

임진강대 남변부 트라이아스기 보장산조면암의
지구화학과 조구조적 의미

황상구^{1*} · 안웅산²

¹안동대학교 지구환경과학과, ²제주특별자치도 세계유산본부

Geochemistry and Tectonic Implications of Triassic Bojongsan Trachyte
in the Southern Margin of the Imjingang Belt, Korea

Sang Koo Hwang^{1*} and Ung San Ahn²

¹Department of Earth and Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Korea

²World Heritage Office, Jeju Special Self-Governing Provincial Government, Jeju 63341, Korea

요약: 이 연구는 임진강대 남변부에서 산출되는 보장산조면암에 대한 새로운 지구화학적 특징과 조구조 배경에 대해 논한다. 보장산조면암은 희토류 및 고장력 원소의 함량이 매우 풍부하며 거미도형에서 Nb의 이상치가 나타나지 않는 것이 특징인데, 이는 지각물질이 개입하는 호환성의 마그마 과정을 겪지 않았음을 암시한다. 이 조면암은 비유동적인 고장력 원소인 Nb-Y와 (Y+Nb)-Rb 상관도에 의하면 판내부 환경에서 생성된 것으로 판단된다. 또한 높은 Ga 함량은 전형적인 A-형 마그마의 특성을 잘 보여주고, Nb-Y-Ce과 Nb-Y-3Ga 삼각도에서 A1-형 영역에 속하며, Y-La-Nb 삼각도에서 판내부 대륙열곡에서 산출되는 알칼리암을 나타낸다. 이는 이들이 비조산성 대륙열곡 환경에서 맨틀근원물질로부터 나온 마그마의 분화작용으로 생성되었음을 의미한다. 이의 지구화학적 특징은 임진강대에서 보장산조면암이 페름-트라이아스기 송림조산운동동안 주 충돌작용 다음에 확장성 환경에서 발달하는 대륙열곡에서 맨틀유래 마그마작용에 의해 생성된 사건을 가리킨다. 이러한 자료는 임진강대를 북중국 및 남중국 지괴 사이의 칠링-다비-술루대의 연장부로 생각할 수 있게 한다.

핵심어: 임진강대, 보장산조면암, 지구화학적 특징, 대륙열곡, 확장성 환경

Abstract: We investigate geochemical and tectonic characteristics for the Triassic Bojongsan trachyte in the southern margin of the Imjingang belt. The geochemical signatures of the trachyte are characterized by enrichments of REE and HFS, and show no Nb trough, suggesting that would not experience arc magmatic processes involving continental crustal materials. The trachyte reveals within-plate setting in tectonic discrimination diagrams using immobile HFS Nb and Y elements. And the trachyte shows typical signatures of A-type volcanic rocks with high Ga abundance and is classified as A1-type volcanic rocks rich in Nb. The geochemical signatures suggest that the trachyte was produced by the differentiation of mantle-derived magmatism at the continental rift in extensional setting subsequent to a major collision during the Permo-Triassic Songrim orogeny. The results provide robust evidence to consider the Imjingang belt as an extension of the the Qinling-Dabie-Sulu belt between the North and South China blocks.

Keywords: Imjingang belt, Bojongsan trachyte, geochemical signatures, continental rift, extensional setting

*Corresponding author
Tel: +82-54-820-5469
E-mail: hwangsk@anu.ac.kr

서 언

알칼리 화성암은 일반적으로 확장성 혹은 비압축성 조구조적 배경에서 정치된다고 알려져 있다(Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1990, 1992). 이러한 배경은 비조산성 열곡 및 판내 마그마작용 혹은 지각누적 사건을 뒤따르는 후조산성 마그마작용을 포함한다. 이런 조구조적 배경에서, 확장성으로 지각이 얇아짐은 맨틀 상승 혹은 고철질 마그마 유입과 같은 심부 지열활동과 시공간적으로 밀접하게 관련되어 있다(Turner *et al.*, 1992; Tchameni *et al.*, 2001). 뜨거운 약권 맨틀의 상승은 알칼리 화성암의 형성에 필요한 열과 공급물질이 제공될 뿐만 아니라 지각물질이 부분용융되는 원인이 되기도 한다. 그러므로 특히 대륙 지역에서 알칼리 화성암의 산출은 열곡작용을 초래하는 상승 맨틀의 존재를 가리킨다(예, Li *et al.*, 2002).

한반도는 남립, 경기 및 영남육괴라는 3개의 선캠브리아기 강괴(cratonic blocks)로 구성되며(Fig. 1), 이들 모두는 페름-트라이아스기동안 '송림조산운동'에 의해 임진강 및 옥천 변동대를 통해 하나의 땅덩어리로 합체되었다(Lee, 1987). 송림조산운동 동안에 이 육괴들의 합체는 인도시니안(Indosinian) 조산운동 동안에 일어난 북중국과 남중국 간의 대륙충돌과 시간적으로 밀접하게 관련되어 있다(Yin and Nie, 1993; Li, 1994; Ernst and Liou, 1995; Ree *et al.*, 1996; Chough *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2000). 이 인도시니안 조산운동은 강력한 고압 광역변성작용의 특징을 지니고, 대륙충돌 후에 후조산성 알칼리 화성암을 종종 정치시켰다(예, Wu *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2005). 이 알칼리 화성암은 인도시니안 (칠링-다비-술루) 조산운동에서 안산 조산운동으로의 조구조 지배의 변화에 대한 결정적 시기를 제공하며, 이는 동아시아의 성장에 대한 조구조 지배를 이해하는데 있어서 매우 중요하다.

경기육괴에 인접하는 임진강대의 남변부에는 트라이아스기 알칼리 화성암이 소규모로 산출된다. 이 화성암은 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정에 의하면 트라이아스기 후엽으로 측정되었으며(Hwang *et al.*, 2017), 이전에 백악기 보장산안산암으로 기재되었지만(Kee *et al.*, 2008), 조성이 조면암에 속한다. 이 조면암은 조성이 판내(비조산성) 화성암과 유사하기 때문에, 대륙-대륙 충돌대에서 대륙 수렴에서 확장으로의 주요 지구동력적 전환을 알리는 지표로서 사용

될 수 있다. 따라서 알칼리 화성암의 산출은 임진강대의 충돌후 역사를 이해하는데 있어 조구조의 지지자로서 매우 중요하다. 이 논문에서 우리는 임진강대 남변부에서 산출되는 이 조면암에 대해 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대로부터 송림조산운동에 대한 조구조적 의미를 알아보고, 주원소 및 미량원소로부터 이 조면암이 어떤 조구조적 환경에서 만들어진 산물인지에 대하여 논의함으로써 보장산화산암과 주변의 임진강대 생성과 진화를 추론하고 더 나아가 동아시아 대륙과 한반도의 조구조 진화에 대한 의미를 탐색하고자 한다.

지질배경

임진강대와 접하는 경기육괴 북서부는 주로 고원생대 장락층군을 기반으로 하여 이를 관입한 신원생대 관입암류로 구성된다(Fig. 1). 장락층군에 속하는 흑운모 편암은 쇄설성 저어콘에서 SHRIMP U-Pb 연대 측정 결과 약 19억년으로 모암의 퇴적시기의 상한이 고원생대임을 알려준다(Kee *et al.*, 2008). 관입암류에서 감악산변성섬장암이 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 742 ± 13 Ma에 정치하였으며(Lee *et al.*, 2001), 화강편마암이 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 730.7 ± 19.6 Ma에 정치하였다(Kee *et al.*, 2008).

임진강대는 이들 선캠브리아 암석들 위에 부정합으로 데본기 연천층군의 변성퇴적암이 놓이고 이를 다시 부정합으로 덮는 트라이아스기의 김포층군으로 구성되고 보장산조면암에 의해 관입된다. 연천층군은 미산층에서 쇄설성 저어콘에 의한 퇴적 상한연대가 약 390 Ma로 알려져 있으며(Cho, 2007), 최고변성작용이 페름기 후엽-트라이아스기 초엽에 일어났다(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2001). 김포층군은 적성층에서 식물화석에 의해 트라이아스기 후엽에서 쥐라기 초엽으로 추정되고 있다(Yu *et al.*, 1992). 그리고 경기육괴와 임진강대는 쥐라기 흑운모 화강암이 184 ± 1.5 Ma에 정치하였으며(Kee *et al.*, 2005)며, 115~113 Ma에 백악기 철원층군에 의해 부정합으로 덮이고(Hwang *et al.*, 2011) 백악기 명성산화강암이 112 ± 2 Ma에 이들을 관입하였다(Hwang and Kihm, 2007).

경기육괴와 임진강대 간의 경계는 너비가 최고 약 5 km 범위를 가진 큰 규모의 확장성 전단대(경기전단대)에 의해 특징지어진다(Kim *et al.*, 2000). 감악산 변성섬장암은 지역적으로 압쇄암과 초압쇄암으로 특

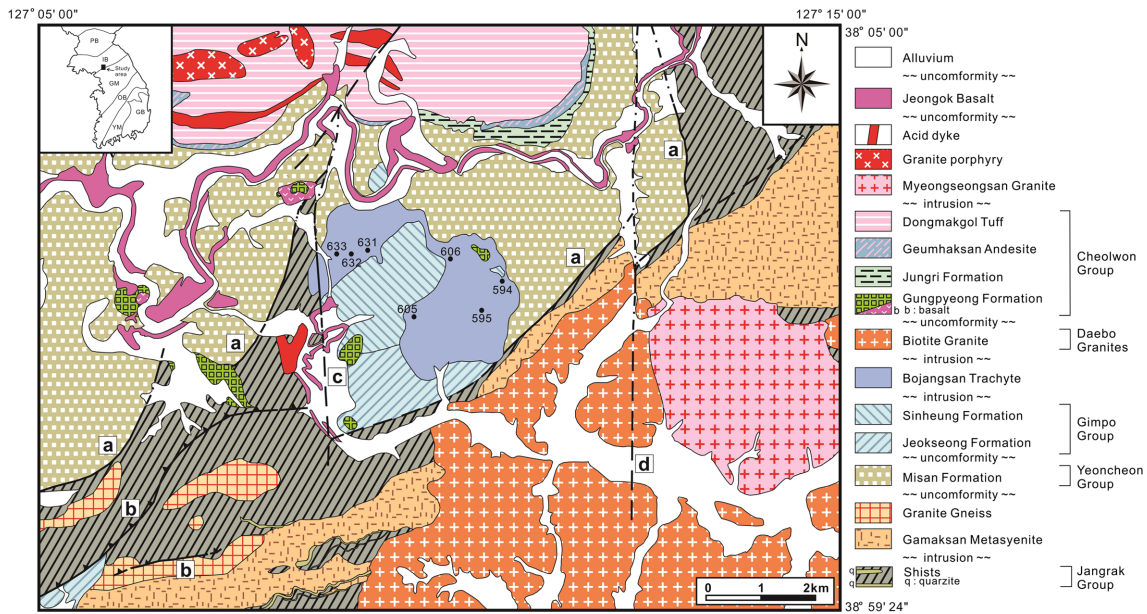


Fig. 1. Geological map around the Bojagsan trachyte showing sampling localities, compiled from Kee *et al.*(2005, 2008). A: Jeongok fault, B: Choseong thrust, C: Singo fault, D: Dongsong fault.

징지어지는 고변형대를 나타낸다. 확장성 전단운동의 연대는 변형된 변성-화성암에 대한 Rb-Sr 백운모 연대 (226±1 Ma)에 기초하면 트라이아스기 후엽인 것으로 해석된다(Kim *et al.*, 2000). 그러나 페름-트라이아스기 변성작용의 고기 결정연대는 석류석 각섬암에서의 Sm-Nd 석류석 연대(249±32 Ma)와 남정석 편암에서의 CHIME(chemical Th-U-total Pb isochron) 모나자이트 연대(255±8 Ma)에 의해 지시된다. 임진강대에서 관찰되는 주요 구조적 특징과 변성 특징은 중국의 칠링-다비-술루 충돌대에서 보고된 것들과 유사하며, 양대에서 신장성 선구조가 동일한 방향성을 나타낸다(Ree *et al.*, 1996; Faure *et al.*, 2001). 그래서 임진강대는 북중국과 남중국 지괴 간의 인도시니안 충돌대의 동쪽 연장부로 생각되어 왔다(Yin and Yie, 1993; Ree *et al.*, 1996; Kim *et al.*, 2000; Cho, 2001).

보장산조면암

야외관계

보장산조면암으로 부르는 알칼리 화산암은 임진강대의 남변부에서 산출된다(Fig. 1). 보장산조면암의 연대는 SHRIMP 저어콘 U-Pb 측정에 의하면 230.5±1.5 Ma로 계산되었다(Hwang *et al.*, 2017). 보장산조

면암은 임진강대에 놓이는 데본기 연천층군과 그 경계부의 전곡단층을 따라 연천층군 위에 부정합적으로 덮이는 트라이아스기 김포층군 사이에 관입되어있고, 김포층군의 퇴적 이후에 발생한 NNW-SSE 방향의 압축변형작용으로 ENE-WSW 방향의 초성드러스트에 의해 영향을 받는다(Kee *et al.*, 2005, 2008). 전곡단층은 신장성 연성전단작용에 의한 경기전단대가 형성된 이후에 지각의 상승에 수반되어 발생한 NS 방향의 신장성 변형작용의 산물이다. 그래서 이 조면암은 신장성 변형 사건에 대해 후조구조이고 송림조산운동(트라이아스기 화강암질암 관입) 사건에 대해 동시조구조적이다.

보장산조면암은 데본기 연천층군과 트라이아스기 김포층군을 관입했고 백악기 철원층군 궁평층에 의해 덮이는 돛상 화산암체이다(Fig. 1). 그리고 보장산조면암의 외곽부에서 접촉하는 연천층군은 미산층에서 분리한 쇄설성 저어콘의 SHRIMP U-Pb 연대가 447~397 Ma와 460~390 Ma로서 적어도 약 390 Ma 이후인 데본기 중엽에서 후엽에 퇴적되었다(Cho, 2007). 한편 보장산조면암과 접촉하는 김포층군은 식물화석에 의해 트라이아스기 후엽에서 쥐라기 초엽에 퇴적되었기(Yu *et al.*, 1992) 때문에, 송림조산운동에 대해 상대적인 퇴적 시기는 명확하지 않다.

보장산조면암 이외에, 남동부에서 산출되는 흑운모 화강암은 결정 연대가 SHRIMP 저어콘 U-Pb 연대가 184 ± 1.5 Ma로 나왔다(Kee *et al.*, 2005).

암석기재

보장산조면암은 보장산 주변에서 현저한 반상조직을 나타내는 돔상 관입체로 산출된다. 보장산조면암은 연천층군 미산층과 김포층군의 적성층 및 신흥층을 관입하기 때문에 이의 층서적 위치를 알 수 없기에 편이상 백악기에 포함시켰다(Kee *et al.*, 2008).

이 조면암은 큰 알칼리장석 반정을 많이 포함하여 용암류와 현저한 차이를 보여주며, 주변의 변성암류의 엽리를 변형시키고 자르는 관입관계를 나타낸다. 보장산 암체는 회색 내지 청회색을 띠지만 풍화면에서 회백색 내지 회갈색을 띠는 곳도 있다. 장석 반정은 크기가 2×4 mm 내외가 흔하고 최대 10×15 mm되는 것도 있으며 여러 결정이 합쳐진 취반정을 가지는 것도 있다. 경하에서 석기는 큰 반정 사이에서 장석 미정들이 조면상(trachytic) 내지 양모배열상(pilotaxitic) 조직을 보여주고 다소 변질된 고철질 광물들이 간상조직(intersertal texture)을 나타낸다.

보장산조면암은 부분적으로 철원층군의 궁평층에 의해 덮이며, 알칼리장석 반정이 풍부한 세립질의 반상 조면암에 해당한다. 이는 대체로 알칼리장석, 사장석, 소량의 석영, 흑운모, 각섬석, 저어콘, 인회석과 불투명광물로 구성된다. 이는 종종 방해석, 녹염석, 견운모와 녹니석의 2차광물을 가진다.

지구화학적 특징

보장산조면암에 대한 주원소는 부경대학교 공동실험관에서 SHIMAZU VF-320A X-선 형광 분광분석기를 이용하여 측정되었다. 미량원소는 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 Elan 6100 ICP-MS (Perkin-Elmer)에 의해 결정되었다. 약 100 mg의 전암분말은 비이커에 농축 HF-HClO₄ 혼합액에서 130°C 24시간 동안 용해되었다. 이것은 220°C에서 완전히 공기에 말리고, HF-HNO₃에서 다시 용해시켰으며, 고온 판에서 증발시켰다. 그리고 마지막 침전물은 ICP-MS 분석을 위해 묽은 HNO₃에서 용해시켰다.

주원소와 암석분류

보장산조면암에 대한 주원소와 미량원소 자료는

Table 1에 나타났다. 보장산조면암은 SiO₂가 58.05~64.59 wt% 범위로서 대부분 중성암에 해당된다. 이들은 Na₂O+K₂O 함량이 8.06~11.42 wt% 범위(K₂O=4.12~8.66 wt%, Na₂O=1.75~3.94 wt%)로서 비교적 높은 알칼리 함량을 가진다. 그래서 이들의 대부분은 실리카에 대한 총알칼리 그림에서 모두 조면암 영역에 떨어진다(Le Maitre, 1984; Le Bas *et al.*, 1986)(Fig. 2a). 비유동적이라고 알려진 고장력 원소들을 이용한 화산암의 분류도인 Zr/TiO₂-Nb/Y 그림(Winchester and Floyd, 1977)에서 보장산조면암은 모두 조면암 영역에 도시된다(Fig. 2b).

보장산조면암은 일반적으로 Fe₂O₃=2.70~5.54 wt%, MgO(0.52~0.82 wt%), CaO(1.36~2.29 wt%)로서 Fe 함량이 비교적 적은 편이다. 보장산조면암은 상당히 높은 Al₂O₃ 함량(16.55~20.15 wt%)을 가지기 때문에

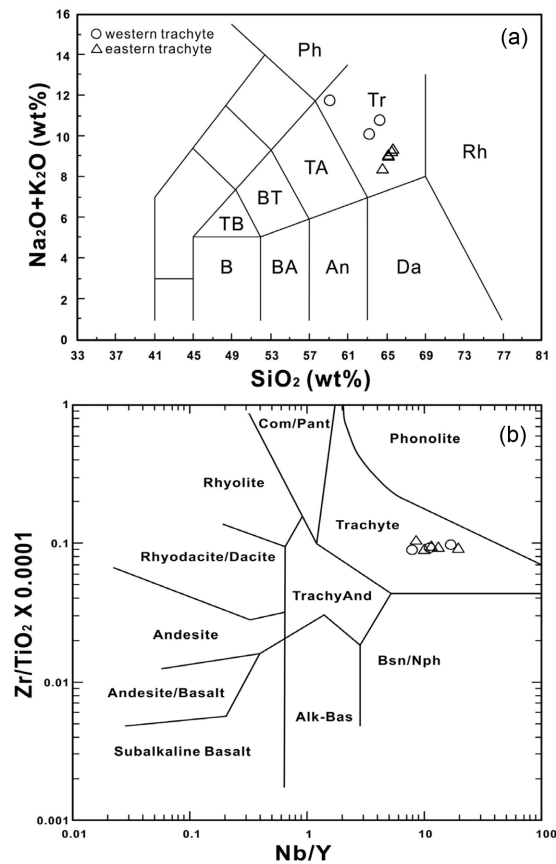


Fig. 2. Classification of the Bojongsan trachyte on the basis of (a) TAS diagram(after Le Maitre, 1984) and (b) Zr/TiO₂-Nb/Y diagram(after Winchester and Floyd, 1976).

Table 1. Major and trace element composition of the Bojongsan trachyte

Sample No.	Western trachyte			Eastern trachyte				
	YC631	YC632	YC633	YC594	YC595	YC605	YC606	YC699
wt %								
SiO ₂	58.05	60.59	63.36	63.73	63.88	64.59	62.20	63.88
TiO ₂	0.93	0.85	0.81	0.81	0.80	0.76	0.86	0.86
Al ₂ O ₃	20.15	18.96	17.88	18.03	17.96	17.17	16.55	17.98
Fe ₂ O ₃	4.25	2.70	2.72	3.94	3.33	3.79	5.54	3.95
MgO	0.82	0.53	0.56	0.74	0.52	0.06	0.79	0.75
MnO	0.05	0.04	0.07	0.05	0.04	0.62	0.09	0.06
CaO	2.01	2.24	2.29	1.39	1.36	2.20	2.01	1.37
Na ₂ O	2.76	2.24	3.61	1.82	3.49	2.68	3.94	1.75
K ₂ O	8.66	7.35	6.91	7.03	5.57	6.42	4.12	7.09
P ₂ O ₅	0.26	0.25	0.22	0.24	0.20	0.21	0.21	0.25
L.O.I	3.53	4.12	1.40	2.06	2.65	1.37	1.98	1.85
Total	99.91	99.86	99.83	99.84	99.82	99.87	99.84	99.79
ppm								
Li	7.77	4.61	10.62	13.67	10.53	13.79	23.98	14.68
Sc	10.06	4.58	4.41	10.81	9.54	7.51	7.53	5.85
V	26.71	26.48	23.76	26.28	26.35	20.24	32.32	27.00
Cr	54.91	35.33	122.60	132.63	110.02	242.11	172.38	155.49
Co	6.12	4.56	5.17	6.85	3.64	6.04	10.62	6.63
Ni	9.97	6.95	13.19	17.86	12.56	30.86	18.93	12.75
Cu	27.59	21.60	26.17	37.67	20.17	34.69	8.61	33.31
Zn	52.25	35.31	51.28	19.11	39.46	21.01	47.83	18.40
Ga	34.24	32.92	27.87	28.18	26.21	26.57	29.59	27.97
Rb	299.22	346.72	262.88	237.96	247.65	242.78	119.31	239.55
Sr	467.00	176.36	612.39	237.65	219.56	443.26	609.81	134.96
Ba	2445.87	2410.49	2290.93	1939.74	1629.44	2122.45	1700.86	1905.00
Y	16.66	9.92	20.45	13.72	10.71	19.25	21.87	8.32
Zr	859.31	828.83	717.99	775.89	761.01	808.72	783.75	800.75
Nb	186.64	169.93	160.72	156.67	141.31	163.20	218.01	161.18
Mo	1.12	1.08	3.15	3.43	1.82	3.32	4.38	1.30
Cs	8.05	8.15	5.02	4.37	6.08	4.21	3.72	4.41
Hf	16.95	15.48	14.13	15.68	16.12	15.65	16.28	14.78
Ta	34.78	30.30	29.50	34.26	31.12	29.55	291.01	31.03
Pb	54.16	34.42	189.91	21.21	47.94	44.45	63.93	18.18
Th	30.97	20.12	36.73	20.41	11.92	32.64	39.41	8.65
U	4.78	2.52	6.14	3.81	1.69	4.80	20.39	1.76
La	94.04	75.20	118.52	61.40	39.88	99.16	148.60	24.89
Ce	207.51	180.36	248.85	116.84	71.99	211.40	291.80	46.66
Pr	15.73	11.72	18.68	10.46	6.23	16.39	23.42	4.36
Nd	51.62	37.34	60.28	34.51	21.13	53.33	76.62	14.68
Sm	7.29	4.56	8.29	5.03	3.12	7.35	9.79	2.20
Eu	1.16	0.73	1.40	0.79	0.63	1.32	1.70	0.33
Gd	4.55	2.63	5.23	3.53	2.40	4.79	6.22	1.72
Tb	0.61	0.37	0.73	0.48	0.32	0.70	0.85	0.25
Dy	3.51	2.03	4.06	2.85	1.95	4.07	4.55	1.57
Ho	0.64	0.40	0.74	0.54	0.39	0.74	0.83	0.32
Er	1.95	1.23	2.17	1.62	1.21	2.18	2.31	1.04
Tm	0.27	0.17	0.30	0.24	0.17	0.29	0.31	0.15
Yb	1.92	1.14	2.00	1.57	1.25	2.05	2.09	1.17
Lu	0.26	0.17	0.29	0.25	0.19	0.30	0.30	0.16
ΣREE	391.04	318.05	471.53	240.11	150.86	404.06	569.37	99.51
(La/Lu) _n	37.33	45.11	42.79	25.74	21.59	33.95	51.58	15.73
(Ce/Yb) _n	27.55	40.26	31.57	18.88	14.68	26.20	35.59	10.16
(Eu/Eu*) _n	0.57	0.59	0.61	0.55	0.68	0.64	0.62	0.50

모두 과알루미나성을 나타낸다. 그리고 이 조면암은 (Na₂O+K₂O)-SiO₂ 구분도(Irvine and Baragar, 1971)에서 모두 알칼리 계열에 속한다(Fig. 3a). TAS 분류도에서 화산암류의 계열은 실리카의 포화도에 따라 달라지며, 이는 K₂O와 Na₂O의 알칼리에 의해 좌우된다고 말할 수 있다. 그래서 알칼리 계열은 전통적으로 K₂O와 Na₂O의 상대적인 양에 따라 Na 및 K 계열(혹은 타입)로 세분되어 왔는데, 보장산조면암은 모두 K 계열에 도시된다(Fig. 3b). 현실화된 Na₂O-2.0>K₂O 혹은 Na₂O-2.0<K₂O의 구분기준(Le Bas *et al.*, 1986)에 따르면이라도 모두 K 계열에 도시된다(Fig. 3b). 결과적으로 이들 구분도에서 보장산조면암의 성격은 조산대 화산암에 속하지 않는다는 것이고 판내부 혹은 열곡대의 화산암에 해당되는 것을 암시한다.

미량원소

보장산조면암은 원시맨틀로 표준화된 친액원소를

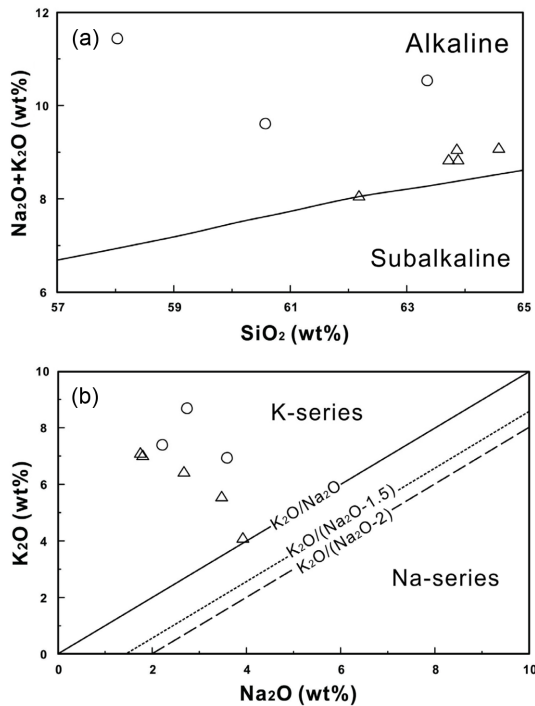


Fig. 3. Rock series of the Bojangan trachyte on the basis of (a) Na₂O+K₂O versus SiO₂ diagram showing alkaline series(after Irvine and Baragar, 1971); (b) K₂O versus Na₂O diagram showing the subdivision of the alkalic series into K and Na subseries. The boundary line K₂O/(Na₂O-1.5) are designed from Le Maitre(1984) and K₂O/(Na₂O-2), from Le Bas *et al.*(1986).

친액 정도가 감소하는 순서로 배열된 거미도(Sun and McDonough, 1989)에서 일반적으로 친액원소가 매우 높게 나타난다(Fig. 4). 또한 친액 정도가 감소하면서 부화 정도는 연속적으로 감소하는 양상을 보인다. Ta, Pb, Zr의 경우 인접한 친액 정도가 비슷한 원소들에 비해 높은 함량을 보이며, 반면에 Ce와 Sr의 경우 인접한 원소들에 비해 상당히 낮은 함량을 보인다. 이는 Ce 및 Sr을 선택적으로 가져가는 장석의 분별 작용과 관련있는 것으로 생각된다.

이 연구의 보장산조면암은 거미도에서 Nb 및 Ta가 La 등 인접원소와 비교시 별다른 이상을 보이지 않음이 특징할만하다. 도호지역의 화성암이나 대륙지각의 암석들은 일반적으로 Nb가 부(-)의 이상치를 보이는데, 반면에 보장산조면암이 전혀 그렇지 않은 것은 대륙연변부의 화산호 환경에서 만들어진 암석이 아님을 암시한다.

희토류원소

보장산조면암은 콘드라이트로 표준화한 REE 패턴에서 (La/Lu)_N 비가 37.3~45.1 범위로서 높은 LRRE 농집을 나타내고 현저한 정(+)의 Eu 이상(Eu/Eu*=0.57~0.61)을 보여준다(Fig. 5). HREE는 콘드라이트의 수10 배로 부화되는 경우가 일반적이지만 보장산조면암에서는 Lu이 콘드라이트의 5배 이하에 달하는 것도 있다.

보장산조면암은 다소 깊은 Eu 부(-)이상을 나타내는데(Fig. 5), 서부 조면암에서 Eu/Eu* 비가 0.57~0.61 범위이고 동부 조면암에서 0.50~0.68 범위이다. 즉 서부 조면암은 Eu 부이상이 매우 비슷하지만 동부 조면암은 Eu 부이상이 매우 작거나 아예 없는 것에

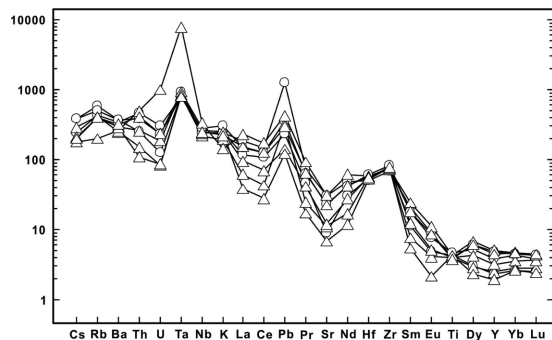


Fig. 4. Trace element spider diagrams for the Bojangan trachyte normalized to primitive mantle values(Sun and McDonough, 1989).

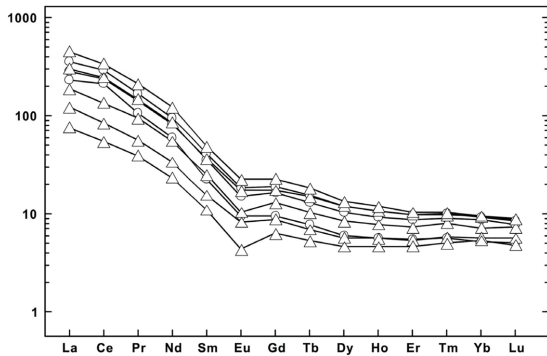


Fig. 5. Rare earth element patterns for the Bojongsan trachyte normalized to Chondrite values(Nakamura, 1974). Symbols as in Fig. 2.

서부터 다소 큰 것까지 큰 범위를 나타낸다(Fig. 5). 이러한 차이는 보장산조면암이 다른 조성을 갖는 모 마그마로부터 진화한 암석이라기 보다는 Eu 부이상 을 가지는 장석의 분화가 현저하게 일어나기 전의 초기 마그마 분화단계를 나타내는 암석이라는 것을 암 시한다. 왜냐하면 서부 조면암이 동부 조면암과 마찬가지로 높은 희토류원소 및 고장력 원소들의 함량 등 과 같은 여러 가지 공통적인 지화학적 특징을 가지는 반면에, SiO₂ 함량이 모두 비교적 적은 중성암의 조 성을 보이기 때문이다.

조구조환경 판별도

보장산조면암은 조구조환경 판별을 위한 Nb-Y 상 관도(Pearce *et al.*, 1984)에서 모두 판내부 환경에 도시되며(Fig. 6a), 알칼리원소를 포함하는(Y+Nb)-Rb 상관도(Pearce *et al.*, 1984)에서도 모두 판내부 환경 에 도시된다(Fig. 6b). 이와 같이 보장산조면암은 중 성 내지 규장질암을 위한 조구조 판별도에서 판내부 환경을 나타낼 뿐만 아니라 현무암질 암석을 위한 조 구조 판별도인 Zr-Th-Nb와 Hf-Th-Nb 삼각도(Wood, 1980)에서 대개 판내부 알칼리 현무암 및 분화물을 나타낸다(Fig. 7a, b).

보장산조면암에서 10,000 Ga/Al 비는 대략 750~950 범위이고 평균 약 850을 가진다. 이 평균값은 A-형 화강암질암에 대한 세계 평균값 3.75(Whalen *et al.*, 1987)보다 훨씬 더 높다. 어떤 주원소 및 미량원소에 대한 Ga/Al 그림에서, 보장산조면암은 이들의 높은 Ga/Al 비에 의해 기타 화강암 타입과 확실하게 구별 되는 비조산성 A-형 화산암을 나타내며(Fig. 8a), 고

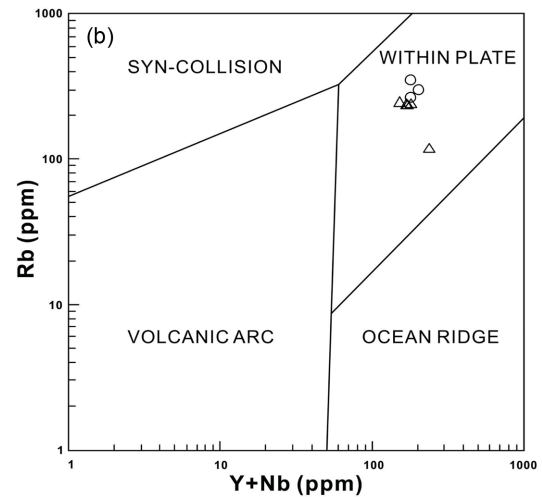
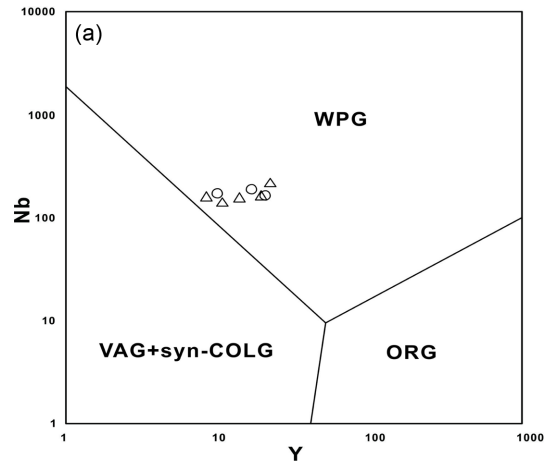


Fig. 6. Nb versus Y, and Rb versus Y+Nb tectonic discrimination diagrams for the Bojongsan trachyte plotted on within-plate setting(after Pearce *et al.*, 1984).

장력원소의 비가 도호현무암(IAB)과 완전히 다른 해양도현무암(OIB)과 가까운 원소비를 나타낸다(Fig. 8b).

Eby(1992)는 Nb-Y-Ce과 Nb-Y-3Ga 삼각도를 이용하여 A-형 화성암을 A1과 A2로 더 구분하였다. A1 군은 대륙열곡에 정치하거나 혹은 판내 화성작용 (magmatism) 동안 해양도현무암과 유사한 근원지로부터 나온 마그마의 분화물을 나타내며, 반면에 A2군은 대륙충돌 혹은 도호 화성작용을 통해 대륙지각에서 유래하는 마그마를 나타낸다. 보장산조면암은 이 구분도에 도시하면 대륙열곡 혹은 판내 화성작용을

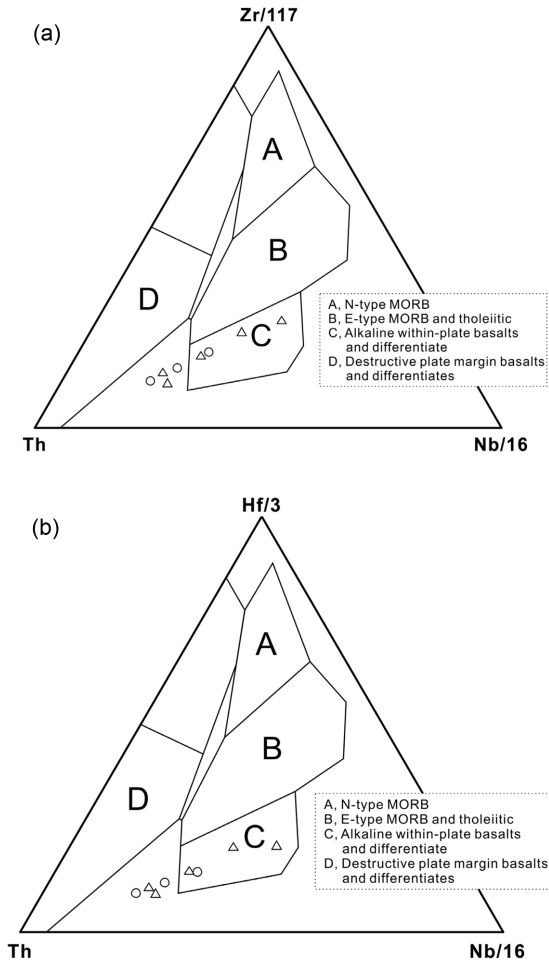


Fig. 7. Zr-Th-Nb and Hf-Th-Nb tectonic discrimination diagrams for the Bojongsan trachyte plotted in alkaline within-plate basalts and differentiates field(Wood, 1980).

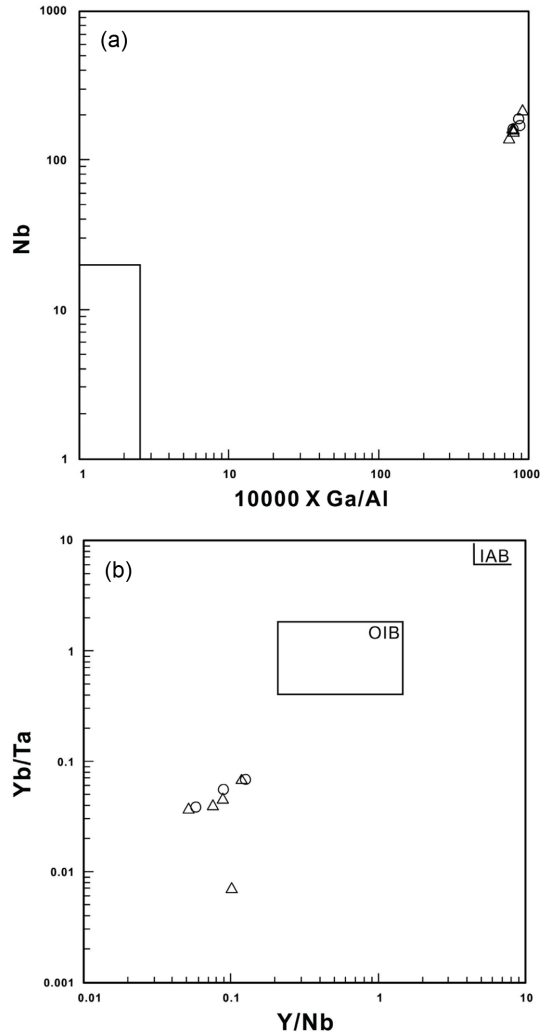


Fig. 8. Nb-Ga/Al and Yb-Ta-Y/Nb diagrams for the Bojongsan trachyte(after Whalen *et al.*, 1987).

통해 해양도 화산암과 유사한 마그마 분화물을 나타내는 A1 타입에 속한다(Fig. 9a, b). 따라서 보장산조면암은 Y-La-Nb 삼각도(Cabanis and Lecolle, 1989)에서 대륙열곡에서 산출되는 알칼리암을 나타낸다(Fig. 10). 그러므로 보장산조면암은 대륙열곡이 발달하는 비조산성 환경으로부터 생성된 알칼리 마그마로부터 유래한 분화물인 것으로 판단된다.

위에서 기재된 모든 지구화학적 특징에 의하면, 임진강대에서 산출되는 보장산조면암은 주요 지각누적(조산성) 사건 후에 정치되었던 대륙열곡 화산암이라는 것을 지시한다.

토 의

화성활동의 성인

임진강대 남변부에서 보장산조면암의 가장 특징적인 조성은 알칼리 원소 및 고장력 원소들의 함량이 매우 높다는 것이다. 이러한 조성은 앞에서 조구조 판별도에 의해 판내부 환경에 도시되는 바와 같이 비조산성 마그마에서 전형적으로 나타나는 현상이기도 하다. 판내부 환경은 다른 말로 하면 비조산운동(anorogenic) 구역이라는 의미이기 때문에 전형적인 A-형 마그마에 속하는지 검토해볼 필요가 있다. 이를

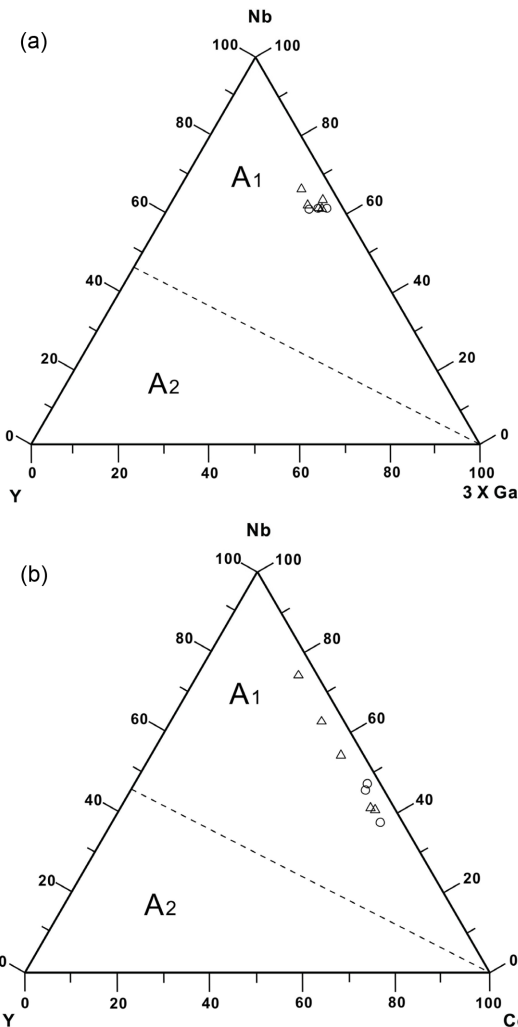


Fig. 9. Nb-Y-Ga and Nb-Y-Ce tectonic discrimination diagrams for the Bojangan trachyte plotted in A1 type(after Eby, 1992).

확인하기 위해 Ga/Al 비율과 다른 원소들의 함량관계로부터 A-형 마그마를 판별하는 그림(Whalen *et al.*, 1987)에 도시하였다(Fig. 8). 그 결과 보장산조면암은 높은 Ga/Al 비율과 높은 Nb 및 Th 함량 등과 같은 전형적인 A-형 화성암의 영역(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987)에 도시됨을 확인할 수 있다. A-형 마그마작용을 다시 세분한 Eby(1992)의 지구화학적 기준에 따르면 이들은 A1-형 화성암의 영역에 속한다(Fig. 9). Eby(1992)에 따르면 A1-형 화성암은 주로 열곡대와 같은 곳에서 발달하는 것으로 알려져 있으며, 해양도 현무암(oceanic island basalt)

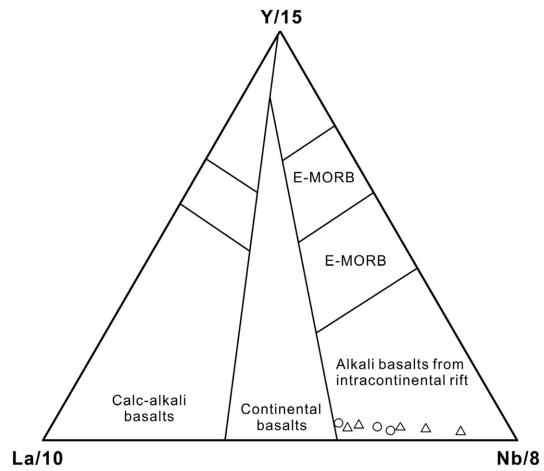


Fig. 10. Y-La-Nb tectonic discrimination diagram for the Bojangan trachyte plotted in alkaline basalts from intracontinental rift(after Cabanis and Lecolle, 1989).

과 유사한 근원물질로부터 유래한 마그마의 분화물을 나타낸다고 한다. 이는 대륙간 충돌이나 도호환경의 마그마작용을 통해 대륙지각의 용융으로 만들어지는 A2-형과는 전혀 다른 환경이다.

조구조적 의미

대륙열곡 내의 화성암대에서 발견되는 A형의 규장질 암석의 성인으로 여러 가지가 제안되었다. 가장 흔히 언급되는 것이 지각 및 맨틀 근원의 용융 혹은 현무암질 마그마의 분별정출 및 지각 암석의 동화작용이다(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987; Eby, 1992; Bohrsen and Reid, 1997; Barbarin, 1999; Tura *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2002; Peccerillo *et al.*, 2003). 보장산조면암은 Eby(1992)의 A1-형 영역에 속하기 때문에 맨틀에서 유래한 마그마의 분화물일 가능성을 지지한다. 또한 지각물질의 개입시 나타나는 Nb 이상이 나타나지 않는 것은 고도로 진화된 대륙지각 물질이 개입되지 않았음을 나타낸다. 즉 보장산조면암은 판내부의 대륙열곡대에서 상부맨틀 물질로부터 분화된 산물임을 나타낸다.

이와 같이 보장산조면암이 나타내는 A1-형 화성활동은 임진강대의 당시 조구조적 환경을 알려주는 매우 중요한 단서를 제공한다. 주변지역의 중생대 트라이아스기 알칼리 화성활동을 살펴보면 옥천변성대에서도 트라이아스기 알칼리 화성활동이 보고되었으며(Cho *et al.*, 2008), 남중국에도 약 226~211 Ma 경

에 후조산성 확장 환경에서 알칼리 화성암체에 의해 지시된다(Chen *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007). 이러한 시기적, 지화학적 유사성은 이들이 성인적으로 관련있음을 암시한다.

보장산조면암은 대륙의 열곡환경에서 상승하는 맨틀기원 마그마의 분화로 생성된 것으로 해석되기 때문에 이들이 생성된 230.5±1.5 Ma 시기에 현저한 조구조적 사건으로서 후충돌 확장 환경과 관련된다고 해석된다.

더욱이 경기육괴 내외 주변에서 트라이아스기 섬장암-몬조니암-몬조섬록암-반려암의 심성암류는 지화학적으로 고-K 칼크알칼리와 쇼쇼나이트 계열에 속하며 후충돌 마그마작용에 의한 것으로 해석하였다(Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011a, b). 이들은 아마도 조산성 사건에서 비조산성 사건으로 전이되는 동안 후조산성 용기의 절정기를 분리시키는 이완기 동안에 하부지각 혹은 암권 맨틀에서 유래되었다(Fowler *et al.*, 2001; Qian *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2009). Peng *et al.*(2008)은, 몬조니암-반려암-섬록암 계열과 함께, 북중국 지괴의 남변부와 북연부를 따르는 섬장암체(ca. 240~190 Ma)를 기재하였으며, 이들 심성암류가 북중국 지괴의 남변부와 북연부를 따르는 트라이아스기 후충돌 마그마작용의 산물이라고 제안하였다. 그러므로 이러한 자료는 보장산조면암을 포함하는 당시의 임진강대가 남중국과 북중국 사이의 칠링-다비-술루대의 연장부로 생각할 수 있는 강한 증거를 제공한다.

송림조산운동에서의 가치

송림조산운동은 강한 중 내지 고압 광역변성작용의 특징을 가지고 임진강대에서 경기육괴를 지나 옥천대까지 뻗치며, 페름기 초엽(ca. 290 Ma)에 시작되어 트라이아스기(ca. 255 to 225 Ma)에 절정을 이루었다(Cho *et al.*, 2008). 송림조산운동은 한반도의 중생대 조구조 진화에서 중요하게 다루어지지 않았다. 그러나 과거 수10년 동안, SHRIMP U-Pb 저어콘 연령 측정과 같은 많은 지연대학적 연구들은 주요 광역변성작용이 대보조산운동 전에 약 250~220 Ma까지 경기육괴 뿐만 아니라 임진강 및 옥천대에서 일어났음을 인식하였다(Chough *et al.*, 2000; Ree *et al.*, 2001).

한편 현재 한반도 형성에 상응하는 합체과정은 광역적 송림조산운동 지배하에서 여러 국지적 조구조

상들을 포괄하는 시간적 변화인 것으로 생각하였다(Cho *et al.*, 2008). 예를 들면, 경기육괴에서 광역변성작용은 동쪽 오대산과 서쪽 홍성 지역에서 각각 248~245 Ma와 235~223 Ma 동안에 일어났다(Oh *et al.*, 2005, 2006; Kim *et al.*, 2006). 경기 및 낭림 육괴를 합체시킨 임진강대에서, 광역변성작용의 시기는 255~249 Ma에 일어난 것으로 평가되었다(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2005). 경기 및 영남육괴를 합체시킨 옥천변성대에서 조산운동은 송림조산운동의 중심 상(250에서 220 Ma)보다 약 40 내지 20 Ma 더 먼저 일어났기(Cho and Kim, 2005) 때문에 송림조산운동의 시작으로 보았다(Cho *et al.*, 2008). 그래서 임진강대 및 옥천변성대와 마찬가지로 경기육괴에서 모든 국지적인 조구조 사건은 페름-트라이아스기 동안 한반도 육괴들 간에 연속적 지역부가(terrane accretion)에 관련되는데, 이는 송림조산운동의 일부로 간주하였다(Cho *et al.*, 2008).

또한 한반도의 여러 조구조 단위에서의 심성암류로부터 SHRIMP U-Pb 저어콘 연령은 페름-트라이아스기 마그마 사건을 특징지을 수 있다. 즉 이들 자료는 경기육괴에서 233~226 Ma, 옥천대에서 231~219 Ma, 영남육괴에서 240~213 Ma의 마그마 맥동을 지시한다. 특히 경기육괴에서 홍성 섬장암 및 화강암은 233~226 Ma(Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011b), 양평 석영몬조니암 내지 석영섬장암 및 반려암은 232~231 Ma(Williams *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011b)를 오대산 몬조섬록암은 227 Ma를 나타내며, 임진강대에서 해주 섬장암은 224 Ma를 보여준다(Peng *et al.*, 2008). 이와 같은 경기육괴의 트라이아스기 후엽 심성암류는 지화학적으로 고-K 칼크알칼리와 쇼쇼나이트 성격으로서 후충돌 마그마 사건을 암시한다(Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011a, b). 왜냐하면 대륙충돌대에서는 풍부한 고-K 칼크알칼리 화강암질암이 충돌 후기 내지 후충돌 배경에서 먼저 정치되고 이어서 쇼쇼나이트 혹은 알칼리-과알칼리 화강암질암이 뒤따르기 때문이다(Liegeois *et al.*, 1998).

보장산조면암은 판내 열곡성 화성암 특징을 가지기 때문에, 그 정치 연대(230.5 Ma)는 지역부의 종말과 확장 조구조의 시작을 표시하는 것으로 해석된다. 보장산조면암은 송림조산운동의 연천층군 변성작용(Ree *et al.*, 1996; Cho *et al.*, 2005)보다 후에 정치되었

으며, 대보조산운동의 주 연성전단작용(Kwon and Ree, 1997)보다 앞서 일어났을 뿐만 아니라 경기전단대에서의 압쇄암(Kim *et al.*, 2000)보다 앞서는 것 같다. 여기서 이들은 한반도에서 대륙충돌 조구조지배(송림조산운동)에서 대양-대륙 섭입 조구조지배(대보조산운동)로의 변화를 가리켜준다. 임진강대에서 조산작용 직후에 열곡성 확장의 시기는 역시 페름-트라이아스기 전엽의 충돌 변성작용을 뒤따르는 경기육괴의 빠른 확장성 용기에 조합된 경기전단대에서 나온 압쇄암의 Rb-Sr 백운모 연대(226 Ma)에 의해서도 확인된다(Kim *et al.*, 2000).

송림조산운동의 기간은, 옥천변성대에서 페름기 전엽(약 290 Ma)에 시작되었고 한반도 중부에서 약 255~225 Ma 시기에 절정에 달했으며 약 230 Ma 즈음에 보장산조면암의 정치로 후조산성 확장성 환경으로 전이되기 시작하였는데, 이는 중국 중앙부에서 칠링-다비-술루 조산운동의 기간보다 약간 앞서는 것으로 생각된다.

결 론

임진강대 남부에서 보장산조면암은 모두 조면암의 화학조성을 가지며, 희토류 및 고장력 원소의 함량이 매우 높은 것이 특징이다.

거미도형에서 Nb의 이상치가 나타나지 않으며 이는 이들의 생성에 지각물질이 개입되지 않았음을 나타낸다. 즉 호환성의 마그마작용이나 대륙지각의 재용융과 같은 과정을 겪지 않았음을 말해준다. 이 조면암은 비유동적인 고장력 원소인 Nb-Y와 (Y+Nb)-Rb 상관도에 의하면 판내부 환경에서 생성된 것으로 판단된다.

또한 높은 Ga 함량은 전형적인 A-형 마그마의 특성을 잘 보여주고, Nb-Y-Ce과 Nb-Y-3Ga 삼각도에서 A1-형 영역에 속하며, Y-La-Nb 삼각도에서 판내부 대륙열곡에서 산출되는 알칼리암을 나타낸다. 이는 이들이 비조산성 대륙열곡 환경에서 맨틀근원물질로부터 나온 마그마의 분화작용으로 생성되었음을 의미한다.

이 지화학적 특징은 임진강대에서 보장산조면암이 페름-트라이아스기 송림조산운동 동안 주 충돌작용 다음에 확장성 환경에서 발달하는 대륙열곡에서 맨틀유래 마그마작용에 의해 생성된 사건을 가리킨다. 또한 이러한 자료는 임진강대를 북중국 및 남중국 지괴 사

이의 칠링-다비-술루대의 연장부로 생각할 수 있는 강한 증거를 제공한다.

사 사

이 논문에서 지원소는 부경대학교 공동실험관에서 X-선형광분석기에 의해 분석되었고 미량원소 및 희토류원소는 한국기초과학지원연구원 오창본원에서 ICP-MS에 의해 측정되었다. 심사과정을 통해 논문의 오류를 지적해주신 경북대 장윤득 교수와 익명의 심사위원께 감사한다. 그림제작에 있어서 암석학 연구실 이소진 양의 도움이 있었다.

References

Barbarin, B., 1999, A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46, 605-626.

Bohrson, W.A. and Reid, M.R., 1997, Genesis of peralkaline volcanic rocks in an ocean island setting by crust melting and open-system processes: Socorro Island, Mexico. *Journal of Petrology*, 38, 1137-1166.

Cabanis, B. and Lecolle, M. 1989. Le diagramme La/10Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des séries volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *C. R. Acad. Sci. Ser. II A Sci. Terre Planetes* 309: 2023-2029.

Chen, J.F., Xie, Z., Li, H.M., Zhang, X.D., Zhou, T.X., Park, Y.S., Ahn, K.S., Chen, D.G., and Zhang, X., 2003, U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochemical Journal*, 37, 35-46.

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., 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. *Geological Society of Korea, Abstract*, 56, p.89.

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.

Cho, D.-R., Kwon, S.-T., Jeon, E.-Y., and Armstrong, R., 2005, SHRIMP U-Pb zircon ages of metamorphic rocks from the Samgot unit, Yeoncheon complex in the Imjin-

- gang belt, Korea: Implications for the Phanerozoic tectonics of East Asia. Abstract Program, 37, Geological Society of America, p.388.
- Cho, M., 2001. A continuation of Chinese ultrahigh-pressure belt in Korea: evidence from ion microprobe U-Pb zircon ages. *Gondwana Research*, 4, 708.
- Cho, M. and Kim, H., 2005, Metamorphic evolution of the Ogcheon belt, Korea: a review and new age constraints. *International Geology Review*, 47, 41-57.
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Pak, S.J., and Kim, S.W., 2009, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *Island Arc* 18, 266-281.
- 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 Science Review*, 52, 175-235.
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J., and Chappell, B.W., 1982, Nature and origin of A-type granite with particular reference to Southeastern Australian. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 8, 189-200.
- Eby, G.N., 1990, The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26, 115-134.
- Eby, G.N., 1992, Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20, 641-644.
- Ernst, W.G. and Liou, J.G., 1995, Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, 23, 353-356.
- Faure, M., Lin, W., Le Breton, N., 2001, Where is the North China-South China block boundary in eastern China? *Geology*, 29, 119-122.
- Fowler, M.B., Henney, P.J., Rogers, G., Watt, G.R., and Friend, C.R.L., 2001, Petrogenesis of high Ba-Sr granites: the Rogart pluton, Sutherland. *Journal of the Geological Society of London* 158, 521-534.
- Hwang, J.H. and Kihm, Y.H., 2007, Geological report of the Jipori Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 54p.
- 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 Petrological Society of Korea*, 20, 231-241 (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Kee, W.-S., and Yi, K., 2017, SHRIMP zircon dating and stratigraphic implications of the Bojongsan Trachyte in the Imjingang Belt, Korea. *Journal of Petrological Society of Korea*, 53, 423-432 (in Korean with English abstract).
- 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, 66p.
- 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, 83p.
- Kim, J.N., Ree, J.-H., Kwon, S.T., Park, Y., Choi, S.-J., and Cheong, C.-S., 2000, The Kyeonggi shear zone of the central Korean peninsula: Late orogenic imprint of the North and South China collision. *Journal of Geology*, 108, 469-478.
- Kim, J., Yi, K., Jeong, Y.-J., and Cheong, C.-S., 2011a. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Mesozoic high-K granitoids in the central Korean peninsula. *Gondwana Research*. doi:10.1016/j.gr.2010.12.005.
- Kim, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.-J., and Santosh, M., 2011b, Geotectonic framework of Permian-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, 20, 865-889.
- Kim, S.W., Oh, C.H., Williams, I.S., Rubatto, D., Ryu, I.C., Rajeshi, V.J., Kim, C.-B., Guo, J., and Zhai, M., 2006, Phanerozoic high-pressure eclogites and intermediate-pressure granulite facies metamorphism in the Gyeonggi massif, South Korea: implications for the eastward extension of the Dabie-Sulu continental collision zone. *Lithos*, 92, 357-377.
- Kwon, S.-T. and Lee, J.-H., 1997, A note on the age of the Honam shear zone. *Journal of the Geological Society of Korea*, 33, 183-188 (in Korean with English abstract).
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., and Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- Le Maitre, R.W., 1984, A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram. *American Journal of Earth Sciences*, 31, 243-255.
- Lee, D.S., 1987, *Geology of Korea*. Kyohak-sa, Seoul, 514p.
- Lee, S.R., Cho, M., Yi, K.-W., and Stern, R., 2000, Early Proterozoic granulites in central Korea: tectonic correlation with Chinese cratons. *J. Geol.* 108, 729-738.
- Lee, S.R., Cho, M., Hwang, J.H., Lee, B.-J., Kim, Y.-B., and Kim, J.C., 2001, Crustal evolution of the Gyeonggi massif, South Korea: Nd isotopic evidence and implications for continental growths of East Asia. *Precambrian Research*.
- Li, X.-H., Li, Z.X., Zhou, H., Liu, Y., and Pinny, P.D., 2002, U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113, 135-154.
- Li, Z.X., 1994, Collision between the North and South

- China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 22, 739-742.
- Liegeois, J.-P., Navez, J., Hertogen, J., and Black, R., 1998, Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids. The use of sliding normalization. *Lithos*, 45, 1-28.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Choi, S.J., Zhai, M., Guo, J., and Sajeev, K., 2005, First finding of eclogites facies metamorphic event in South Korea and its correlation with the Dabie-Sulu collision belt in China. *Journal of Geology*, 113, 226-232.
- Oh, C.W., Kim, S.W., and Williams, I.S., 2006, Spinel granulite in Odesan area, South Korea: tectonic implications for the collision between the North and South China blocks. *Lithos*, 92, 557-575.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956-983.
- Peccerillo, A., Barerio, M.R., Yirgu, G., Ayalew, D., Barbieri, M., and Wu, T.W., 2003, Relationship between mafic and peralkaline felsic magmatism in continental rift settings: a petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa Volcano, Central Ethiopian Rift. *Journal of Petrology*, 44, 2003-2032.
- Peng, P., Zhai, M., Guo, J., Zhang, H., and Zhang, Y., 2008, Petrogenesis of Triassic postcollisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: an example from North Korea. *Geological Magazine* 145, 637-647.
- Qian, Q., *et al.*, 2003, Mesozoic high Ba-Sr granitoids from North China: geochemical characteristics and geological implications. *Terra Nova* 15, 272-278.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., and Nakamura, E., 1996, Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: the Imjingang belt. *Geology*, 24, 1071-1074.
- Ree, J.-H., Kwon, S.-H., Park, Y., Kwon, S.-T., and Park, S.-H., 2001, pre-tectonic and post-tectonic emplacements of the granitoids in the south central Okchon belt, South Korea: implications for the timing of strikeslip shearing. *Tectonics*, 20, 850-867.
- Seo, J., Choi, S.-G., and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research* 18, 479-496.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematic of oceanic basalt: implication for mantle composition and process. In: Saunders, A.D., Norry, M.J. (Eds), *Magmatism in the Oceanic Basins*. Special Publication, Geological Society of London, 313-346.
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N.E., and Pouclet, A., 2001, Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon. *Lithos*, 57, 23-42.
- Turner, S., Sandiford, M., and Foden, J., 1992, Some geodynamic and compositional constraints on "postorogenic" magmatism. *Geology*, 20, 931-934.
- Tura, T., Deniel, C., and Mazzuoli, R., 1998, Crustal control in the genesis of Plio-Quaternary bimodal magmatism of the Main Ethiopian Rift(MER): geochemical and isotopic(Sr Nd Pb) evidence. *Chemical Geology*, 155, 201-231.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., and Chappell, B.W., 1987, A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 405-419.
- 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.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1977, Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.
- Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crust contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic provinces. *Earth and Planetary Science Letters*, 50, 11-30.
- Wu, F.-Y., Sun, D.-Y., Li, H., Jahn, B.-M., and Wilde, S., 2002, A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical geology*, 187, 143-173.
- Yang, J.H., Chung, S.L., Wilde, S.A., Wu, F.Y., Chu, M.F., Lo, C.H., and Fan, H.R., 2005, Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu orogenic belt, East China: geochronological, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 214, 99-125.
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., and Liu, X.M., 2007, Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liadong Peninsula, North China Craton. *Chemical Geology*, 242, 155-175.
- Yin, A. and Nie, S., 1993, An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics* 12, 801-813.
- 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 Geological Society of Korea*, 28, 152-166 (in Korean with English abstract).

Received May 15, 2017

Review started May 22, 2017

Accepted June 16, 2017