

옥천변성대 충주지역의 신원생대 A-형 화산활동

고상모¹ · 김종환^{1,†} · 박계현^{2,*}

¹한국지질자원연구원, ²부경대학교 환경지질학과

Neoproterozoic A-type Volcanic Activity within the Okcheon Metamorphic Belt

Sang-Mo Koh¹, Jong-Hwan Kim^{1,†} and Kye-Hun Park^{2,*}

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

요약: 계명산층 및 주변 지역의 쌍봉형 조성을 나타내는 변성화산암 중에서 주로 조면암 조성을 나타내는 암석들에 대하여 연구하였다. 일부 암석은 매우 높은 철 함량을 보이며, 대부분 매우 높은 희토류 및 고장력 원소의 함량을 갖는다. 대부분 현저한 Eu(-) 이상치를 보이며 이는 장석의 분별에 기인한 것으로 설명된다. 주목할만한 Nb(-) 이상치가 나타나지 않는 것은 이들의 생성에 지각물질이 개입되지 않았음을 나타내는 것으로 이들의 생성환경에 있어 도호환경이나 대륙지각의 재용융과 같은 과정은 배제될 수 있음을 의미한다. 비유동적인 고장력원소인 Nb와 Y를 이용한 지구조판별도에서 계명산층의 변성조면암은 판내부환경에 도시되며, 높은 Ga 함량과 같은 전형적인 A-형 마그마의 특성을 잘 보여준다. 또한 Eby(1992)의 기준으로 A1형 영역에 속함과 750 Ma의 생성시기(Lee *et al.*, 1998)를 참조할 때 이들은 신원생대 초대륙 로디니아의 분열과 관련한 열곡대에서 만들어진 맨틀기원의 판내부 마그마작용 산물임을 시사한다. 이는 옥천변성대 중에서 적어도 계명산층과 문주리층의 일부가 신원생대의 시기에는 남중국의 Cathaysia 블록과 연결되었을 가능성을 강력히 시사한다.

핵심어: 옥천변성대, 계명산층, 문주리층, 변성화산암, A-형, 열곡, 신원생대

Abstract: Trachytic rocks among the bimodal metavolcanic rocks of the Gyemyeongsan Formation and adjacent areas are investigated. Some rocks reveal very high content of iron and most rocks show very high abundances of rare earth elements and high field strength elements. Most rocks show significant Eu negative anomaly, which can be interpreted as the result of plagioclase fractionation. Lack of noticeable Nb negative anomaly indicates not-involvement of crustal material in their generation, which excludes the arc environment or remelting of continental crust from their genetic process. Metatrachytes of the Gyemyeongsan Formation are plotted within the within-plate environment of the tectonic discrimination diagram utilizing immobile high field strength element Nb and Y. They also show typical characteristics of A-type magma, such as high Ga content. Considering their affinity to A1-type of Eby (1992) and their age of 750 Ma (Lee *et al.*, 1998), they seem to have been produced by the differentiation of mantle-derived within-plate magmatism at the rift, related with the separation of Neoproterozoic supercontinent Rodinia. Possible connection of Gyemyeongsan and Munjuri Formations of the Okcheon metamorphic belt, at least part of them, to the Cathaysia block of South China during the Neoproterozoic is strongly suggested.

Key words: Okcheon metamorphic belt, Gyemyeongsan Formation, Munjuri Formation, metavolcanics, A-type, rift, Neoproterozoic

[†]Retired

*Corresponding author: Tel: 82-51-620-6241, Fax: 82-51-628-6432, E-mail: khpark@pknu.ac.kr

서 론

옥천변성대는 한반도의 지질이 연구되기 시작한 이래 가장 많은 논란의 대상이었던 지역이다. 현재도 옥천변성대의 생성과 변천에 대한 논의가 계속 진행되고 있으며(예, 조문섭과 김현철, 2002; 박종길 외, 2003; Cheong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005), 이는 한반도의 지각진화사를 규명하는데 옥천대가 매우 중요함을 말해주고 있다. 옥천변성대의 여러 구성단위들 중에서도 북동부에 위치한 계명산층 및 문주리층(김기완과 이홍규, 1965)은 여러 논란의 중심이라고 볼 수 있다.

예를 들어 계명산층의 생성시기에 대해서는 고생대로부터 시생대에 이르기까지 다양한 의견이 있으며(예, 이대성 외, 1972; 박종길 외, 2003), 층서적 위치도 옥천변성대 다른 지층들의 최상부에서 최하부에 이르기까지 여러 가지의 견해가 있다(임명혁 외, 1991). 또한 구성암석 역시 변성퇴적암으로부터 변성화산암까지 다양한 의견이 제시되고 있으며(예, 김기완과 이홍규, 1965; Reedman *et al.*, 1973; 나기창 외, 1982; Cluzel, 1992; 강지훈과 류충렬, 1997), 대부분의 문제들은 아직도 완전히 해결되지 못한 채로 남아있다.

한편 옥천변성대의 계명산층과 인접한 문주리층 지역에는 쌍봉형(bimodal) 화산활동에 의한 변성화산암들이 분포함이 알려졌다(Cluzel, 1992; 김종환 외, 1995; 강지훈과 류충렬, 1997) 이 중 산성 변성화산암의 저콘 U-Pb 연대가 7억5천만년으로 보고되었다(Lee *et al.*, 1998; 조문섭 외, 2004). 이러한 연대는 원생대 말의 초대륙 로디니아의 분열시기에 해당하며, 당시의 고지리를 상세하게 복원하는데 한반도의 위치가 상당히 중요한 역할을 할 수도 있음을 시사한다. 이와 더불어 옥천대가 북중국과 남중국 중에서 어떤 지괴에 속했었는지를 알려줄 수 있으며, 이는 중국의 두 지괴 사이의 대륙충돌대가 한반도의 어디를 지나는지를 해결하는데도 중요한 단서를 제공해 줄 가능성이 있다. 따라서 계명산층과 문주리층을 구성하는 암석의 종류와 생성환경을 밝히는 것은 이들과 옥천변성대 뿐만 아니라 한반도의 진화와 관련한 여러 문제들을 풀어나는데 매우 중요하다고 생각한다.

이 논문에서는 기존 1:5만 지질도에서의 계명산층으로 표시된 지역의 대부분과 문주리층 지역의 상당부분, 그리고 황강리층 지역의 일부에서 확인된 쌍봉형 변성화산암(김종환 외, 1995) 중에서 주로 산성의 변성화산암들을 연구대상으로 하였다. 주원소 및 미량원소 분석자료는 김종환 외(1995)의 연구에서 획득된 미발표 자료들을 바탕으로 그 지구화학적 특징을 살펴보고

계명산층을 구성하는 산성 변성화산암들의 특성을 재검토하여 이들이 어떤 지구조적 환경에서 만들어진 산물인지에 대하여 논의함으로써 계명산층 및 주변의 옥천변성대 생성과 진화를 밝히는데 기여하고자한다.

지질개요

이 연구의 대상은 1:5만 한국지질도 충주 도폭(김기완과 이홍규, 1965)에서 계명산층으로 명명된 지역과 문주리층의 일부를 포함하는 주변지역이다. 충주도폭에서는 계명산층을 편마상 내지는 편리구조를 갖는 함철 변성사질암으로, 문주리층은 변성이질암으로 기재하였으며(김기완과 이홍규, 1965), 이와 같이 계명산층과 문주리층의 대부분이 변성퇴적암이라는 견해가 상당수의 학자들에 의해 별 이견 없이 받아들여져 왔다(예, Reedman *et al.*, 1973; Reedman and Um, 1975; 이종혁, 1999). 그러나 나기창 외(1982)가 이 지역의 상당 부분이 변성화산암이라는 견해를 제시하였고, Cluzel(1992)은 옥천대가 초기 고생대의 시기에 판 내부에서 만들어졌으며 이 당시 대륙 내부의 열곡과 관련된 화산활동의 결과로 쌍봉형 마그마활동이 있었다는 견해를 제시하였다. 이러한 견해는 최근 들어 더욱 많은 지지를 받고 있다고 판단된다(김종환 외, 1995; 강지훈과 류충렬, 1997; Lee *et al.*, 1998; 박종길 외, 2003; 조문섭 외, 2004).

Lee *et al.*(1998)은 계명산층에 인접한 문주리층 내에 분포하는 쌍봉형 변성화산암 중의 변성 조면암에 대하여 신원생대에 포함되는 750 Ma의 저콘 연대를 보고하였으며, 이 연대는 조문섭 외(2004)에 의하여 확인되었다. 이러한 연대는 세계적으로 볼 때 신원생대의 초대륙 로디니아의 분열시기이며, 옥천변성대와의 연결 가능성이 제기되고 있는 남중국에서도 같은 시기의 알칼리 화성활동이 보고되어 있다(예, Li *et al.*, 2005). 최근에 박종길 외(2003)는 계명산층이 시생대의 연대를 가졌다고 발표하였다. 그러나 박종길 외(2004)는 추가로 분석한 Nd 동위원소 값이 훨씬 젊은 걸썩맨틀 모델연령을 나타내기 때문에 시생대의 연대는 오래된 지각물질의 잔류물이 포함되었기 때문일 것으로 판단하였다.

김종환 외(1995)의 조사결과 나기창 외(1982)가 지적한 것처럼 계명산층과 문주리층의 대부분 및 황강리층으로 표시된 지역의 일부 역시 변성화산암으로 구성되어 있음이 밝혀졌다(Fig. 1). 이러한 변성화산암을 가장 넓게 포함하는 부분이 충주도폭에서 계명산층으로 명명된 지역이기 때문에 이 논문에서는 계명산층이라

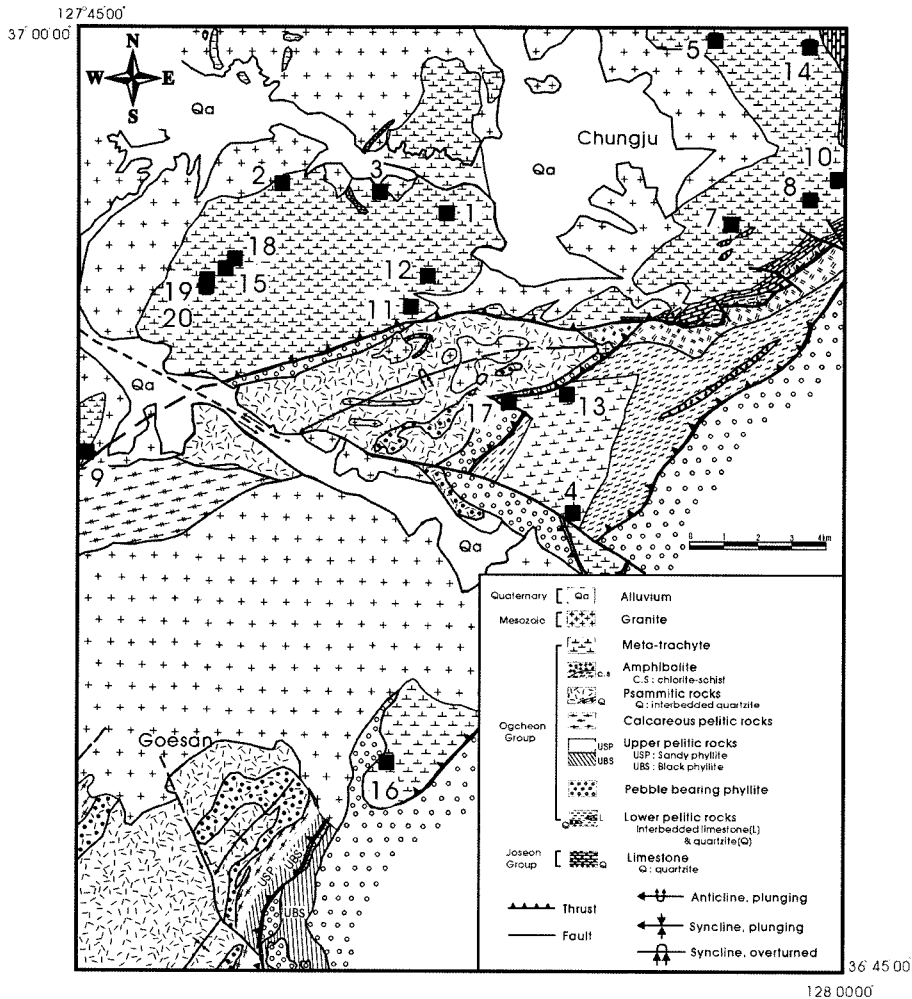


Fig. 1. Geologic map of the study area, modified after Kim *et al.* (1995). Sample locations are also shown. The metatrachytes are not restricted within the area formerly known as Gyemyeongsan Formation.

는 층명을 주변의 변성화산암들을 모두 포함하는 의미로 사용한다. 조문섭 외(2004)는 주된 구성암들이 각섬암상의 변성작용과 연성변형작용을 받았기 때문에 계명산층과 문주리층이라는 층서학적 개념을 가진 퇴적층명은 적용이 불가능하다고 하였다. 그러나 계명산층과 문주리층으로 명명된 지역에서 변성퇴적암이 산출되는 것 역시 부정할 수 없으며 오히려 변성화산암들이 대개 층상으로 나타난다. 따라서 이 지역에 대한 변성퇴적암과 변성화산암의 분포와 상호관계, 존재비 등에 대한 연구가 선행된 이후에 새로운 명칭을 부여하는 것이 추가적인 혼란을 피할 수 있는 방법이라고 생각된다.

이 논문에서는 계명산층 및 주변지역에서 채취한 17

개의 산성 변성화산암류 표본과 3개의 어래산 코어를 포함하는 총 20개 표본에 대한 원소분석 결과에 대하여 논의한다. 이 암석들은 충주도폭에서 함철사질암 또는 편마암 및 함력 천매암으로 기재되었으나 전체적으로는 담색의 회색암으로 암색대와 담색대가 교호하는 유상구조를 갖는다. 일부 지역에서는 암석의 호상구조가 미약하여 기존도폭에서 이를 층리로 해석한 듯하다. 구성광물은 준모자익상 석영 및 알칼리장석, 미립의 운모, 광염상으로 산출되는 자철석이며, 석류석 및 붉은색의 형석 미립이 흔히 함유된다. 어래산의 희토류광산 모암에서는 각력질 유문암이 발달한다. 주원소와 희토류원소를 포함한 미량원소의 농도는 모두 캐나다 Actlab에 의뢰하여서 분석하였다(Table 1).

Table 1. Major element composition of the metavolcanic rocks of the Gyemyeongsan Formation.

Sample	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI**	Total
1	49.53	5.11	40.08	0.02	0.17	0.15	0.44	3.60	0.35	0.08	0.49	100.02
2	55.94	13.11	12.83	0.55	2.66	5.57	3.36	2.70	2.48	1.19	0.38	100.77
3	60.51	6.66	26.80	0.01	0.22	0.32	0.50	4.98	0.51	0.10	0.19	100.80
4	61.27	17.48	8.95	0.11	0.55	0.16	3.62	7.28	0.48	0.09	0.99	100.98
5	63.53	14.64	10.76	0.12	0.33	0.37	3.86	6.14	0.56	0.05	0.50	100.86
6	63.58	11.81	12.66	0.28	0.83	2.07	0.73	6.65	0.63	0.06	0.95	100.25
7	63.59	11.69	9.15	0.32	0.71	3.20	2.10	6.16	0.57	0.04	3.14	100.67
8	64.06	13.27	9.30	0.16	0.33	1.37	2.29	6.63	0.54	0.06	1.37	99.38
9	64.52	14.96	5.51	0.25	1.68	2.72	4.26	4.17	0.95	0.17	1.07	100.26
10	65.80	12.89	8.82	0.23	0.33	0.80	4.13	5.14	0.53	0.05	0.80	99.52
11	66.13	13.23	8.59	0.24	0.59	1.29	4.32	5.03	0.86	0.10	0.19	100.57
12	67.12	11.80	8.93	0.19	0.53	1.30	3.12	4.52	0.55	0.06	0.79	98.91
13	69.45	15.42	3.37	0.06	0.60	1.22	3.65	3.49	0.62	0.08	1.16	99.12
14	69.46	12.27	9.38	0.07	0.38	0.90	0.22	4.74	0.61	0.10	2.15	100.28
15	73.34	8.54	8.39	0.07	0.47	1.01	1.33	5.61	0.47	0.04	0.38	99.65
16	73.51	11.85	5.88	0.01	0.05	0.05	3.08	5.84	0.35	0.03	0.31	100.96
17	77.36	11.11	2.61	0.05	0.14	0.34	3.65	3.39	0.17	0.03	0.59	99.44
18†	57.41	14.96	10.29	0.22	0.96	2.62	5.72	5.01	1.27	0.56	0.94	99.96
19†	58.84	12.50	18.76	0.13	0.37	0.71	5.24	4.01	0.49	0.08	0.01	101.14
20†	63.57	14.22	8.52	0.32	0.27	1.74	5.53	4.82	0.58	0.08	0.90	100.55

*Total iron as Fe₂O₃. **LOI = loss on ignition. †Eoraesan core samples.

결과 및 토의

주원소

계명산층 및 문주리층 지역에 대한 기존의 변성화산암 자료(Cluzel, 1992; Lee *et al.*, 1998; 박종길 외, 2003)를 살펴보면 염기성 암석들과 중성 내지 산성의 암석들이 모두 존재한다. 하지만 이 연구에서는 이 지역에 주로 분포하는 중성 내지 산성의 변성화산암류에 한하여 논의한다. 분석된 계명산 변성화산암들의 SiO₂ 조성은 50wt% 이하로부터 77wt%가 넘는 것까지 상당한 변화를 보인다(Table 1). 총알칼리 값을 보면 대체로 상당히 높은 함량을 가지며, Al₂O₃의 함량은 중성 내지 산성암으로서는 상당히 낮은 값을 보이는 것이 많다. 또한 철분의 함량을 보면 40.1wt%, 26.8wt% 등과 같이 매우 높은 조성을 갖는 것들이 있다. 주원소 함량은 무게비로 나타내기 때문에 한 성분의 집중이나 분리는 다른 성분을 심하게 왜곡시킬 수도 있다. 따라서 일반적인 범위를 벗어나 매우 넓은 범위의 변화를 보이는 계명산 변성화산암들의 주원소 조성으로부터 각종 지구화학적 도형을 작성하고 이를 해석할 때는 각별한 주의가 필요하다.

첫째로 꼽을 수 있는 주원소 함량의 왜곡현상은 자철석의 집적에 기인한다. 계명산의 변성화산암들의 박

편을 관찰해보면 상당수의 표본에서 자철석이 방향성을 갖고 배열해 있는 것을 볼 수 있으며, 일부 시료에서는 육안으로도 관찰할 수 있는 자철석 반정들이 높은 밀도로 관찰된다. 이와 같은 사실은 일부 표본에서 나타나는 매우 높은 철분 함량이 자철석의 농집에 의한 것임을 지시한다. 이와 같은 자철석의 농집은 비중이 큰 자철석이 마그마의 정출과정에서 집적된 것으로 해석할 수 있다. 따라서 자철석의 추가로 인하여 철분이 매우 높은 함량으로 나타나는 표본에서는 상대적으로 SiO₂ 등 다른 주원소들의 농도 값이 심하게 왜곡되어 나타나게 된다. 따라서 분석된 이들의 함량 값을 그대로 사용하여 암석 분류도형 등에 도시할 경우 잘못된 정보를 제공해 줄 수 있음을 염두에 두어야 한다. 이러한 경우 미량원소들 사이의 비율을 활용하는 것이 대안이 될 수 있을 것이다.

둘째로는 변질에 의한 영향이다. 계명산층의 변성화산암들은 상부 녹색편암상 내지는 하부 각섬암상에 이르는 상당한 정도의 변성작용을 받은 것으로 알려져 있다. 또한 알칼리 화강암의 관입 시기에 상당한 열수 변질을 초래하였을 가능성도 있다. 이러한 변성 및 변질작용시에 일부 원소들은 상당히 유동적으로 거동하여 원래의 조성을 간직하지 못하고 있을 가능성이 높다. 실제로 계명산층 변성화산암류에 대한 하커도형을

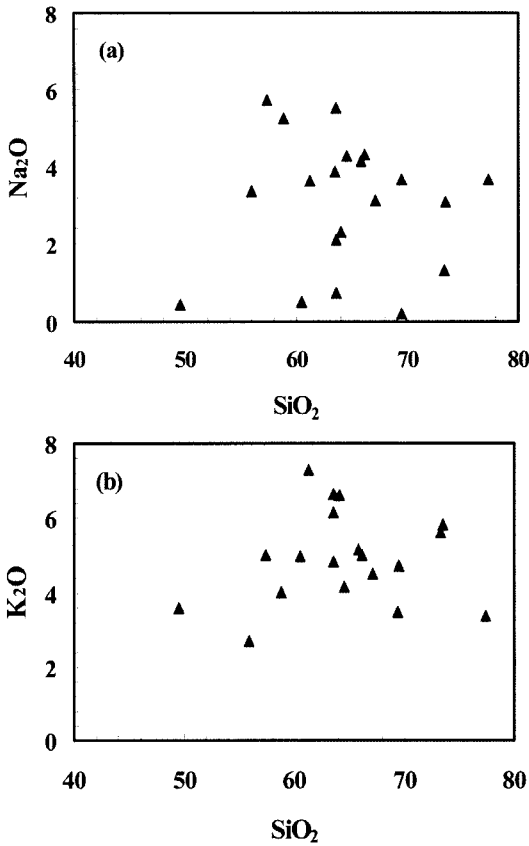


Fig. 2. (a) Na₂O and (b) K₂O versus SiO₂ plots of the acidic metavolcanic rocks from the study area. They do not show clear differentiation trends but considerable scatter, probably due to mobility of alkali elements during the metamorphism and/or hydrothermal alteration. It is worthwhile to notice the very high abundances of the alkali elements in these rocks.

작성해보면 잘 정의되는 분화경향을 보이지 않고 상당히 분산된 모습을 나타낸다. 특히 알칼리 원소들의 분산정도가 매우 심하게 나타난다(Fig. 2). 이는 Na, K, Rb, Cs와 같은 알칼리 원소 및 Sr, Ba 같은 알칼리토 금속들은 변성 및 변질작용 동안에 상당히 유동적이었을 가능성을 시사한다. 따라서 변성작용이나 변질이 의심되는 경우에는 이런 환경에서 비유동적이라고 알려진 원소를 활용하는 것이 바람직하다.

지구화학적 암석분류

Table 1에는 Fe₂O₃의 함량이 40wt% 및 27wt%로 매우 높은 값을 보이는 표본들이 있다. 이러한 표본들의 경우 주원소인 SiO₂의 값은 상대적으로 낮은 쪽으로 심하게 편향되어 원래의 조성을 반영하지 못할 수 있

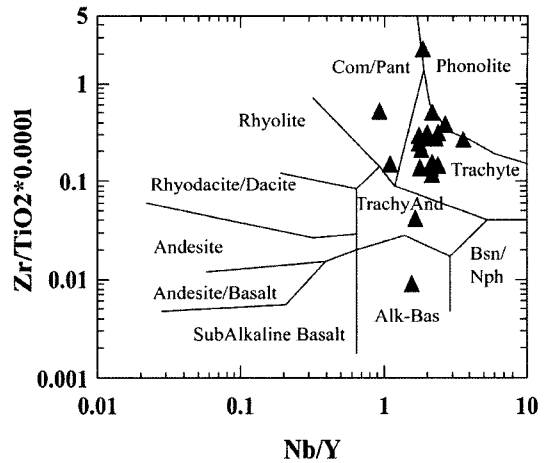


Fig. 3. Zr/TiO₂-Nb/Y classification diagram of Winchester and Floyd (1976) is applied to the acidic metavolcanic rocks of the study area. This diagram uses high field strength elements which are immobile during the metamorphism and/or weathering.

으며, 화산암의 분류에 널리 쓰이는 총알칼리-실리카 (Total Alkali-Silica; TAS) 분류도형(Le Bas et al., 1986)에서 잘못된 위치에 도시될 수 있다. 즉, 원래는 산성 내지 중성의 마그마에 자철석이 집적된 결과이지만 마치 염기성 암석인 것처럼 분류될 수 있다. 또한, TAS 도형은 알칼리 원소들을 사용하기 때문에 변질이나 변성작용의 영향을 피하기 어렵다. 따라서 연구대상 암석들은 변성 및 변질작용시 상대적으로 비유동적이라고 알려진 고장력원소들(Ti, Zr, Y, Nb, Ta, Hf 등) 및 희토류원소들을 이용하여 암석화학적 분류를 하는 것이 더 타당하다고 생각된다.

고장력원소들을 이용한 화산암의 분류도인 Zr/TiO₂-Nb/Y 도형(Winchester and Floyd, 1976)에 연구대상 표본들을 적용해보면(Fig. 3) 계명산층 변성화산암들은 주로 조면암 영역에 놓인다. 나머지 시료들은 조면암 영역을 둘러싸는 주변 암상인 과일카리우문암(comendite-pantellerite), 포놀라이트(phonolite), 조면안산암 및 알칼리 현무암 영역에 한 두 시료씩 놓인다(Fig. 3). 계명산층과 문주리층의 중성 내지 산성 변성화산암에 대한 다른 연구자들(Cluzel, 1992; Lee et al., 1998; 박종길 외, 2003; 박맹언 외, 2005)의 자료를 모두 포함하거나, TAS 분류도형을 사용하더라도 비슷한 결과를 보인다. 고장력원소를 이용한 분류도형과 TAS 도형에서 모두 조면암이 가장 우세한 암상으로 나타나며, 계명산층 지역과 문주리층 지역 사이에 특별한 지화학적 차이점이 발견되지 않기 때문에 이 논문에서는 계명산층과 주변

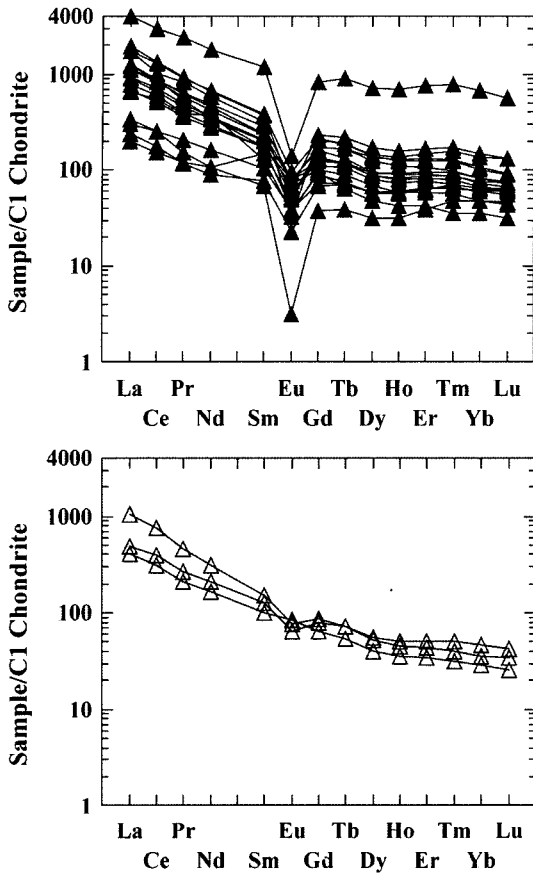


Fig. 4. Chondrite normalized rare earth element abundances of the acidic metavolcanic rocks of the study area. Most metatrachytes (solid triangles) reveal obvious negative Eu anomalies. However, Eoraesan core samples (open triangles) do not show strong negative Eu anomalies. See text for the discussion. Extremely low Er value of sample #2 seems to reflect some error and is omitted from the plot.

의 변성화산암들 모두를 계명산층 변성조면암으로 부르기로 한다.

희토류원소

계명산층의 변성화산암들은 희유금속자원을 탐사할 정도로(오민수, 1989; 박맹언과 김근수, 1995) 아주 높은 농도의 희토류원소와 고장력 원소 함량을 가진 것이 특징이다(Lee *et al.*, 1998; 박종길 외, 2003). 이 연구의 시료들도 La 함량이 콘드라이트 운석(Evensen *et al.*, 1978)의 3,800배를 넘는 것도 있으며, 가장 낮은 함량을 보이는 것조차도 콘드라이트의 190배 정도로 이러한 특징을 잘 보여준다(Fig. 4). 희토류 변화도형

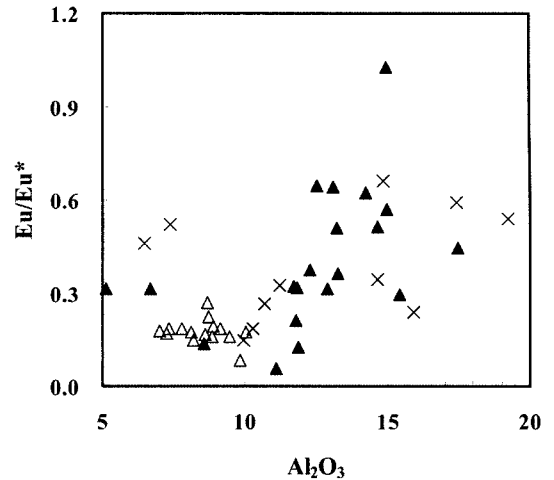


Fig. 5. Al_2O_3 versus Eu/Eu^* diagram for the acidic metavolcanic rocks of the northeastern Okcheon metamorphic belt. The rocks with more severe negative Eu anomaly (low Eu/Eu^*) show lower Al_2O_3 contents, reflecting fractionation of feldspar. Solid triangles are from this study, crosses are from Park *et al.* (2003), and open triangles are from Park *et al.* (2005).

은 모든 표본에서 가벼운 희토류가 무거운 희토류에 비해 상대적으로 부화된 모습을 잘 보여준다. 일반적으로 무거운 희토류원소는 콘드라이트의 수십배 이상으로 부화되는 경우가 매우 드물지만 계명산층의 변성조면암에서는 Lu이 콘드라이트의 560배 이상에 달하는 것도 있다(Fig. 4).

거의 대부분의 암석들에서 뚜렷한 $Eu(-)$ 이상치가 나타나며 일부 암석은 매우 두드러진 $Eu(-)$ 이상치를 보인다. 이는 분화에 장석의 분별이 중요한 역할을 하였음을 나타낸다. 한편 어래산 시추코어의 암석들(Table 1의 표본번호 18~20)은 다른 암석들과는 달리 $Eu(-)$ 이상치가 아주 작거나 아예 없다(Fig. 4). 어래산 코어들이 아주 작거나 거의 없는 $Eu(-)$ 이상치를 갖는 이유는 이들이 다른 모마그마로부터 분화된 암석들일 가능성도 내포한다. 그러나 어래산 코어가 계명산층의 다른 변성조면암들과 마찬가지로 높은 희토류원소 및 고장력 원소들의 함량 등과 같은 여러 가지 공통적인 지화학적 특징을 가지는 반면에, SiO_2 함량은 비교적 낮은 중성암의 조성을 보인다. 따라서 어래산 코어들은 다른 조성을 갖는 모마그마로부터 진화한 암석이 아니라 $Eu(-)$ 이상치를 만들어내는 장석의 분화가 현저하게 일어나기 전의 초기 마그마 분화단계를 나타내는 암석일 가능성이 높다고 판단된다.

장석이 주 분별광물인 분화가 진행되었음은 Eu/Eu^*

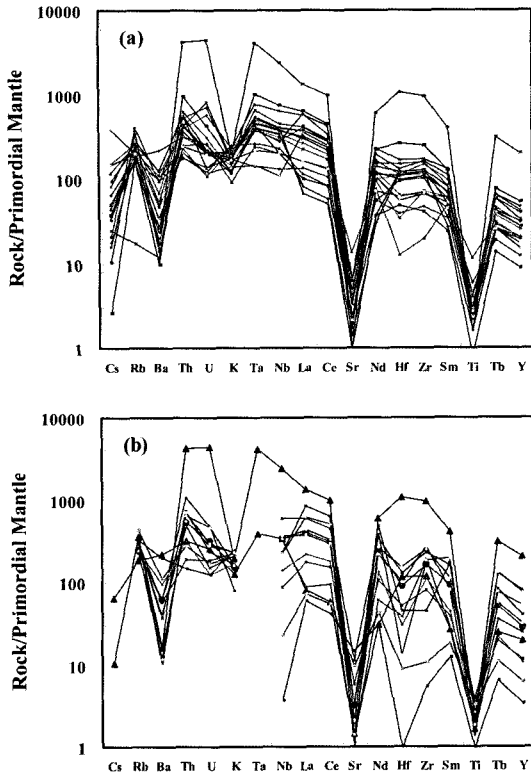


Fig. 6. Spidergrams for the (a) metatrachytes analyzed in study and (b) acidic metavolcanic rocks of Park *et al.* (2003). Two typical samples (solid triangles) from this study are also shown in (b) for the comparison. Both plots show well developed negative peaks at Ba, K, Sr and Ti, which seem to reflect fractionation of feldspars and Ti-bearing minerals. Notice the difference in Nb. See further discussion in the text.

값과 Al_2O_3 의 상관도(Fig 5)에서도 나타난다. 극심한 Eu(-) 이상치를 갖는 암석, 즉 낮은 Eu/Eu* 값을 갖는 암석에서는 Al_2O_3 이 매우 낮게 나타난다. 이러한 Al_2O_3 값은 일반적인 중성 내지 산성화산암들에 비해서는 상당히 낮은 값이며, 장석의 분별로 설명될 수 있다. 장석이 분별될 때 Eu를 제외한 희토류원소들은 오히려 농집될 수 있기 때문에 La 농도가 높은 암석일수록 Eu(-) 이상치가 증가하는 양상을 보인다. 그러나 가장 큰 Eu(-) 이상치를 갖는 암석은 Eu 이상치가 거의 없는 아래산 코어보다도 오히려 La의 함량이 더 낮다. 이는 분화 최후기로 가면서 농집된 희토류 원소를 포함하는 부수 광물들의 정출이 시작되어 희토류원소의 전반적인 농도 역시 감소하는 추세로 전환되었기 때문으로 해석된다.

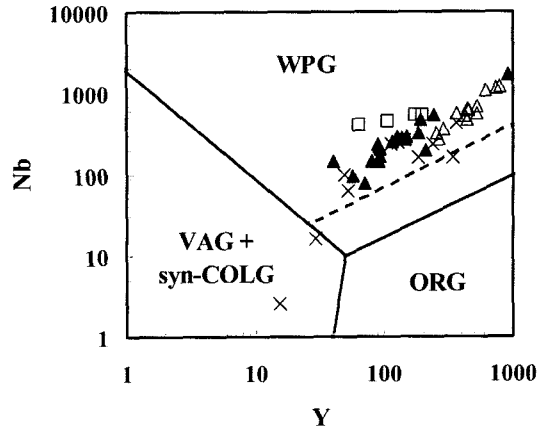


Fig. 7. The Nb-Y tectonic discrimination diagram for granites (after Pearce *et al.*, 1984), showing the fields of volcanic-arc granites (VAG), syn-collisional granites (syn-COLG), within-plate granites (WPG) and ocean-ridge granites (ORG). The broken line is the field boundary for ORG from anomalous ridges. All the analyzed metatrachytes (solid triangles) are plotted within the WPG field. Acidic metavolcanic rocks of the others (Lee *et al.*, 1998, open squares; Park, J.G. *et al.*, 2003, crosses; Park, M.-E. *et al.*, 2005, open triangles) are also shown.

기타 미량원소

계명산층의 변성조면암에는 Nb, Zr, Y 등 고장력 원소의 함량도 극히 높은 수준을 보이는 시료들이 포함된다. 곳에 따라서는 광석의 수준으로까지 높은 함량을 보이기도 한다(박맹언과 김근수, 1995). 친액정도가 감소하는 순서로 배열된 거미도형에서도 일반적인 친액원소의 함량이 매우 높은 값을 보인다(Fig. 6). 전반적으로 친액정도가 감소하면서 부화정도 역시 연속적으로 감소하는 양상이다. 그러나 Ba, K, Sr 및 Ti의 경우 인접한 친액 정도가 비슷한 원소들에 비해 현저하게 낮은 함량을 보인다. 이는 Ba, K 및 Sr을 선택적으로 가져가는 사장석 및 K-장석과 함 Ti 광물의 분별과 관련있을 것으로 생각된다. 이러한 특징은 동일지역 혹은 인접지역에서 보고된 다른 연구자들(Lee *et al.*, 박종길 외, 2003; 박맹언 외, 2005)의 자료에도 동일하게 나타난다(Fig. 6b).

이 연구의 변성조면암들은 거미도형에서 Nb 및 Ta가 La 등 인접원소와 비교시 별다른 이상치를 보이지 않음이 특기할만하다. 도호지역의 화성암이나 대륙지각의 암석들은 일반적으로 음의 Nb 이상치를 보이는데 전혀 그런 이상치가 나타나지 않는 것은 대륙연변부의 화산호 환경에서 만들어지지 않았으며, 지각물질에 의한 오염의 영향도 거의 없음을 나타낸다. 이러한

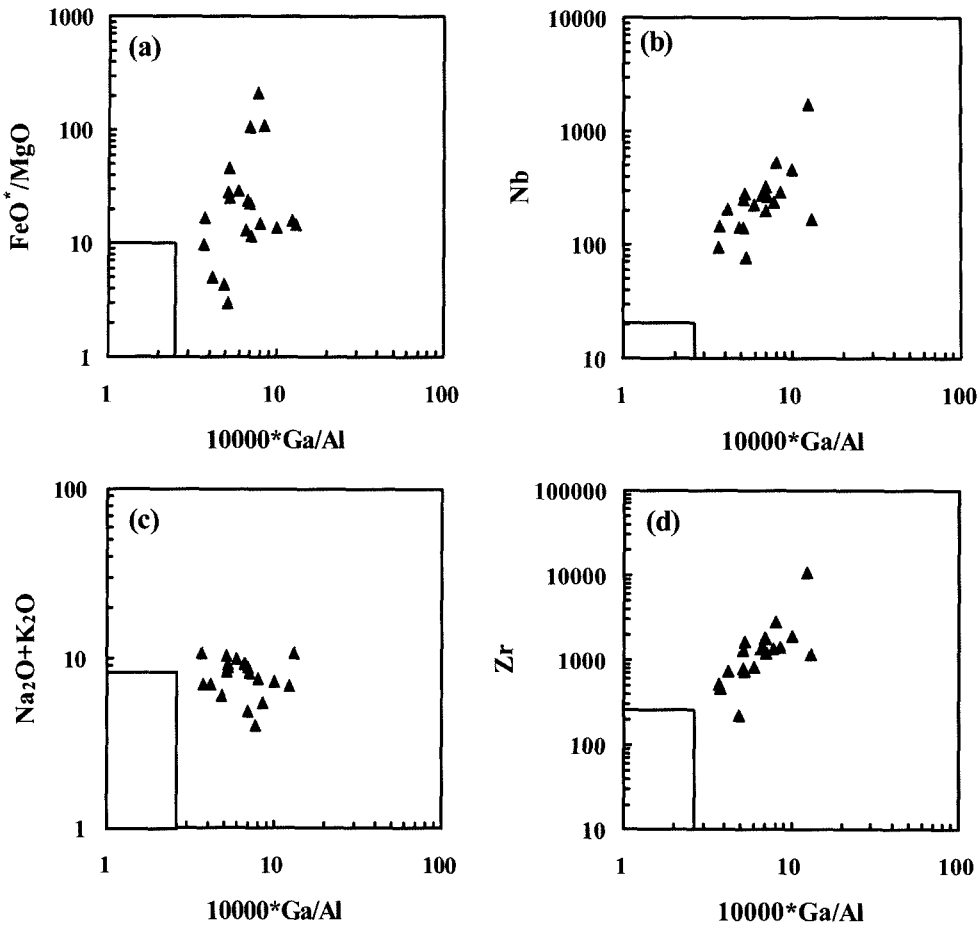


Fig. 8. Discrimination diagrams to distinguish A-type magma from other magma types (after Whalen *et al.*, 1987), indicating that the metatrachytes of the study area have chemical characteristics of A-type magma. Rectangular box at the lower left corner in each diagram indicates non-A type magmas (I-, S- and M-type granitic magmas).

경향은 Lee *et al.*(1998)의 문주리지역 변성화산암이나 박맹언 외(2005)의 충주철광 부근의 산성질 변성화산암에서도 마찬가지로이다. 그러나 박종길 외(2003)의 자료에서는 현저한 Nb(-) 이상치를 나타내는 표본들이 관찰된다(Fig. 6b). 이는 이 지역의 일부 중성 내지 산성화산암 표본들에는 분출과정중에 지각물질이 일부 포함되었을 가능성을 보여주는 것으로 풀이된다.

지구조환경 판별도

화강암질 성분의 암석들의 지구조환경 판별을 위한 Nb-Y 도형(Pearce *et al.*, 1984)에서 계명산층 변성조면암 시료 모두가 판내부 환경에 도시된다(Fig. 7). 알칼리원소를 포함하는 (Y+Nb)-Rb 도형을 그리더라도 경계부를 살짝 넘는 일부 시료를 제외하고는 모두 판내부 환경에 도시된다. 일부 시료들의 분산은 알칼리 원

소인 Rb이 변성 및 변질작용시 유동되었기 때문일 가능성도 있다. 중성 내지 산성암석들이 판내부환경을 나타내는 것은 이 지역 쌍봉형 화성활동의 염기성 암석들이 현무암질 암석을 위한 지구조 판별도인 Ti-Zr-Y (Pearce and Cann, 1973) 및 Hf-Zr-Y 도형(Wood, 1980)에서 현무암들은 모두 판내부 환경에 도시됨(Lee *et al.*, 1998)과 일치한다. 따라서 계명산층의 변성화산암들은 판내부에서 열곡이 발달하는 환경으로부터 생성된 마그마로부터 유래한 것으로 판단된다.

마그마 유형-A형 화성활동의 특징

충주지역 변성화산암들의 가장 특징적인 조성은 매우 높은 알칼리 원소 및 고장력원소들의 함량이다. 이러한 조성은 A-형 마그마에서 전형적으로 나타나는 현상이기도 하다. 앞의 지구조환경판별도에 의해 판내부

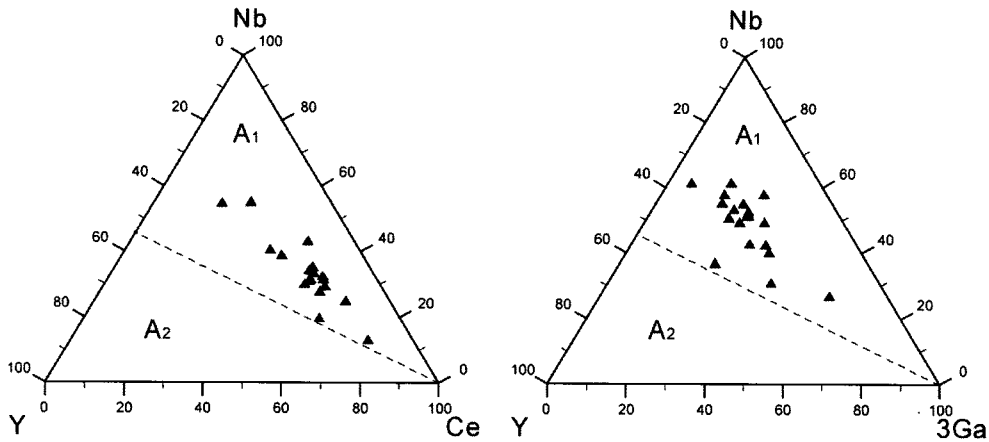


Fig. 9. Y-Nb-Ce plot of Eby (1992) to subdivide A-type magma. The acidic metavolcanic rocks of the study area are plotted within A1 field.

Table 2. Trace element composition of the metavolcanic rocks of the Gyemyeongsan Formation.

Sample	Ba	Cs	Ga	Hf	Mo	Nb	Pb	Rb	Sb	Sn	Sr	Ta	Th	U	W	Y	Zn	Zr
1	1525	1.50	21	35.4	11.19	237	3	117	13.48	12.7	30.3	16.0	26.4	5.43	3.4	88.6	37	1340
2	673	1.02	34	3.9	4.99	143	3	107	0.95	8.6	289.4	10.1	21.2	5.55	1.4	92.1	678	221
3	668	0.37	30	37.3	30.74	292	2	146	4.37	11.2	20.4	21.0	35.3	17.11	15.0	149.3	13	1422
4	888	2.74	122	28.9	1.15	166	21	164	0.29	21.4	78.2	10.8	15.1	2.55	2.5	93.7	218	1163
5	333	1.14	46	10.5	1.65	221	9	139	0.18	7.0	134.6	15.7	19.2	2.28	2.6	91.5	50	821
6	870	1.90	63	52.1	1.45	462	26	183	0.66	18.6	135.7	32.0	48.8	2.85	3.7	192.5	338	1938
7	155	0.77	44	30.0	1.73	265	19	127	0.29	13.0	131.3	18.4	36.8	4.09	2.9	144.5	118	1201
8	775	0.41	37	34.7	1.73	281	9	137	0.37	11.1	90.7	20.3	32.8	12.12	5.7	138.2	69	1667
9	348	1.13	41	33.2	2.27	249	5	126	0.69	10.5	133.0	16.6	26.5	4.53	2.4	115.6	87	1295
10	132	1.18	46	37.1	3.18	289	7	101	0.15	12.8	98.5	22.3	37.2	4.64	2.8	125.7	152	1439
11	84	0.56	46	33.7	1.66	271	3	11	0.20	12.2	38.6	18.9	30.6	4.24	2.2	124.4	57	1335
12	69	0.06	50	80.9	1.90	530	17	102	0.56	26.0	39.8	42.0	79.8	8.99	4.7	242.9	84	2816
13	476	3.44	34	20.3	4.38	204	16	166	0.25	16.0	85.6	15.2	54.5	6.55	4.8	94.0	71	736
14	373	2.18	45	45.8	5.05	324	7	152	0.50	12.2	66.9	27.1	44.1	15.01	11.8	184.3	141	1758
15	112	0.24	56	332.8	2.50	1715	12	226	1.75	169.9	20.7	170.6	358.3	92.93	6.5	921.4	24	10652
16	97	0.85	44	40.9	0.56	198	32	149	0.57	12.8	35.9	15.6	36.2	4.37	3.5	211.9	65	1813
17	185	0.87	22	14.7	7.66	145	15	104	0.14	12.3	49.5	17.9	48.3	4.59	3.1	40.5	26	459
18	661	0.48	29	12.0	1.92	94	3	254	1.81	1.8	85.3	5.8	14.7	2.91	0.6	56.4	36	525
19	237	8.86	35	17.3	1.73	77	3	127	0.30	26.6	64.6	6.0	17.3	2.44	0.8	70.0	72	743
20	155	3.39	39	19.0	1.79	143	2	129	0.85	7.2	44.3	8.9	20.7	4.14	0.9	79.7	41	797

환경에 도시됨이 확인되었다. 판내부 환경은 다른 말로 하면 비조산운동(anorogenic) 구역이라는 의미이기 때문에 전형적인 A-형 마그마에 속하는지 검토해볼 필요가 있다. 이를 확인하기 위해 Ga/Al 비율과 다른 원소들의 함량관계로부터 A-형 마그마를 판별하는 도형들(Whalen *et al.*, 1987)을 구축하였다(Fig. 8). 그 결과 계명산층의 변성조면암들을 도시한 결과 높은 Ga/Al 비율과 높은 Nb 및 Zr 함량 등과 같은 전형적인 A-형 화강암질 마그마의 영역(Collins *et al.*, 1982; Whalen

et al., 1987)에 도시됨을 알 수 있다.

A-형 마그마작용을 다시 세분한 Eby(1992)의 지구화학적 기준에 따르면 이들은 A1-형 화강암의 영역에 속한다(Fig. 9). 이는 A2형으로 분류되는 대강화강암(김용준 외, 1998)이나 남산화강암(Lee *et al.*, 1995; 고정선 외, 1996)과 같은 한반도의 다른 A-형 화강암들과는 다른 양상이며, 계명산층 내에 나타나는 알칼리 화강암(김진섭 외, 1998)과 같은 분류에 속한다. Eby (1992)에 따르면 A1-형 화강암은 주로 열곡대와 같은

Table 3. Rare earth element composition of the metavolcanic rocks of the Gyemyeongsan Formation.

Sample	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	56.8	106.8	11.1	42.2	11.8	1.33	14.20	2.63	14.95	3.28	10.51	1.67	10.16	1.39
2	113.9	244.1	26.2	105.7	21.7	4.38	19.32	3.13	15.40	3.10	0.17	1.35	7.35	1.05
3	47.7	93.9	11.6	49.9	22.4	2.86	34.88	6.22	31.00	6.12	17.61	2.51	13.76	1.76
4	80.9	152.3	19.5	75.3	15.8	2.25	14.71	2.71	14.93	3.38	10.71	1.63	10.36	1.52
5	158.4	318.2	34.4	130.5	26.4	4.07	20.73	3.33	17.24	3.35	9.77	1.45	8.20	1.12
6	411.9	779.0	86.5	318.0	58.1	5.43	43.97	7.02	34.90	7.08	20.45	3.16	17.31	2.29
7	222.6	438.9	45.5	166.9	31.4	3.07	26.20	4.52	23.61	5.15	15.70	2.43	13.77	1.92
8	264.6	542.6	60.2	229.4	43.5	4.64	32.94	4.93	24.18	5.06	14.91	2.20	12.19	1.67
9	186.7	363.7	37.7	136.5	26.1	4.65	22.66	4.02	20.31	4.09	12.57	1.81	11.05	1.53
10	264.5	506.8	54.2	193.8	35.4	3.33	28.16	4.36	21.68	4.55	14.12	2.18	12.77	1.88
11	216.5	403.5	43.5	158.1	30.3	4.75	25.53	4.41	22.26	4.53	13.58	2.01	11.28	1.57
12	457.1	825.1	88.1	304.0	56.9	3.68	47.10	8.17	43.02	8.96	27.28	4.39	24.97	3.33
13	287.2	530.0	50.6	164.5	26.5	2.24	18.45	2.83	14.30	3.20	10.33	1.80	10.82	1.61
14	294.7	540.9	58.4	210.0	36.7	4.43	34.74	6.27	34.32	7.28	21.38	3.21	17.89	2.36
15	947.9	1812.8	230.8	828.1	182.4	8.07	170.64	33.46	181.94	39.71	124.22	19.84	114.66	14.42
16	417.4	613.7	78.2	271.4	49.0	1.90	41.78	7.05	36.42	7.74	24.28	3.95	22.86	3.34
17	70.4	153.1	14.3	50.1	10.5	0.18	7.83	1.46	8.04	1.79	6.44	1.21	8.10	1.17
18	95.1	191.5	19.8	77.5	15.2	4.86	13.14	2.02	10.06	2.02	5.78	0.80	4.83	0.65
19	248.3	459.0	43.3	143.9	23.1	4.44	17.84	2.71	13.46	2.56	7.26	1.01	6.12	0.87
20	116.2	238.7	25.3	98.1	19.7	3.74	16.09	2.74	14.24	2.83	8.45	1.28	7.85	1.07

곳에서 발달하는 것으로 알려져 있으며, 해양도 현무암(oceanic island basalt)과 유사한 근원물질로부터 유래한 마그마의 분화물을 나타낸다고 한다. 이는 대륙간 충돌이나 도호환경의 마그마작용을 통해 대륙지각의 용융으로 만들어지는 A2-형과는 전혀 다른 환경이다.

계명산층내 A-형 화성활동의 성인 및 조구조적 의미

대륙 열곡 내의 쌍봉형 화성암대에서 발견되는 A-형의 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; Bohron and Reid, 1997; Barbarin, 1999; Tura *et al.*, 1998; Li *et al.*, 2002; Peccerillo *et al.*, 2003). 계명산층의 변성조면암은 Eby(1992)의 A1-형 영역에 속하기 때문에 맨틀에서 유래한 마그마의 분화물일 가능성이 높다. 또한 지각물질의 개입시 나타나는 Nb 이상치가 발견되지 않으며, $\epsilon_{Nd}(T)$ 값이 양의 값을 가짐(Lee *et al.*, 1998)은 고도로 진화된 오래된 대륙상부지각 물질이 포함되지 않았음을 나타낸다. 즉, 계명산층 변성조면암은 판내부의 열곡대에서 맨틀기원물질로부터 분화된 산물임을 나타낸다.

이와 같이 계명산층 변성조면암이 나타내는 A1-형

화성활동은 옥천변성대의 당시 지구조적 환경을 알려주는 매우 중요한 단서이다. 주변지역의 신원생대 알칼리 화성활동을 살펴보면 경기육괴에서도 신원생대의 알칼리 화성활동이 보고되었으며(Lee *et al.*, 2003), 남중국에도 신원생대의 비조산성(anorogenic) 화성암들이 보고되고 있다(Li *et al.*, 1999; 2002, 2003; Ling *et al.*, 2003). 특히 남중국의 신원생대 화산암들은 지구화학적 특성이 매우 비슷하다. 이러한 시기적, 지화학적 유사성은 이들이 성인적으로 관련있음을 시사한다.

Li *et al.*(2003)은 로디니아 아래의 맨틀 수퍼플룸이 830~740 Ma에 널리 퍼진 쌍봉형 화성작용, 대륙의 열곡형성 및 중국에는 초대륙의 분열을 가져오게 되었다고 제안하였다. Li *et al.*(2005)는 남중국의 Cathaysia 블록 내에 820 Ma의 쌍봉형 화산암이 존재함을 밝혔으며, 이 화산암들은 대륙의 열곡환경에서 만들어졌다고 제안하였다. 계명산층 변성조면암역시 대륙의 분열을 초래하는 열곡환경에서 상승하는 맨틀기원 마그마의 분화로 생성된 것이기 때문에 이들이 생성된 750Ma의 시기의 가장 현저한 지질학적 사건인 초대륙 로디니아의 분열과 관련있다고 해석하는 것이 타당할 것이다. 이는 적어도 계명산층과 문주리층의 일부를 포함하는 당시의 옥천변성대 지괴가 남중국의 Cathaysia 블록과 연결되어있었을 가능성을 강력히 시사한다.

결 론

충주지역 계명산층 및 주변 지역의 변성화산암으로부터 채취하여 연구된 표본들은 주로 조면암의 화학조성을 가지며, 회토류 및 고장력원소의 함량이 매우 높은 것이 특징이다. 또한 대부분 장석의 분별에 기인한 현저한 Eu(-) 이상치를 보인다.

거마도형에서 Nb의 이상치가 나타나지 않으며 이는 이들의 생성에 지각물질이 개입되지 않았음을 나타낸다. 즉, 도호환경의 마그마작용이나 대륙지각의 재용융과 같은 과정을 겪지 않았음을 말해준다. 이들이 비교적 높은 정도의 변성작용을 겪었음을 감안하여 비유동적인 고장력원소인 Nb-Y 상관도형에 의해 판별할 때 판내부환경에서 생성된 것으로 판단된다.

또한 높은 Ga 함량과 같은 전형적인 A-형 마그마의 특성을 잘 보여주며, Eby(1992)의 기준으로 구분하면 A-1형 영역에 속한다. 이는 이들이 열곡환경에서 맨틀 근원물질의 분화로 생성되었음을 의미한다.

750 Ma의 신원생대인 이들의 생성시기(Lee et al., 1998)와 앞에서의 지화학적 특징은 이들이 신원생대 초대륙 로디니아의 분열과 관련한 열곡대의 발달에 따라 만들어진 판내부 마그마작용의 산물임을 가리킨다. 이는 육천변성대 중에서 적어도 계명산층과 문주리층의 일부가 신원생대의 시기에 남중국 Cathaysia 블록과 연결되어있었을 가능성을 강력히 시사한다.

사 사

이 논문은 한국학술진흥재단의 순수기초연구그룹 지원사업(KRF-2003-070-C00046)에 의해 지원되었으며 이에 감사드린다. 원고를 읽고 도움을 준 심사자들에게 감사드린다.

참고문헌

강지훈, 류충렬, 1997, 충주 계명산지역 육천변성대의 화성 활동과 지질구조. 암석학회지, 6, 151-165.
 고정선, 윤성효, 이상원, 1996, 경주 남산일대의 A-형 화강 암의 암석학 및 지화학적 특성. 암석학회지, 5, 142-160.
 김기완, 이흥규, 1965, 한국지질도, 1:50,000 충주도폭. 국립지질조사소, 30p.
 김용준, 조동룡, 이창신, 1998, 한반도 남서부 남원 일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구구조적 의미. 자원환경지질, 31, 399-413,
 김종환, 박중권, 고상모, 1995, 육천층군의 지질과 광상. 한국자원연구소 기본연구사업 보고서. KR-95(B)-4, 1-51.
 김진섭, 박맹언, 김근수, 1998, 충주지역 계명산층 내에 산

출하는 알카리 화강암의 지구화학적 연구. 자원환경지질, 31, 349-360.
 나기창, 김형식, 이동진, 이상현, 1982, 충주층군과 서산층군의 비교연구. 광산지질, 15, 177-188.
 박맹언, 김근수, 1995, 충주지역 회토류 광상의 성인: 산출 상태와 지화학적 특성. 자원환경지질, 28, 59-612.
 박맹언, 김근수, 박계현, 2005, 계명산 철광층 주변에 분포하는 산성 변성화산암의 성인. 암석학회지, 14, 169-179.
 박종길, 김성원, 오창환, 김형식, 2003, 육천변성대 북서부 계명산층 내 변성화산암류의 지구화학 및 지구연대학적 연구와 그 지구조적 의의. 암석학회지, 12, 155-169.
 박종길, 김성원, 오창환, 2004, 육천변성대 북동부 계명산층 변성화성암에 대한 사생대 연령의 해석의 문제점 및 재해석. 암석학회지, 13, 244-246.
 오민수, 1989, 어래산지역의 갈람석광상. 광산지질, 22, 151-166.
 이대성, 장기홍, 이하영, 1972, 육천계내 향산리돌로마이트 층에서의 Archacocyatha의 발견과 그 의의. 지질학회지, 8, 191-197.
 이종혁, 1999, 제2절 시대미상의 육천층군. 대한지질학회, 한국의 지질, 56-91.
 임명혁, 김영업, 장태우, 1991, 충주지역 대항산 규암층 주변 일대의 변형량 분석 및 변형작용사. 지질학회지, 27, 191-199.
 조문섭, 김현철, 2002, 중부 육천변성대의 변성진화: 최근의 연구결과 논평 및 문제점. 암석학회지, 11, 121-137.
 조문섭, 김태훈, 김현철, 2004, 육천변성대 규장질 변성용 회암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대: 신원생대(약7.5억년 전) 화산활동. 암석학회지, 13, 119-125.
 Barbarin, B., 1999, A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. Lithos, 46, 605-626.
 Bohrsen, 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. J. Petrol., 38, 1137-1166.
 Cheong, C.-S., Jeong, G.Y., Kim, H., Choi, M.-S., Lee, S.-H. and Cho, M., 2003, Early Permian peak metamorphism recorded in U-Pb system of black slates from the Ogcheon metamorphic belt, South Korea, and its tectonic implication. Chem. Geol., 193, 81-92.
 Cluzel, D., 1992, Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt (South Korea): intracontinental rift-related volcanic activity. J. Southeast Asian Earth Sci., 7, 195-209.
 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. Contrib. Mineral. Petrol., 8, 189-200.
 Eby, G.N., 1992, Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. Geology, 20, 641-644.
 Evensen, N.M., Hamilton, P.J. and O'Nions, R.K., 1978,

- Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 1199-1212.
- Kim, G.-S., Park, M.-E., and Enjoji, M., 1994, Banded and massive iron mineralization in Chungju Mine(I): Geology and ore petrology of iron ore deposit. *Econ. Environ. Geol.*, 27, 523-535.
- Kim, H., Cheong, C.-S., Cho, M. and Jeong, G.Y., 2005, Late Paleozoic metamorphism in the Ogcheon metamorphic belt, South Korea: U-Pb stepwise leaching ages of garnet affected by allanite inclusions. *Proceed. Annual Joint Conf., Mineral. Soc. Korea and Petrol. Soc. Korea*, 63.
- 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. *J. Petrol.*, 27, 745-750.
- Lee, K.-S., Chang, H.-W., and Park, K.-H., 1998, Neoproterozoic bimodal volcanism in the central Ogcheon belt, Korea: age and tectonic implication. *Precam. Res.*, 89, 47-57.
- Lee, M.J., Lee, J.I., and Lee, M.S., 1995, Mineralogy and major element geochemistry of A-type alkali granite in the Kyeongju area. *Korea. J. Geol. Soc. Korea*, 31, 583-607.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.-S., Kim, H., and Wingate, M.T.D., 2003, Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the north-western margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precam. Res.*, 122, 297-310.
- Li, X.-H., Li, Z.X., Zhou, H., Liu, Y., and Piny, 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. *Precam. Res.*, 113, 135-154.
- Li, X.-H., Li, Z.X., Ge, W., Zhou, H., Li, W., Liu, Y., and Wingate, M.T.D., 2003, Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 815 Ma? *Precam. Res.*, 122, 45-83.
- Li, W.-X., Li, X.-H., and Li, Z.-X., 2005, Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. *Precam. Res.*, 136, 51-66.
- 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.
- Ling, W., Gao, S., Zhang, B., Li, H., Liu, Y., and Cheng, J., 2003, Neoproterozoic tectonic evolution of the north-western Yangtze Craton, South China: implications for amalgamation and breakup of the Rodinia Supercontinent. *Precam. Res.*, 122, 111-140.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 12, 339-349.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 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. *J. Petrol.*, 44, 2003-2032.
- Reedman, A.J. and Um, S.H., 1975, The geology of Korea. Geological and Mineral Institute of Korea, 139pp.
- Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, R.B., Yoon, K.S., Rhyu, H.S., Jeong, S.W. and Park, J.N., 1973, Geological, geophysical and geochemical investigations in the Hwanggangni area Chungchong Pukdo. *Rept. Geol. Mineral. Explor., Part II, Geol. Min. Inst. Korea*, 1, 1-118.
- Tura, T., Deniel, C., 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. *Chem. Geol.*, 155, 201-231.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., and Chappell, B.W., 1987, A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95, 405-419.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A., 1976, Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed igneous rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45, 326-336.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, 50, 11-30.

(2005년 8월 6일 접수; 2005년 9월 8일 채택)