장락층군이 층상되어 있다(Kee *et al.*, 2005).

적성층은 육상선상지를 포함한 하성-호성환경에서 형성된 함탄 쇄설암층으로, 주로 회색의 역암, 담회색~암회색 사암, 흑색 셰일 등으로 구성된다. 사암과 셰일은 호층을 이루며 드물게 역암이 협재된다. 적성층 중부에 무연탄층이 1~3매 협재하여 1990년대 초까지 전곡읍 양원리에서 채굴되기도 하였다(Kee *et al.*, 2005). 역암에서 역들은 대개 3~12 cm 정도로서 대부분 규암이고 드물게 천매암과 편암 등을 함유하며 아각상에서 아원상이고 조립질 사질 속에 기질지되어 있다. 사암은 대부분 석영으로 구성되고 여러 장식들과 고철질 광물을 소량 함유하며 이들은 아원상에서 아각상의 원마도를 가지고 일반적으로 좋은 분급도를 나타낸다. 또한 사암은 조립질에서 세립질

로 상향세립화하는 점이층을 발달시키는 경우가 흔하다.

Chun *et al.* (1988)와 Yu *et al.* (1992)는 전곡읍 양원리의 중부 사암 우세대에서 식물화석을 발견함으로써 이 지층이 삼첩기 후엽 내지 주라기 전엽에 온난한 열대 내지 아열대 기후의 호소환경에서 퇴적된 것으로 해석한 바 있다. 그러나 중앙부 일대의 적성층에서는 아직 함탄층이 발견되지 않았지만 *Podozamites* sp.로 동정되는 식물화석이 산출된 바 있다(Kee *et al.*, 2008).

3.2 신흥층

신흥층은 본역 중앙부에 분포하며 적성층 위에 부정합적으로 놓이는 지 확실하지 않다. 이 층은 하부에 역암대가 분포하고, 주로 담회색 내지 담록회색의 조립사암 및 함력사암, 회색 내지 암회색 세립사암, 암회색 세일로 구성된다(그림 2a). 그리고 이 층에는 수 m 두께의 흑색 세일이 우세하게 산출되며, 20 cm 내외 두께의 석회암 또는 이회암이 연장성이 매우 불량한 렌즈상으로 협재되기도 한다. 역암은 국지적으로 노출되지만 원마도가 좋은 규암 및 변성암 역들로 구성되고 원마도가 불량한 사암 역을 함유하며, 그 크기가 전반적으로 3~10 cm이다(그림 2b). 이 역들은 원마도가 각상에서 아원상이고 분급도가 매우 불량하며 사질 기질 속에 기질지되어 있다. 사암은 석영이 절반 이상을 차지하고 사장석, 알칼리장석과 고철질 광물이 소량 함유되며 처어트와 셰일 편이 드물게 관찰된다. 이들은 원마도가 아원상에서 아각상을 나타내고 일반적으로 분급도가 양호한 편이다.

이 층은 화산성 퇴적물을 전혀 포함하지 않으며 본격적인 화산작용 발생 이전에 퇴적된 것으로 해석된다. 이 층의 서측부는 신고단층에 의하여 끊기며, 보장산조면암의 관입으로 역암대가 분리되어 분포한다. 관입 접촉부에는 국부적으로 셰일과 사암이 각력화된 모습(그림 2c)을 나타낼 뿐만 아니라 드물지만 보장산조면암 내에 포획체로 산출된다(그림 2d).

3.3 보장산조면암

보장산조면암은 보장산 주변에서 반상 조면암으로만 구성되는 돔상 화산암체로 산출되며, 연천층군의 변성퇴적암류와 김포층군의 퇴적암류를 관입하기

때문에 이의 층서적 위치를 알 수 없었다. 따라서 이 조면암은 편이상 백악기 화산암 관입체로 간주되었다 (Kee *et al.*, 2008). 이 관입체는 주원소와 미량원소에 의한 분류도에서 모두 조면암 영역에 도시되기 때문에 보장산조면암으로 개칭되었다(Hwang and Ahn, 2017).

보장산조면암은 회색 내지 청회색을 띠고 큰 장석 반정을 많이 함유하는 현저한 반상조직을 보여주며

(그림 2e), 주변의 변성암류의 엽리를 변형시키고 자르는 관입관계를 나타낸다. 이 조면암은 이 암체 서부의 풍화가 심한 곳에서 흔히 담회색 내지 회갈색을 띠는 경우도 있다(그림 2c). 장석 반정은 크기가 2x4 mm 내외가 일반적이며(그림 2e) 최대 10x15 mm 되는 것도 있다. 그리고 보장산 남쪽 임도에는 석영맥이 1~5 cm 두께로 형성되어 있고 석영들이 드물게 패취상으로 뭉쳐있는 경우도 있다.

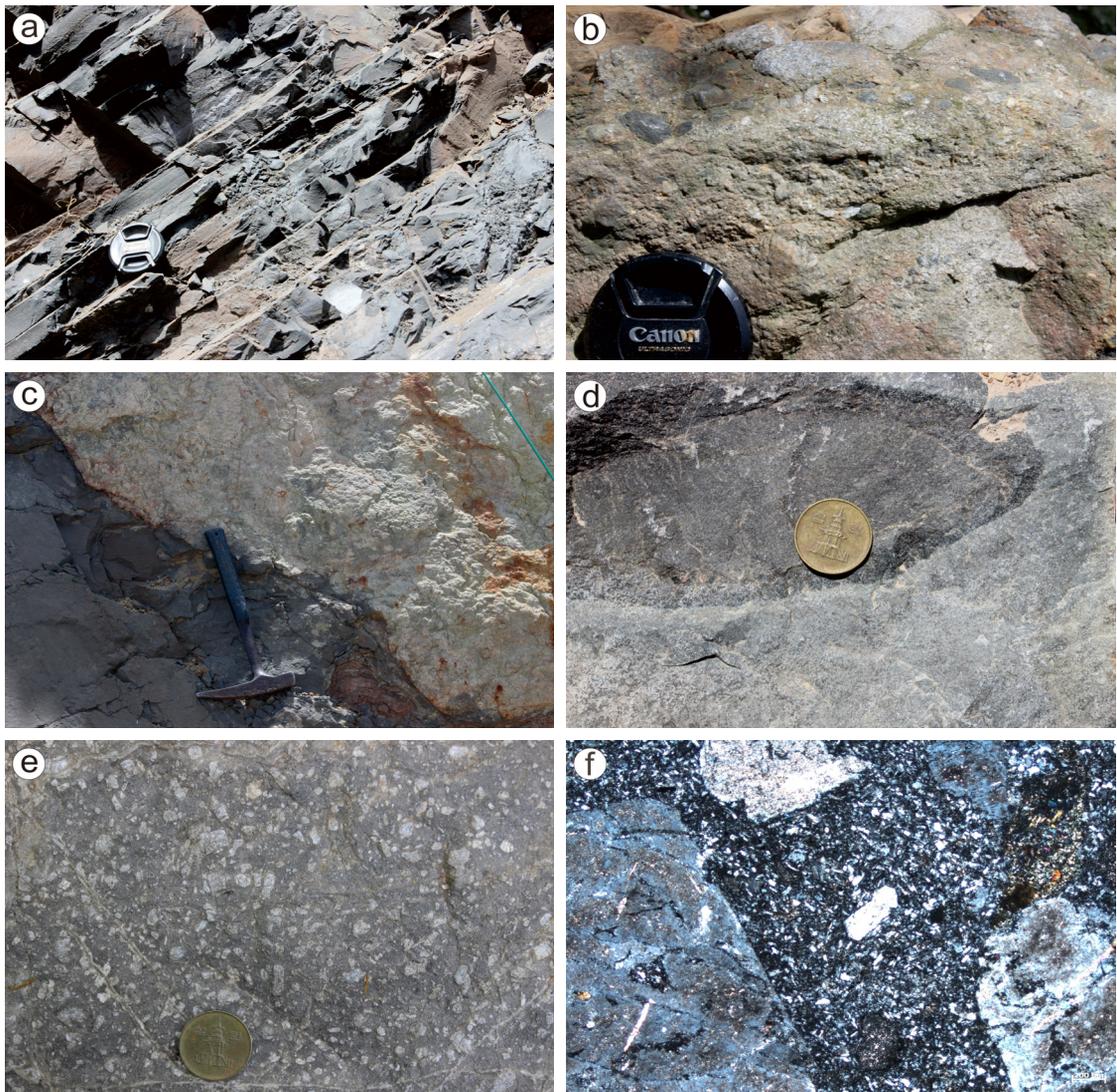


Fig. 2. Photographs of Sinheung Formation and Bojongsan Trachyte. (a) Dark gray shales and sandstones in the Sinheung Formation; (b) Conglomerate in the Sinheung Formation; (c) Contact of the Bojongsan Trachyte with the Shinheung Formation; (d) Sandstone xenolith in the Bojongsan Trachyte; (e) Porphyritic texture of the Bojongsan Trachyte; (f) Photomicrograph of the Bojongsan Trachyte, showing phenocrysts of alkali feldspar, plagioclase and biotite in a trachytic to pilotaxitic groundmass under the cross nicol.

경하에서 반정은 알칼리장석이 우세하고 그 외 소량의 사장석과 흑운모로 구성되며(그림 2f), 석기는 이들과 함께 소량의 석영, 각섬석, 저어콘, 인회석과 불투명광물로 구성된다. 이들은 종종 방해석, 녹염석, 견운모와 녹니석의 2차광물을 가진다. 알칼리장석은 여러 결정이 합쳐지거나 혹은 사장석 결정과 함께 취반정을 형성하는 경우도 있다. 사장석과 흑운모는 대개 미반정으로 나타난다. 알칼리장석 반정은 벌집 모양으로 재용식되어 봉소상 조직을 나타내는 것도 있으며, 모든 장석들은 흔히 견운모 혹은 작은 석영으로 변질되어 포이킬리틱 조직을 나타낸다(그림 2f). 흑운모는 녹니석과 산화철로 흔히 변질된 상태로 존재한다. 석기는 큰 반정 사이에서 장석 미정들이 조면상 조직(trachytic texture) 내지 양모배열상 조직(pilotaxitic texture)을 보여주고(그림 2f), 그 사이에 석영 미정들이 결정화되어 있으며, 부분적으로 고철질 광물들이 다소 변질된 상태로 간진상 조직(intersertal texture)을 나타낸다.

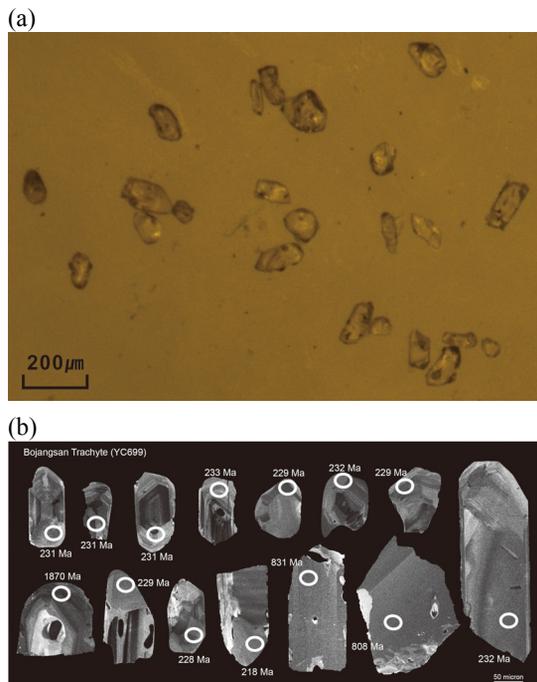


Fig. 3. (a) Zircon grains separated from the Bojangsan Trachyte. The grains show light yellowish green colors; (b) Representative cathodoluminescence images of the analysed zircon grains, showing the location of analytical spots and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages in Ma, separated from the Bojangsan Trachyte.

4. 저어콘 분리 및 연대측정

저어콘 분리는 파쇄작업, 수세식 팬닝, 중액법과 자성분리법의 절차에 따라 수행되었다. 먼저 보장산조면암의 대표시료는 실험실에서 1차로 파쇄기(Jaw crusher)로 파쇄하고 2차로 분쇄기로 더 잘게 분쇄한 후, 표준 망체를 이용하여 120~180 메쉬 사이의 입자를 회수하였다. 회수된 입자는 비커에 넣어 물을 이용해 팬닝(panning)하고 자석으로 자성광물을 제거하여 중광물을 농집시켰다. 남은 중광물 입자들은 실체현미경 하에서 핀셋으로 저어콘 입자만을 골라냈다. 분리한 저어콘들은 표준 저어콘 결정과 함께 점착테이프에 올려놓고 에폭시액을 발라 고정시켜 마운트를 만들었다. 저어콘 마운트는 입자가 반쯤 드러날 때까지 사포로 갈아낸 후 다이아몬드 연마제로 광택이 나도록 표면을 연마하였으며, 마지막으로 금으로 코팅하였다.

코팅한 마운트는 한국기초과학지원연구원에서 음극선발광(CL; Cathodoluminescence) 장치를 부착한 주사전자현미경(JEOL JSM-6610LV 모델)을 이용하여 개별 저어콘 입자에 대해 음극선발광과 후방산란전자(BSE; Backscattered Electron) 영상을 촬영하여 저어콘의 형태와 내부구조를 관찰하고 분석 위치를 선정하였다.

저어콘의 연령측정은 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 SHRIMP IIe를 이용하였다. U-Pb 분석은 일차 이온빔으로 산소 음이온(O^{2-})을 이용하였으며, 이때 이온빔의 직경은 25 μm 이고 세기는 4-6 nA 이었다. 저어콘 표준물질 FC-1 및 SL13과 비교하여 U 함량측정과 U/Pb 연령보정을 실시하였다. 기기 작동과 자료처리절차는 Ireland and Williams (2003) 과 Williams (1998)의 방법을 적용하였다. 측정된 분석자료는 SQUID version 2.5 및 Isoplot/Ex v. 3.6 (Ludwig, 2008, 2009)을 이용하여 연령계산 하였다. 여기서 각각의 분석치와 결보기연령의 오차는 1σ 이고, 기중평균 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 연령 및 일치곡선(concordia) 연령은 95% (2σ)의 신뢰도를 갖는다.

5. 측정결과

보장산조면암에서 선별한 저어콘 입자들은 모두 투명하고 연황색 내지 연녹황색을 띤다(그림 3a). 저

Table 1. Summary of SHRIMP U-Pb isotopic data of the analyzed zircons from the Bojongsan Trachyte.

Spot no.	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U (ppm)	Th (ppm)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	(2) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age(Ma)	(1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Age(Ma)
YC699_1.1	0.97	170	110	0.67	0.43	0.059	3.2	0.0707	1.1	231 \pm 4	-32 \pm 257
YC699_2.1	0.77	220	172	0.81	0.64	0.057	5.1	0.0729	1.0	231 \pm 2	447 \pm 124
YC699_4.1	1.80	323	209	0.67	0.54	0.065	3.9	0.0732	0.8	231 \pm 2	-122 \pm 273
YC699_5.1	1.02	191	131	0.71	0.39	0.059	4.8	0.0724	1.1	233 \pm 2	281 \pm 180
YC699_6.1	0.99	209	156	0.77	0.37	0.059	2.8	0.0712	1.8	229 \pm 2	-123 \pm 256
YC699_7.1	0.88	175	125	0.74	0.40	0.058	5.3	0.0745	1.1	232 \pm 2	312 \pm 175
YC699_8.1	0.92	161	125	0.80	0.41	0.058	3.3	0.0682	1.1	229 \pm 5	142 \pm 204
YC699_9.1	0.37	401	294	0.76	0.27	0.054	2.1	0.0708	0.7	232 \pm 3	52.7 \pm 118
YC699_10.1	0.09	284	133	0.48	0.38	0.115	0.7	0.6366	1.1	1870 \pm 26	1865 \pm 13
YC699_11.1	0.52	181	101	0.57	0.43	0.055	3.1	0.0708	1.1	229 \pm 2	-259 \pm 285
YC699_12.1	0.65	161	109	0.70	0.44	0.056	6.2	0.0680	1.2	228 \pm 3	103 \pm 246
YC699_14.1	0.81	134	89	0.69	0.48	0.057	4.0	0.0682	1.4	218 \pm 16	#NUM! #NUM!
YC699_15.1	0.31	170	127	0.78	0.41	0.069	1.5	0.2718	0.7	831 \pm 8	887 \pm 35
YC699_16.1	0.31	225	184	0.84	0.35	0.069	1.4	0.2548	0.6	808 \pm 7	766 \pm 47

Errors are 1-sigma; Pb_c and Pb^* indicate the common and radiogenic portions, respectively
 Error in Standard calibration was 0.13% (not included in above errors but required when comparing data from different mounts)

(1) Common Pb corrected using measured ^{204}Pb
 (2) Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age-concordance

어콘 입자들은 대부분 자형의 작은 주상(prismatic) 결정을 이루고 길이가 최고 250 μm 이며 시료파쇄시에 파편상(fragmental)으로 쪼개진 것도 있다(그림 3a). 대부분 저어콘 입자는 CL 영상에서 둥글고 강하게 발광하고 동심원상 진동누대를 발달시킨다(그림 3b). 그러나 저어콘 상속핵은 보장산조면암에서 나타나지 않는다. 모든 SHRIMP U-Pb 분석은 저어콘의 진동누대 부분에서 수행되었다. 이들의 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 비는 0.57~0.84 범위로서 대체로 일치성을 나타낸다(표 1). 즉 Th/U 비가 대체로 0.5선과 1선 사이를 따라 직선상 분포를 보여준다(그림 4). 그러므로 이 비는 높기 때문에 마그마에서 성장한 저어콘의 특징을 나타낸다(Vavra *et al.*, 1999; Hartman *et al.*, 2000).

SHRIMP 저어콘 U-Pb 분석결과, 보장산조면암은 14개 저어콘 입자에서 각 1점씩 점분석을 실시하였는데, 이상치를 보이는 4개를 제외하면 10개 분석치는 228~232 Ma 범위로서 매우 좁은 범위의 연령 분포를 나타낸다(표 1). 콘코디아 그림에서, 동심원상 진동누대를 가진 저어콘에서 10개 분석치는 모두 일치곡선 상에서 의미있는 연령을 나타내며, 통계적

으로 처리한 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 평균연령은 230.5 \pm 1.5 Ma (n=10, MSWD=0.48)를 갖는 조화적 군집을 형성한다(그림 5). 이 연령은 이 암석의 결정연대로 아마도 보장산조면암의 정치시기를 나타내는 것으로 해석된다. 그러나 균질한 내부구조를 갖는 저어콘에서 기타 3개 분석치는 1870 \pm 26 Ma에서 808 \pm 7 Ma 범위의 늙은 겉보기 연령을 나타내는데, 이는 다른 암석에서 유래된 외래결정 저어콘의 연령으로 해석된다. 1개 분석치는 218 \pm 16 Ma로서 다소 부조화적인 젊은 겉보기 연령을 나타내므로 콘코디아의 조화적 군집에서 제외시켰다.

6. 토 의

보장산화산암에 대한 삼첩기 후엽의 연대측정은 삼첩기 후엽의 송림조산운동과 관련있는 것으로 생각되며, 당시의 고지리를 복원하는데 한반도의 위치가 상당히 중요한 역할을 할 수도 있음을 시사한다. 이와 더불어 임진강대가 한반도에서 어떤 조구조적 배경을 의미하는지를 알려줄 수 있으며, 이는 중국

의 두 지괴 사이의 대륙충돌대가 한반도의 어디를 지나는지를 해결하는데도 단서를 제공해줄 수도 있다. 따라서 이 연구는 보장산조면암의 활동시기를 검증해보기 위하여 시작되었기 때문에 이의 정치시기에 대하여 먼저 토의하며, 그 다음에 김포층군과의 퇴적시기에 대한 논의하고 송림조산운동과의 관계를 알아보기로 한다.

6.1 보장산조면암의 정치시기

보장산조면암은 북측부와 동측부에서 연천층군의 미산층을 관입하고 남측부에서 김포층군의 적성층과 신흥층을 관입하고 있으며(그림 2c, 2d) 서측부에서 신고단층에 의해 절단되는 관계로 층서관계가 명확하지 않았다. 더군다나 지금까지 보장산조면암에 대한 정확한 연령이 밝혀진 바도 없었다. 따라서 이 보장산조면암은 통상적으로 백악기 화산암류의 천부관입체 일부로 여겨져 왔으며, 이와 더불어 신흥층은 백악기 철원층군의 최하부로 추정하였다(Kee *et al.*, 2008). 이러한 해석은 보장산조면암이 그 당시 정확한 연대측정이 불가능하였고 인접한 화산암류와 유사하다는 가정에서 비롯되었으며, 궁평층과 신서각력암에서 협재되는 암회색 셰일층에서 발견되는 식물화석으로부터 추정된 퇴적시기(Chun *et al.*, 1995)를 그대로 따른 결과에서 비롯되었다.

보장산조면암은 지금까지 연대측정이 전무하기 때문에 백악기 후엽에 해당하는 것으로 생각하게 되었다.

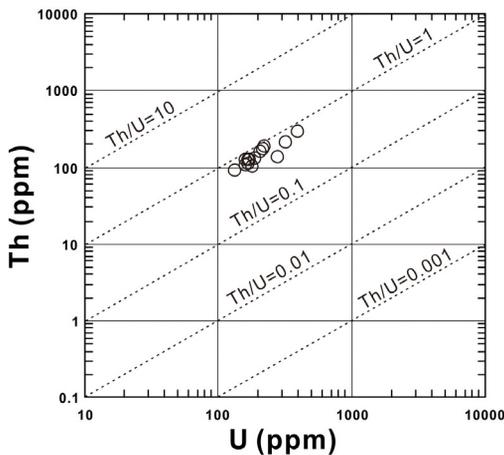


Fig. 4. Correlation diagram showing the proportions of Th to U concentrations (ppm) of the zircons analyzed by SHRIMP.

그러나 SHRIMP 저어콘 U-Pb 분석법에 의한 연령은 230.5 ± 1.5 Ma를 나타낸다. 이 연령은 아마도 보장산조면암이 돔상으로 천부에 관입했던 정치시기를 나타내는 것으로 생각된다. 그런데 이는 적어도 백악기 범주를 크게 벗어나기 때문에 일반적인 기대와는 상충되는 결과를 나타낸다. 따라서 보장산조면암은 지금까지와 전혀 다른 삼첩기 후엽에 속하고 인접하는 김포층군보다 후기라는 층서관계를 가진다는 것을 의미한다.

6.2 김포층군의 퇴적시기

앞에서 말한 바와 같이, 보장산조면암은 김포층군을 관입하는 층서적 관계를 나타낸다. 이 관입관계는 보장산조면암과 김포층군이 공간적으로 서로 접하지만 시간적으로 삼첩기 후엽에 상당한 시간적 차이를 가지며 층서적으로 김포층군이 보장산조면암보다 젊다는 점에서 이 지역에서의 층서 재설정에 대한 새로운 시각을 제공한다. 즉 보장산조면암은 층서적으로 삼첩기 화산암류에 속하며, 이 때문에 김포층군은 임진강대에서 그 시기가 적어도 230.5 Ma보다 앞서는 삼첩기 카미안(Camian)에 속하는 것으로 봐야만 한다.

한편 김포층군의 적성층은 식물화석에 의해 삼첩기 후엽에서 주라기 전엽에 퇴적되었다고 보았기(Yu *et al.*, 1992) 때문에, 그 퇴적 시기가 상당히 넓은 범위를 나타낸다. 그러나 위의 층서관계와 연령측정치에 의

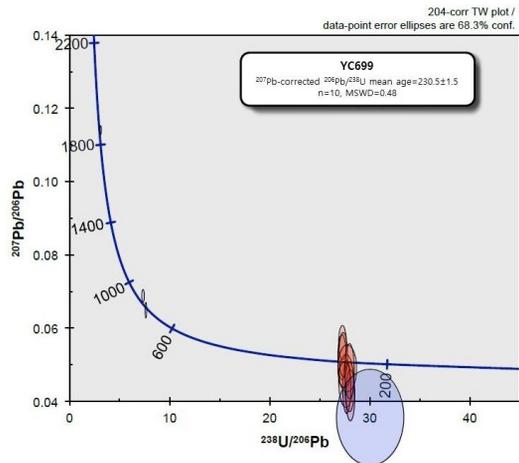


Fig. 5. Concordia diagram for SHRIMP U-Pb ages of zircons separated from sample YC 699 in the Bojangsan Trachyte.

하면 임진강대에 분포하는 적성층과 신흥층은 퇴적 작용이 보장산조면암이 관입되기 이전에 일어났음을 알 수 있었다. 따라서 임진강대에 분포하는 김포층군의 퇴적시기는 적어도 삼첩기 후엽 카미안에 퇴적되었던 것으로 해석해야만 한다. 왜냐하면 적성층의 식물화석이 삼첩기 후엽에서 주라기 전엽을 지시한다는 것은 적성층이 퇴적된 시기를 지정하는 것이 아니며 이 층에서 상당히 긴 시간적 발생범위를 가지는 식물화석이 산출된다는 사실에 기반을 두었다는 것을 의미하기 때문이다. 지금까지 김포층군의 퇴적시기를 식물화석의 넓은 시간적 발생범위로 짐작했지만, 보장산조면암의 연령측정치는 임진강대의 적성층과 신흥층의 퇴적시기가 이 넓은 시간적 범위로부터 보장산조면암의 관입 이전의 삼첩기 후엽 카미안으로 좁혀주는 역할을 하는 셈이다.

6.3 송림조산운동과 연관성

경기육괴는 삼첩기 전엽의 대륙충돌에 의한 대규모 층상단층운동을 경험한 이후 삼첩기 후엽에 충돌 후 심성암 관입과 확장운동을 경험하였다(Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011; de Jong *et al.*, 2015).

이 연구에서 김포층군은 삼첩기 후엽에 충돌 후 확장운동(post-collisional extension)과 관련해 지표에 형성된 퇴적분지에 충전된 퇴적물의 잔존물로 해석된다(Hwang and Ahn, 2017). 왜냐하면 김포층군이 경기육괴의 원생누대 변성암류와 임진강대의 데본기 연천층군과의 경계부를 따라 북동-남서 방향으로 형성된 전곡단층을 따라 발달해 있기 때문이다. 이 단층은 경기전단대를 형성시킨 신장성 변형작용의 연장성 후기 산물로서 정경사이동의 운동학적 특성을 지닌다(Kee *et al.*, 2008). 경기전단대와 전곡단층은 지각의 상승에 수반되는 남북 방향의 신장성 변형작용의 산물로서 김포층군의 적성층이 퇴적되기 전인 삼첩기 후엽에 임진강대의 남측 경계부를 따라 북측 지괴를 하락시킨 연성전단작용에 의한 경기전단대가 먼저 형성되고, 물리적 특성이 후반으로 가면서 취성의 정단층인 전곡단층으로 전이된 것으로 해석되었다(Kee *et al.*, 2008). 그러므로 김포층군은 230.5 Ma 이전의 퇴적층이며, 이는 경기전단대 혹은 전곡단층을 따라 먼저 분지가 형성되고 그 지층에 조면암이 관입한 것으로 해석된다.

이 연구에서 보장산조면암은 지구화학적 특징으로

부터 삼첩기 후엽에 충돌 후 확장운동(post-collisional extension)과 관련해 대륙열곡(continental rift)에서 발생된 마그마의 천부관입체의 잔존물로 해석되었다(Hwang and Ahn, 2017). 왜냐하면 보장산조면암은 주원소를 이용한 여러 구별도에서 후충돌 조구조적 위치에서 형성된 것으로 나타나기 때문이다. 한반도에서 중생대 화강암질암 중에 양적으로 가장 적지만, 삼첩기 후엽 화강암질암의 결정작용 연대는 시간적으로 송림조산운동과 동시기이다. 이들은 대부분 대륙연변부 혹은 충돌 후기 내지 후충돌 환경에서 형성된 것으로 해석되었다(Sagong and Jwa, 1997; Choe and Jwa, 1998; Sagong *et al.*, 2005; Cho *et al.*, 2008). 이들은 246~203 Ma 정치시기를 나타내며, 이 중에서 옥천대를 경계로 북서부에 분포하는 것은 대륙충돌 후의 마그마작용과 관련된다(Kim *et al.*, 2011). 결론적으로 보장산조면암은 신장성 변형 사건에 대해 후조구조이고 송림조산운동(삼첩기 심성암류 관입) 사건에 대해 동시조구조적이라고 할 수 있다. 그리고 한반도 내의 대표적 조산운동으로서 고려되는 송림조산운동의 후기에 일어난 조구조적 특성에 대한 새로운 시각을 부여한다.

7. 결론

임진강대 남변부에서 산출되는 보장산조면암은 알칼리 화산암으로서 김포층군을 관입하는 층서관계를 나타낸다. 김포층군은 경기육괴의 원생누대 변성암류와 임진강대의 데본기 연천층군과의 경계부에 형성된 경기전단대 혹은 전곡단층을 따라 고립적으로 발달하는 작은 분지에 발달해 있다.

경기전단대와 전곡단층은 지각의 상승에 수반되는 남북 방향의 신장성 변형작용의 산물로서 김포층군이 퇴적되기 전인 삼첩기 후엽에 임진강대의 남측 경계부를 따라 북측지괴를 하락시킨 연성전단운동에 의한 경기전단대가 먼저 형성되고, 후반으로 가면서 취성의 정단층인 전곡단층으로 전이된 것이다.

보장산조면암은 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연령측정의 결과 230.5 ± 1.5 Ma로서 삼첩기 후엽을 나타내는데, 이 연령은 이 조면암의 정치시기와 층서관계를 확실하게 하였다.

이 연령은 보장산조면암이 대륙충돌에 의한 송림조산운동에 뒤따르는 화산암이라는 것을 암시할 뿐

만 아니라, 이 지역의 김포층군이 적어도 보장산조면암이 관입되기 이전에 삼척기 후엽의 퇴적시기를 시사해준다. 그리고 임진강대는 삼척기 전엽의 대륙 충돌에 뒤따르는 삼척기 후엽의 충돌후 화산암 관입과 확장운동의 가능성을 암시해준다.

사 사

이 연구는 연천도폭 지질조사시에 얻어진 자료 및 그 후의 추가조사 자료와 한국기초과학지원연구원의 선도장비 이용자 프로그램에 의한 SHRIMP U-Pb 분석으로 수행되었다. 심사과정을 통하여 여러 지적과 의견으로 논문의 질을 향상시켜주었던 익명의 두 분 심사위원과 조석주 편집위원께 사의를 표한다. 그림 제작에 안동대 대학원 이소진의 도움이 있었다.

REFERENCES

- Cho, D.-L., 2007, Chronostratigraphy of the Imjingang belt. In: Kee *et al.* (Eds.) Tectonic Correlation of Major Crustal Units and Construction of Geoscience of Northeast Asia, GP2007-004-2007(1), Institute of Geoscience and Mineral Resources, 63-78 (in Korean).
- Cho, D.-L., Lee, S.R. and Armstrong, R., 2008, Termination of the Permo-Triassic Songrim (Indosinian) orogeny in the Ogcheon belt, South Korea: Occurrence of ca. 220 Ma post-orogenic alkali granites and their tectonic implications. *Lithos*, 105, 191-200.
- Choe, W.H. and Jwa, Y.J., 1998, Petrochemical characteristics of the granites in the Jeomchon area. *Journal of Petrological Society of Korea*, 7, 37-52 (in Korean with English abstract).
- Chun, H.Y., Bong, P.Y., Lee, H.Y., Choi, S.J., Kim, B.C. and Kwon, Y.I., 1988, Research on the geological history: paleontology and stratigraphy of the Kyunggi coalfield. KR-88-1A, Institute of Geology, Mining and Materials, 41 p (in Korean with English abstract).
- Chun, H.Y., Choi, Y.S., Choi, S.J., Kim, Y.B., Kim, B.C. and Lee, B.-S., 1995, Stratigraphy and paleontology of the Cretaceous strata in the Jeongok-Cheolwon area. Research on the Biostratigraphy, KR-94(C)-14, Institute of Geology, Mining and Materials, 69 p (in Korean with English abstract).
- Chwae, U., Choi, S.-J., Park, K.W. and Kim, K.B., 1996, Geological report of the Pocheon Sheet. Institute of Geology, Mining and Materials, 31 p.
- de Jong, K., Han, S. and Ruffer, G., 2015, Fast cooling following a Late Triassic metamorphic and magmatic pulse: implications for the tectonic evolution of the Korean collision belt. *Tectonophysics*, 662, 271-290.
- Hartman, L.A., Leite, J.A.D., Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. and Vasconcellos, M.A.Z., 2000, Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47, 829-844.
- Hwang, J.H. and Kihm, Y.H., 2007, Geological report of the Jipori Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54 p.
- Hwang, S.K. and Ahn, U.S., 2017, Geochemistry and tectonic implications of Triassic Bojangan Trachyte in the southern margin of the Imjingang belt, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 26 (in press) (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., An, Y.M. and Yi, K., 2011, SHRIMP age datings and volcanism times of the igneous rocks in the Cheolwon Basin, Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 20, 231-241 (in Korean with English abstract).
- 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*, Mineralogical Society of America, 53, 215-241.
- Kee, W.-S., Cho, D.-L., Kim, B.C. and Jin, K., 2005, Geological report of the Pocheon Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 66 p.
- Kee, W.-S., Lim, S.-B., Kim, H., Hwang, S.K., Song, K.-Y. and Kihm, Y.-B., 2008, Geological report of the Yeoncheon Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 83 p.
- Kim, K.H., Kim, O.J., Min, K.D. and Lee, Y.S., 1984, Structural, paleomagnetic and petrological studies of the Chugaryeong rift valley. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 17, 215-230 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.-J. and Santosh M., 2011, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Ludwig, K.R., 2008, User's manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, Berkeley, California, 77 p.
- Ludwig, K.R., 2009, SQUID 2.50: A User's manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 5, Berkeley, California, 100 p.

- Sagong, H. and Jwa, Y.-J., 1997, Mineral chemistry and major element geochemistry of the granitic rocks in the Cheongsan area. *Journal of Petrological Society of Korea*, 6, 185-209 (in Korean with English abstract).
- 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.
- Vavra, G., Schmid, R. and Gebauer, D., 1999, Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 380-404.
- 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, 1-35.
- Williams, I.S., Cho, D.-L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi massif, South Korea, constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos* 107, 239-256.
- Yu, K.M., Kwon, Y.I. and Chun, H.Y., 1992, Stratigraphy and mineral composition of sandstones from the Daedong Group, Yeoncheon area. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 152-166 (in Korean with English abstract).

Received : May 11, 2017
 Revised : June 15, 2017
 Accepted : June 27, 2017