

계명산층 내의 충주 철광상 주변에 분포하는 산성 변성화산암의 성인

박맹언¹ · 김근수² · 박계현^{1,*}

¹부경대학교 환경지질과학과, 부산광역시 남구 대연동 599-1

²경남한일개발주식회사, 경남 창원시 명서동 185-6

Genesis of the acidic metavolcanic rocks distributed around the Chungju iron deposit in the Gyemyeongsan Formation

Maeng-Eon Park¹, Gun-Soo Kim², and Kye-Hun Park^{1,*}

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

²GNH Engineering Co., Ltd., Gyeongsangnamdo Changwon-si, Myeongseo-dong 185-6, Korea

요약: 계명산층 내의 충주 철광상 부근에서 산출되는 산성 변성화산암들은 매우 높은 희토류 원소 및 고장력 원소 농도를 갖는다. 비교적 높은 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값과 결여된 Nb(-) 이상치는 이들의 형성에 지각물질에 의한 혼입이 수반되지 않았음을 시사한다. 또한 지구조 판별도에서 판내부 환경에 도시된다. 이러한 지구화학적 특징들은 750 Ma의 연대를 보이는 문주리층의 산성변성화산암과 매우 비슷하다. 이들은 A1-형(Eby, 1992)에 분류되는 마그마의 지구화학적 특징을 나타내며, 대륙의 분열과 관련된 열곡환경에서 맨틀기원의 마그마가 분화되어 생성되었음을 지시한다. 약 330 Ma의 연대를 보이는 충주 철광상 부근의 알칼리 화강암 및 희유금속 광상과는 달리 동일지역에서 산출되는 산성 변성화산암들의 Sm-Nd 동위원소 자료는 명확한 동시선을 형성하지 않는다. 또한 낮은 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값을 갖는 알칼리 화강암과는 달리 산성 변성화산암과 희유금속광상은 비교적 높은 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값을 갖는다. 이러한 차이에 근거하여 다음과 같은 생성가설을 제시한다: 계명산층 내의 충주 철광상 부근에 분포하는 산성 변성화산암은 계명산층의 다른 지역과 문주리층 내의 산성 변성화산암들과 마찬가지로 신원생대인 750 Ma에 생성되었다. 약 330 Ma 경에 기존 A1-형 화성암과 일부 오래된 지각물질의 용융으로 알칼리 화강암이 생성되었다. 이와 동시에 열수작용으로 인한 산성 화산암 내의 물질 재배치로 희유금속광상이 형성되었으며, 뒤이은 약 280 Ma경의 광역변성작용시 산성 변성화산암의 Nd-Sm 동위원소계가 교란되었다.

핵심어: 옥천변성대, 계명산층, 판내부환경, A-형 화강암, 희유금속 광상

Abstract: Acidic metavolcanic rocks distributed around the Chungju iron deposit show significantly high abundances of rare earth elements and high field strength elements. Relatively high $\epsilon_{Nd}(0)$ values and lack of negative Nb anomaly suggest that assimilation of crustal material is not involved in their generation. They are plotted within the within-plate environment according the tectonic discrimination diagrams. Such geochemical characteristics are very similar to the acidic metavolcanic rocks of Munjuri Formation. They also show geochemical characteristics of A1-type magma of Eby (1992). All such diagnostic characters indicate differentiation of mantle-derived magma produced from the rift environment, related to the breakup of continent. In contrast to the alkali granites and the rare metal deposit both having age of c. 330 Ma, Sm-Nd isotopic data of the acidic metavolcanic rocks do not form well defined isochron. However, the alkali granites reveal low $\epsilon_{Nd}(0)$ values, while the acidic metavolcanic rocks and the rare metal deposit both have significantly higher $\epsilon_{Nd}(0)$ values. Considering such differences, we propose following generation hypothesis: The acidic metavolcanic rocks around Chungju iron deposit was erupted at 750 Ma as rest of the acidic metavolcanic rocks of Gyemyeongsan and Munjuri Formations. About 330 Ma ago, partial melting of existing A1-type igneous materials and some old crustal materials produced alkali granite. The rare metal deposit was also produced by redistribution of related materials within the

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

acidic volcanics due to hydrothermal activities occurred at the same time. Sm-Nd isotopic systematics of the acidic metavolcanic rocks were disturbed during the regional metamorphic event at ca. 280 Ma.

Key words: Okcheon metamorphic belt, Gyemyeongsan Formation, within-plate, A-type granite, rare metal deposit

서 론

경기육괴와 영남육괴의 사이에 놓여있는 옥천변성대는 생성 시기와 환경, 진화과정 등에 대하여 지난 수십년간에 걸쳐 많은 논란이 있었다. 특히 지난 10여년 동안에는 북중국과 남중국 사이의 대륙 충돌대가 한반도의 어디로 연장되느냐와 관련한 논의로 더욱 많은 관심을 불러일으켰다. 그러나 아직도 옥천변성대의 생성과 진화에 대한 통일된 결론을 내리지 못하고 있다. 옥천 변성대 중에서도 계명산층은 가장 많은 논란이 있는 부분이라고 할 수 있다. 이러한 논란에는 층서적인 위치와 생성시기 뿐만 아니라 구성암의 종류와 내재되는 광상의 형성과정 등까지 다양한 문제들이 포함된다.

구성암석을 보면, 충주도폭(김기완과 이홍규, 1965)이 조사된 이래 계명산층을 변성퇴적암으로 해석하는 견해가 우세하였으나(예, Reedman *et al.*, 1973) 최근에는 계명산층 및 인접한 문주리층 지역에 같은 종류의 변성화산암이 분포한다는 견해(Cluzel, 1992; 김종환 외, 1995; 강지훈과 류충렬, 1997; 조문섭 외, 2004; 고상모 외, 2005)가 상당한 지지를 받고 있다.

계명산층의 생성시기 또한 오랜 논란이 있어왔다. 계명산층에 인접한 향산리 돌로마이트층에서 캄브리아기 화석의 발견(이대성 외, 1972; Lee *et al.*, 1989)과, 향산리층의 상위에 계명산층이 정합적인 관계임(임명혁 외, 1991)을 따르면 계명산층은 고생대초에 형성되었음을 시사한다. 그러나 계명산층과 동일한 지구화학적 특징을 갖는 문주리층의 변성화산암에 대한 저콘 U-Pb 연대측정 결과는 약 750Ma의 연대를 나타내며(Lee *et al.*, 1998; 조문섭 외, 2004), 최근에는 계명산층 변성화산암 내의 저콘 U-Pb 연령이 약 27억년전으로 보고되었다(박종길 외, 2003). 한편 계명산층내 충주 철광상 부근의 알칼리 화강암과 희유원소 광상 등이 모두 약330Ma의 연대로 보고되었다(박맹언과 김근수, 1995; 김진섭 외, 1998). 이와 같이 일치하지 않는 연대결과들은 계명산층 내에 분포하는 철광상 및 희유금속 광상들(참조: 오민수, 1989; Kim *et al.*, 1994; 박맹언 외, 1997; 박맹언과 김근수, 1998)의 생성뿐만 아니라 계명산층 자체의 생성과 진화과정을 해석하는데 상

당한 지장을 초래하고 있다.

이 연구에서는 혼란스러운 계명산층의 구성암석과 생성연대 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 계명산층 내의 충주 철광상 부근에 분포하는 변성화산암에 한정하여 주원소, 희토류원소와 고장력 원소를 포함하는 미량원소 및 Nd 동위원소를 분석하였다. 이 연구의 분석 결과를 철광상 주변에 분포하는 알칼리 화강암(김진섭 외, 1998), 희토류원소 광상(박맹언과 김근수, 1995)에서 보고된 자료와 비교하였다. 또한 계명산층의 다른 지역에서 보고된 분석자료(박종길 외, 2003; 고상모 외, 2005) 및 문주리층의 변성화산암 자료(Lee *et al.*, 1998)와도 비교하였으며, 이를 종합하여 충주철광 부근의 산성 변성화산암 및 희유원소 광상과 알칼리 화강암의 기원에 대하여 논의하였다.

시료채취 및 분석

이 연구에서는 계명산층 내의 충주철광상 부근(Fig. 1)에서 채취한 16개의 표본에 대하여 주원소, 희토류원소를 포함한 미량원소, Nd 동위원소 등을 분석하였다. 전암 시료에 대한 주성분 원소 및 미량원소의 분석은 한국기초과학지원연구원에서 X-선 형광분석기(Philips PW1480)와 유도결합플라즈마 질량분석기로 분석하였다. Nd 동위원소 분석 및 Nd와 Sm의 정량분석은 이 연구에서 주된 비교 대상의 하나인 알칼리 화강암(김진섭 외, 1998) 및 주변의 희유금속 광상의 분석 자료들(박맹언과 김근수, 1995)과 마찬가지로 일본 쓰

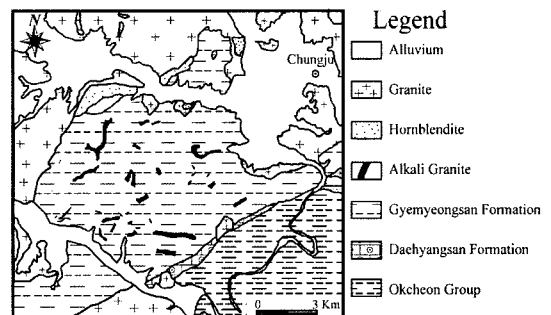


Fig. 1. Geologic map and sample location.

Table 1. Major and trace element abundances of the acidic metavolcanic rocks from Gyemyeongsan Formation in the vicinity of the Chungju iron deposit.

	KY-1	KY-2	KY-3	KY-4	KY-5	KY-6	KY-7	KY-8	KY-9	KY-10	KY-11	KY-12	KY-13	KY-14	KY-15	KY-16
SiO ₂	72.45	72.75	73.56	73.78	72.80	73.91	73.15	70.89	73.05	74.00	73.69	75.25	74.90	74.68	74.35	75.83
TiO ₂	0.38	0.34	0.31	0.38	0.23	0.38	0.41	0.43	0.39	0.45	0.37	0.23	0.27	0.59	0.31	0.37
Al ₂ O ₃	8.12	8.72	8.20	8.89	9.46	7.77	7.35	8.58	8.83	10.01	7.24	8.69	8.12	6.99	9.81	9.12
Fe ₂ O ₃ *	8.02	7.11	7.62	6.60	6.42	7.02	7.12	9.04	7.03	4.42	5.73	4.77	5.40	5.87	4.16	3.49
MgO	0.13	0.10	0.10	0.09	0.05	0.17	0.16	0.12	0.09	0.11	0.22	0.15	0.06	0.13	0.04	0.05
MnO	0.57	0.46	0.68	0.60	0.48	0.48	1.45	0.71	0.38	0.36	0.45	.66	0.28	2.42	1.69	1.43
CaO	1.93	1.57	2.43	1.68	1.62	2.11	2.68	1.90	1.74	1.32	1.82	0.36	2.38	1.40	0.23	0.17
Na ₂ O	2.74	2.39	2.11	3.02	1.35	2.19	1.83	2.46	2.33	1.21	2.05	2.35	1.96	3.13	4.46	4.61
K ₂ O	4.47	4.81	4.34	3.12	6.89	4.73	4.42	4.53	4.11	6.43	5.69	4.21	4.57	3.61	3.43	3.09
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.03	0.03	0.02	0.10	0.05	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.10	0.07	0.07
LOI	0.80	0.82	0.62	0.84	0.84	0.75	1.01	0.79	0.82	0.64	1.02	0.72	0.88	0.65	0.72	0.59
SUM	99.66	99.12	100.00	99.03	100.16	99.61	99.63	99.49	98.79	98.97	98.31	98.42	98.84	99.57	99.27	98.82
Ba	247	187	238	61	164	199	350	234	59	413	190	240	220	180	156	270
Rb	156	89	65	34	95	89	96	158	31	217	162	84	80	146	85	111
Sr	43	48	58	19	43	66	70	41	17	76	74	20	27	61	32	57
Ta	109	113	88	86	37	102	36	33	25	31	57	94	47	13	17	16
Nb	1886	1971	1215	1090	555	1708	697	526	556	638	472	1148	615	268	316	352
Hf	394	370	227	262	64	257	29	37	58	66	92	179	119	31	26	24
Zr	11912	10372	7284	8370	2489	8251	1162	1360	2552	3190	3704	5700	3814	1341	1184	1229
Y	1061	1213	789	608	367	1318	524	428	525	448	441	749	452	267	253	288
Th	244	220	272	306	101	201	277	259	146	278	120	150	175	56	78	70
U	68	59	68	47	37	56	97	75	14	70	42	69	34	12	15	13
Sc	1.6	1.7	1.3			3		0.82				0.98		1		

*Total iron as Fe₂O₃.

구마 대학에서 측정하였다. Nd 동위원소 분석은 열이온화 질량분석기(Finnigan MAT262RPO)를 사용하였으며, 측정된 동위원소비는 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 로 내부분별을 보정하였다. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 측정값의 오차는 평균 $\pm 0.003\%$ (1σ)이며, LaJolla Nd 표준에 대한 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 측정값은 $0.511854 \pm 9(2\sigma)$ 이다. Sm과 Nd의 정량분석은 HPLC를 이용하였으며 계산된 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 비율의 오차는 $\pm 0.3\%$ (1σ) 이내로 추정된다. 동위원소 비율 및 정량분석시의 Nd 및 Sm에 대한 배경값은 무시할만한 수준이었다.

결과 및 토의

주원소

충주 철광상 주변의 변성화산암들은 주원소 함량에서 몇 가지 특이한 양상을 보인다. 우선 SiO₂ 함량은 70.9~75.3 wt%로 상당히 높으며 비교적 좁은 범위의 변화를 보인다(Table 1). 주원소 함량 중에서 가장 특징적인 양상의 하나는 Al₂O₃ 함량이 7.0~10.0 wt%로 매

우 낮은 값을 보인다는 것이다. 이는 Al₂O₃의 주함유 광물인 장석류가 상당량 분별정출 되었음을 반영하는 것으로 판단된다. 장석의 분별정출 영향에 대해서는 회토류원소에 대한 토의 부분에서 다시 논의할 것이다.

충주 철광상 주변의 변성화산암들이 갖는 낮은 Al₂O₃ 함량과는 대조적으로 Fe₂O₃ 함량은 4.2~9.0 wt%로 매우 높은 편이다. 철함량과 실리카 함량과의 상관관계를 도형으로 살펴보면 충주 철광상 주변의 변성화산암 뿐만 아니라 계명산층과 문주리층 내에 분포하는 중성 내지 산성 변성화산암들의 대부분이 상당히 높은 철함량을 가짐을 알 수 있다(Fig. 2). 분화 말기로 생각할 수 있는 높은 SiO₂ 함량을 갖는 마그마가 매우 높은 Fe₂O₃ 함량을 갖는 이유로는 철분을 함유하는 광물이 정출되지 않아 마그마 내에 철분이 계속 농축되었다기 보다는 자철석처럼 철분을 많이 함유하는 광물의 집적 때문인 것으로 판단된다. 총알카리 함량이 높은 편이며, 세 시료를 제외한 K₂O/Na₂O 비율이 1.76~5.31의 범위를 차지하여 대체로 K₂O가 Na₂O에 비해서 더 높은 농도를 나타낸다.

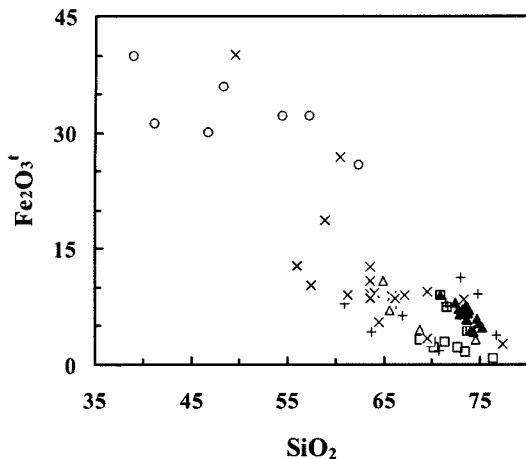


Fig. 2. Iron (total iron as Fe_2O_3) versus Silica diagram for the Chungju iron deposit area, including acidic metavolcanic rocks (solid triangles) and alkali granites (open squares) around the iron deposit, metavolcanic rocks of the Gyemyeongsan and Munjuri Formations (open triangles and crosses, data are from Lee *et al.* (1998), Park *et al.* (2003) and Koh *et al.* (2005) respectively), and iron ore deposit (open circles, data from Na *et al.* (1982)).

미량원소

미량원소 중에서 희토류원소와 고장력원소의 함량이 매우 높은 값을 보인다(Table 1, 2). 이는 비슷한 양상을 보이는 알칼리 화강암(김진섭 외, 1998) 및 희유금속광상(박맹언과 김근수, 1995)과 성인적으로 밀접한 연관이 있을 것임을 시사한다. 변성작용과 변질작용시에 비유동적이라고 알려진 고장력원소들을 이용한 화

산암의 분류도형(Winchester and Floyd, 1976)을 적용하면 충주철광 주변의 산성 변성화산암들은 과알카리 유문암(comendite-pantellerite) 영역에 도시된다(Fig. 3). 이는 고상모 외(2005)가 보고한 중성내지 산성의 계명산층 변성화산암들이 대부분이 인접한 조면암 영역에 도시되는 것과는 다소 상이한 결과이다. 충주철광산 부근의 변성화산암은 매우 높은 SiO_2 함량을 보이며, 희토류 광상이 함께 수반(박맹언과 김근수, 1995)하는 것으로 볼 때 충주철광산 부근의 변성화산암들은 희유광물 및 희토류 광물을 포함하는 분화 후기의 분별작용으로 인하여 SiO_2 의 증가와 함께 Nb/Y 비율이 다소 낮은 쪽으로 마그마 조성이 변화한 것으로 추정된다.

희토류원소 패턴을 살펴보면 경희토류원소가 중희토류원소에 비해 상대적으로 부화된 일반적인 변화경향을 따른다(Fig. 4). 그러나 경희토류 원소의 부화정도가 현저하여 La의 경우 콘드라이트 운석의 500~3,000배에 달한다. 중희토류원소의 경우도 콘드라이트의 수백배에 달하는 매우 높은 값을 유지하고 있다. 전체적으로는 가벼운 희토류원소가 중희토류원소에 비해 상대적으로 부화된 양상을 나타내지만 그 정도는 그리 높은 편이 아니다. 또한 Eu(-) 이상치가 대부분의 표본에서 관찰되며, 이상치의 크기가 매우 큰 것이 특징이다. 이는 사장석의 분별이 마그마의 진화에 매우 중요한 역할을 하였음을 나타낸다. 사장석의 분별은 주원소의 변화경향에서 살펴본 것처럼 낮은 Al_2O_3 및 CaO 함량으로 뒷받침된다. 일반적인 산성화산암들에 비해서 매우 높은 희토류원소의 부화 현상 및 극심한 Eu(-) 이상치를 보이는 것은 고상모 외(2005) 및 Lee *et al.*

Table 2. Rare earth element abundances of the acidic metavolcanic rocks from Gyemyeongsan Formation in the vicinity of the Chungju iron deposit

	KY-1	KY-2	KY-3	KY-4	KY-5	KY-6	KY-7	KY-8	KY-9	KY-10	KY-11	KY-12	KY-13	KY-14	KY-15	KY-16
La	518.7	796.0	414.4	538.4	359.9	425.7	323.1	468.8	446.3	595.6	240.0	474.6	320.0	198.5	176.2	244.9
Ce	1230.0	1723.8	1044.4	1224.7	689.4	885.3	929.0	1133.3	1011.6	1298.6	480.0	1338.9	680.0	511.0	430.4	583.7
Pr	149.3	230.7	130.0	158.6	83.1	130.2	114.3	161.8	120.3	189.6	51.0	170.0	64.0	60.2	47.5	57.0
Nd	641.0	960.4	481.6	538.5	377.1	499.5	553.6	782.7	498.8	901.6	220.0	650.0	210.0	273.1	167.4	224.8
Sm	188.1	175.9	126.9	129.0	81.8	152.4	177.7	217.0	101.2	225.5	33.3	100.0	39.1	41.8	50.4	63.9
Eu	11.1	13.1	6.3	9.4	4.0	8.8	11.9	12.1	5.5	12.0	2.3	10.0	2.5	2.9	1.4	4.2
Gd	202.2	183.5	131.6	174.3	67.2	132.7	218.8	226.9	110.2	185.9	52.0	130.0	50.0	58.1	52.0	75.2
Tb	30.7	31.3	24.9	30.3	10.3	25.0	43.2	39.9	18.9	37.0	9.1	20.7	7.8	10.5	8.1	12.3
Dy	191.2	201.2	165.9	188.7	77.5	134.7	282.5	238.6	98.2	208.5	64.8	161.1	56.8	66.4	54.3	80.9
Ho	43.1	45.1	32.8	38.8	16.2	33.7	54.7	46.5	19.0	39.8	14.0	33.0	13.3	13.6	13.3	16.3
Er	110.6	118.6	82.9	98.8	46.4	99.9	148.3	119.9	45.8	105.6	48.0	88.0	35.0	38.1	34.7	48.6
Tm	17.4	16.4	13.0	14.3	6.1	14.4	23.0	17.0	7.0	16.2	7.4	13.0	5.6	6.5	5.0	7.4
Yb	96.5	101.2	75.9	88.6	41.0	85.3	126.7	100.5	37.8	89.6	44.0	85.0	32.0	39.0	32.9	44.4
Lu	12.9	14.2	10.1	12.8	5.8	13.5	19.0	12.0	5.0	11.2	7.4	11.9	5.4	5.0	4.5	6.3

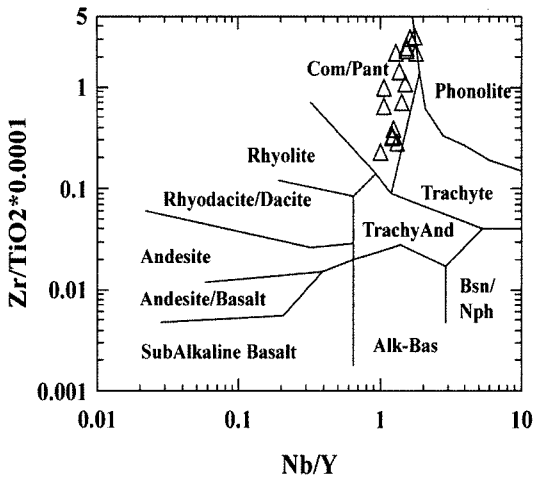


Fig. 3. Zr/TiO₂-Nb/Y classification diagram of Winchester and Floyd (1976) is applied to the acidic metavolcanic rocks for the Chungju iron deposit area. All the samples are plotted within comendite/pantellerite field.

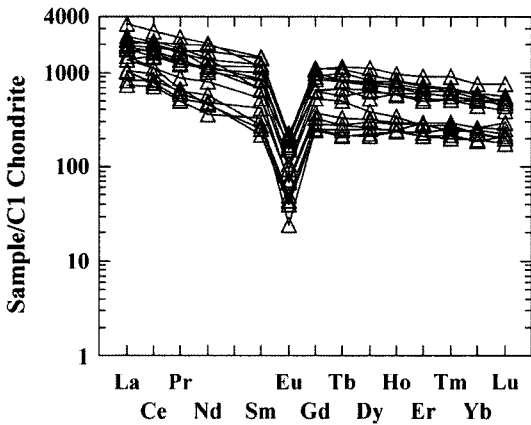


Fig. 4. Chondrite-normalized rare earth element patterns for the acidic metavolcanic from the Chungju iron deposit area.

(1998)의 자료에도 똑같이 나타난다. 이는 계명산층과 문주리층의 중성 내지 산성 변성화산암들이 모두 공통적인 성인을 갖고 있음을 시사한다.

친액정도가 감소하는 순서로 배열된 미량원소의 거미그림(Fig. 5)에서 대부분의 원소들은 친액정도의 감소에 따라 부화정도가 감소하는 일반적인 경향을 따른다. 그러나 Ba, K, Sr 및 Ti은 비슷한 친액정도를 나타내는 인접 원소들에 비해 매우 낮은 값을 보인다. 이런 음의 이상치는 K-장석과 사장석을 포함한 광물의 분별효과로 설명된다. Eu의 이상치가 Ba의 함량과 밀

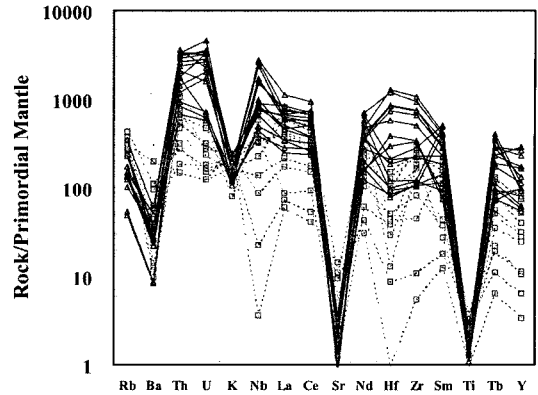


Fig. 5. Spider diagram for the acidic metavolcanic from the Chungju iron deposit area (open triangles). Significant negative anomalies at Ba, K, Sr and Ti seem to reflect fractionation of minerals including feldspars. Analyzed samples do not show any negative anomaly for Nb. However, acidic metavolcanic rocks (open squares with broken lines) of Park *et al.* (2003) show apparent negative anomalies of Nb. See text for the discussion.

접한 관계를 보이는 것으로 보아 Ba가 치환해 들어가는 대표적인 광물인 K-장석의 분별 역시 사장석의 분별과 함께 Eu(-) 이상치 형성에 상당한 영향을 미친 것으로 생각된다. Ti 역시 스피넬 등과 같은 Ti 함유광물의 분별영향으로 추정된다.

연구표본들은 Nb(-) 이상치를 보이지 않기 때문에 이들의 생성은 섭입대의 환경과 상관없이, 생성 과정에 지각물질에 의한 혼입의 영향도 거의 없었음을 나타낸다. 즉, 해양성 환경에서 맨틀기원의 마그마가 분화되어 산성의 마그마를 형성하였고, 분출과정은 매우 빠르게 일어나 지각의 혼입이 수반되지 않았던 것으로 해석된다. 이러한 환경으로는 대륙 판내부 환경에서 발달한 열곡대가 유력하다. 고상모 외(2005)와 Lee *et al.*(1998)이 보고한 계명산층 및 문주리층의 중성 내지 산성 변성화산암들도 Nb(-) 이상치를 보이지 않는다. 그러나 박종길 외(2003)의 계명산층 변성화산암들 중에는 현저한 Nb(-) 이상치를 보이는 것들도 있다. 이는 아마도 일부 표본의 경우 화산암의 분출과정에 포함된 지각물질이 혼재하기 때문일 것으로 판단된다.

마그마 유형 및 지구조 환경

이 연구에서는 Ga를 분석하지 않아 Ga 값에 근거한 A-형 마그마의 판별기준을 적용할 수 없으나, Nb, Y, Zr 등과 같은 고장력원소의 매우 높은 함량은 A-형 마그마의 특징을 잘 보여준다. 이러한 특징은 고상모 외

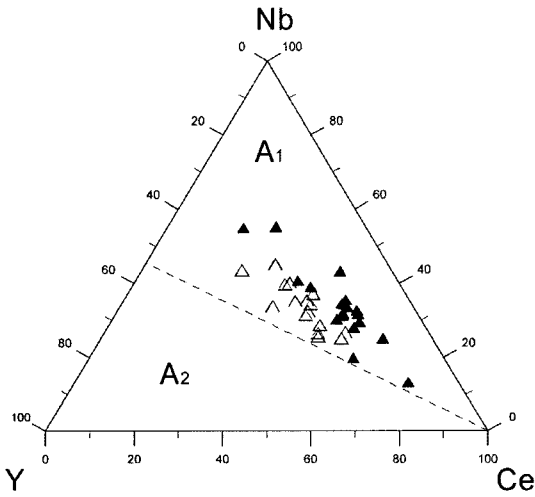


Fig. 6. Diagram for the subdivision of A-type magma according to Eby (1992). Studied acidic metavolcanic rocks (open triangles) of the Chungju iron deposit area are plotted within the field of A1-type. Metatrachytes (solid triangles) of Koh *et al.* (2005) are also shown.

(2005)의 연구결과와 일치한다. 또한 Eby(1992)의 A1-형 영역에 속한다 (Fig. 6). 이는 대강화강암(김용준 외, 1998), 남산화강암(Lee *et al.*, 1995; 고정선 외, 1996) 등과 같이 한반도의 다른 지역에서 나타나는 A-형 화강암들과는 구분되는 기원을 가짐을 의미한다. 즉, 충주철광 부근의 계명산층 내에 분포하는 산성 변성화산암은 섭입대와 함께 발달하는 조산대 환경과는 관련이 없으며, 원래가 해양성인 맨틀기원의 모마그마가 분화하여 생성된 산성 화산암이 분출되었던 것으로 판단된다. 즉, 이들이 생성되던 시기에 현재의 옥천변성대를 이루고 있는 부분에 열곡대가 발달하고, 판의 쪼개짐이 시작되었으며, 이러한 환경에서 지각 두께는 얇아지고 맨틀물질의 상승 및 용융이 일어났을 것으로 판단된다.

고장력원소들을 이용한 화강암질 마그마의 지구조 판별도(Pearce *et al.*, 1984)에서도 판내부 환경을 지시하며(Fig. 7), 앞에서 살펴본 것과 같이 지각물질의 혼염을 지시하는 Nb(-) 이상치가 발견되지 않는 점도 이러한 추론을 뒷받침한다.

Nd 동위원소

계명산층 내의 철광상 주변에 분포하는 산성 변성화산암들의 Sm-Nd 동위원소 분석자료는 뚜렷한 등시선을 정의하지 않으며 약 280 Ma 정도에 해당하는 기울기를 가지며 분산된다(Fig. 8). 이는 주변의 알칼리 화

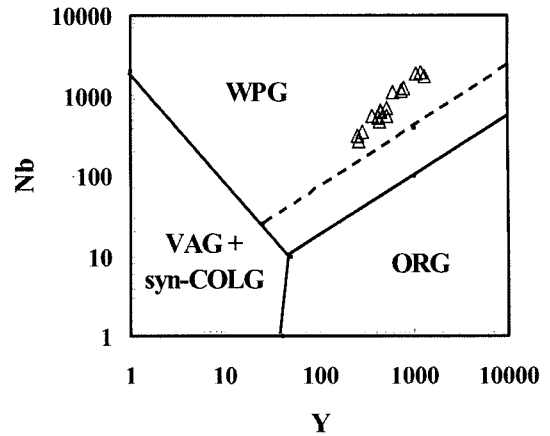


Fig. 7. Nb-Y tectonic discrimination diagram for the magma with granitic composition (Pearce *et al.*, 1984). Studied acidic metavolcanic rocks are plotted within the within-plate granite field.

강암들이 비교적 잘 정의된 약 330 Ma의 등시선을 보여주는 것(김진섭 외, 1998)과 대조적이다. 산성 변성 화산암이 등시선을 형성하지 않는 것은 이들이 주로 폭발적 분출상인 용회암에서 유래하였기 때문에 분출 시 주변의 기존 지각물질들을 많이 포함하였기 때문일 수 있다. 또한, 주변의 알칼리 화강암이나 중생대 대보 화강암들과 관련된 광화작용과 관련된 고대작용, 또는 옥천변성대의 광역변성작용 등의 시기에 동위원소계가 교란된 것으로 추정할 수 있다.

그러나 연구된 변성화산암의 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 동위원소 비율은 최소 0.512401에서 최대 0.512601로 상당히 높은 범위의 분포를 보인다(Table 3). 이러한 값은 맨틀 값에 상당히 근접한 값이며($\epsilon_{Nd}(0) = -4.63 \sim -0.72$), Lee *et al.*(1998)이 보고한 문주리층 내의 산성 변성화산암($\epsilon_{Nd}(0) = -5.39 \sim -2.90$)들 보다도 더 높은 값이다. 즉, 이들의 생성시 지각물질의 영향이 크지 않았음을 나타낸다. 이는 앞의 미량원소 논의에서 Nb(-) 이상치가 발견되지 않으며 이는 이들의 생성과정중에 지각물질의 혼염이 없었음을 언급한 것과 합치한다. 따라서 동위원소 값의 분산은 주로 변성작용 혹은 고대작용의 영향으로 해석된다.

한편 김진섭 외(1998)가 보고한 철광상 주변의 알칼리 화강암은 산성 변성화산암에 비하여 낮은 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 비율($\epsilon_{Nd}(0) = -13.50 \sim -2.99$)을 갖는다 (Fig. 8). 따라서 알칼리 화강암의 관입시에 고대작용이 있었다 하더라도 알칼리 화강암에서 유래한 물질이 직접적으로 상당한 영향을 주지는 않았을 것으로 판단된다.

Table 3. Sm-Nd isotopic systematics of the acidic metavolcanic rocks from Gyemyeongsan Formation in the vicinity of the Chungju iron deposit

Sample	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon(0)$	$\epsilon(750)$
KY-1	0.512496	188.1	641.0	0.1785	-2.8	-1.0
KY-2	0.512459	175.9	960.4	0.1115	-3.5	4.7
KY-3	0.512504	126.9	481.6	0.1603	-2.6	0.9
KY-4	0.512499	129.0	538.5	0.1457	-2.7	2.2
KY-5	0.512501	81.8	377.1	0.1320	-2.7	3.5
KY-6	0.512511	152.4	499.5	0.1856	-2.5	-1.4
KY-7	0.512544	177.7	553.7	0.1953	-1.8	-1.7
KY-8	0.512491	217.0	782.7	0.1687	-2.9	-0.2
KY-9	0.512419	101.2	498.8	0.1235	-4.3	2.7
KY-10	0.512437	225.5	901.6	0.1522	-3.9	0.4
KY-11	0.512441	33.3	220.0	0.0922	-3.8	6.2
KY-12	0.512436	100.0	650.0	0.0936	-3.9	6.0
KY-13	0.512416	49.1	210.0	0.1423	-4.3	0.9
KY-14	0.512401	35.8	273.1	0.0798	-4.6	6.6
KY-15	0.512601	53.4	167.4	0.1940	-0.7	-0.5
KY-16	0.512489	63.9	224.8	0.1728	-2.9	-0.6

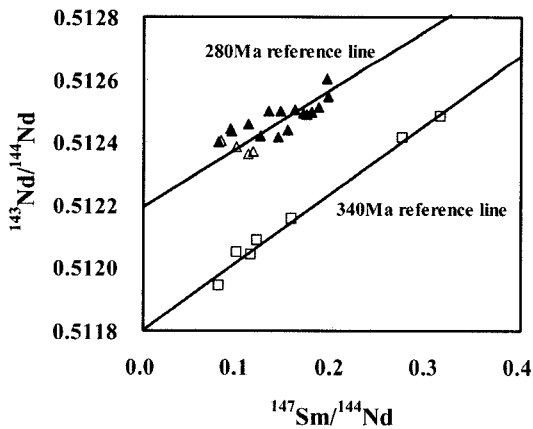


Fig. 8. Sm-Nd systematics of the studied acidic metavolcanic rocks (solid triangles). They do not form well-defined isochron. Instead, they scatter around a 280 Ma reference line. About 340Ma-old alkali granites (open squares, from Kim *et al.*, 1998) of the same area and acidic metavolcanic rocks of the Munjuri Formation (open triangles, from Lee *et al.*, 1998) are also shown.

산성 변성화산암의 생성시기

계명산층 내의 충주철광 부근에 분포하는 산성 변성 화산암들의 Sm-Nd 동위원소 자료들은 잘 정의된 동시 선을 형성하지 않으나 대략적으로 약 270 Ma 정도의 기울기를 갖고 분산된다(Fig. 8). 그러나 유사한 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 동위원소 비율(Fig. 8)과 매우 높은 희토류원소 및 고장력원소의 함량 등과 같이 여러 가지로 매우 닮은 지구화학적 특징들을 보이는 문주리층의 산성 변성

화산암은 750 Ma의 저콘 U-Pb 연대를 보인다(Lee *et al.*, 1998; 조문섭 외, 2003). 하지만 최근 박종길 외 (2003)는 계명산층 변성화산암으로부터 약 27억년의 SHRIMP 저콘 U-Pb 연령을 보고하였다. 한편 충주 철광상 주변에서 연구된 산성 변성화산암들과 함께 산출 되는 알칼리 화강암들은 약 340 Ma의 Sm-Nd 연대를 나타낸다(김진섭 외, 1998). 또한 옥천 변성대의 변성 퇴적암들의 변성연대는 약 280~290 Ma로 추정된다(Cheong *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2005). 이와 같이 서로 다른 연대들의 의미를 재검토하여 연구지역 산성 변성화산암들의 생성시기를 추론해 보았다.

2.69 Ga의 시생누대 연대

박종길 외(2003)는 계명산층의 변성화산암으로부터 분리한 저콘에 대한 SHRIMP U-Pb 연대측정을 실시하여 $2,685 \pm 11$ Ma의 연대를 구하였다. 이들은 추가적인 연구로 Nd 동위원소값을 구하였다. 그 결과 계명산층 변성화산암들의 결핍멘틀 모델연령이 1.23~1.54 Ga에 불과한 것으로 밝혀졌으므로 앞서 발표한 저콘 연대는 계명산층 변성화산암의 생성연대가 될 수 없으며 쇄설성기원의 물질일 가능성이 있다고 해석하였다(박종길 외, 2004). 박종길 외(2003)가 저콘을 분리한 표본이 오래된 지각물질을 함유하고 있을 가능성은 동일 시료에 대한 미량원소 분석결과가 현저한 Nb(-) 이상치를 보이고 있음과 합치한다. 따라서 앞으로의 연대 측정시에도 계명산층의 산성 변성화산암들로부터 저콘 U-Pb 연대측정을 시행할 경우 상당한 주의가 요구된

다. 충주철광상 부근의 산성 변성화산암들도 결핍맨틀 모델연령이 매우 젊게 나타나기 때문에 시생누대의 연령을 가질 수 없다.

750 Ma의 신원생대 연대

Lee *et al.*(1998)이 문주리층의 변성화산암으로부터 755.8 ± 1.3 Ma의 저콘 U-Pb 연대를 보고하였다. 이 저콘들은 일치곡선(concordia)상에 잘 놓이는 연대로 정밀도와 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 또한 거의 같은 지점에서 채취한 시료로부터 조문섭 외(2004)가 동일한 연령으로 볼 수 있는 747 ± 7 Ma의 저콘 SHRIMP U-Pb 연대를 보고하였다. 문주리층의 산성 변성화산암들은 매우 높은 희토류 원소 함량과 고장력 원소의 함량 등과 같이 계명산층의 산성 변성화산암들과 동일한 지구화학적 특징들을 보여주고 있으며, 따라서 동일한 시기에 동일한 기원으로 형성된 것일 가능성이 높다. 즉, 계명산층의 산성 변성화산암들 역시 750 Ma의 연대를 가질 것으로 기대할 수 있다.

약 330 Ma의 석탄기 연대

김진섭 외(1998)는 계명산층 내에 나타나는 알칼리 화강암들에 대한 Sm-Nd 동위원소 자료로부터 338 ± 30 Ma의 연대를 보고하였다. 이러한 연대는 희유금속 광상의 광석들 역시 330 ± 20 Ma의 연대(박맹언과 김근수, 1995)를 나타내기 때문에 상당한 신뢰성이 있으며, 알칼리 화강암의 관입과 광상의 형성 사이에 밀접한 연관성이 있음을 시사한다. 계명산층의 철광 인근에서 산출하는 우라늄이 주성분 원소로 산출되는 광물인 우란파이로클로어(uranpyrochlore)의 U_2O , Th_2O 및 PbO 함량에 대한 전자현미분석치(박맹언과 김근수, 1998)를 화학연대로 환산하면 매우 흥미로운 결과가 계산된다. 209 Ma로 계산되는 한 값을 제외한 다른 5 분석치는 매우 좁은 범위에 집중되며 $325 \pm 13(1\sigma)$ Ma의 평균값을 보인다. 우라늄-토륨 광석 역시 약 330 Ma의 연령이 신뢰성있는 결과임을 다시 한번 뒷받침해주며, 앞에서 언급한 것과 마찬가지로 알칼리 화강암의 관입과 광상의 형성이 밀접한 관련 있음을 지시한다. 이 연구의 산성 변성화산암들은 330 Ma 전후의 연대가 산출된 알칼리 화강암, 희유금속 광상 및 우라늄-토륨 광석들과 마찬가지로 모두 충주 철광상에서 가까운 지역에서 채집된 것들이기 때문에 역시 330 Ma의 시기에 형성되었을 가능성이 높다고 할 수 있다.

따라서 330 Ma와 750 Ma의 두 시기 모두 계명산층의 충주 철광 부근에서 산출되는 산성 변성화산암들의 생성과 관련한 특징적 양상들을 보인다. 이러한 모순

점을 해결하기 위해서 이 지역의 알칼리 화강암과 산성 변성화산암과의 관계를 보다 종합적으로 재검토해 볼 필요가 있다.

280 Ma의 연대

Cheong *et al.*(2003)은 옥천대 덕평리 지역의 흑색점판암의 U-Pb 전암연대와 우리나라이트 광물에 대한 U-Pb 화학연대를 측정하여 약 280~290 Ma에 해당하는 연대를 구하였으며, 이를 옥천대의 변성연대로 해석하였다. Kim *et al.*(2005) 역시 옥천변성대의 변성암에서 분리한 석류석에 대한 단계적 용출실험을 통해 유사한 연대를 구하였다. 유리질 혹은 미립의 반정들이 대부분을 차지하는 산성 화산암의 경우 변성작용시 쉽게 동위원소계의 교란이 야기될 수 있다. Fig. 8에서 산성 변성화산암들이 보이는 280 Ma의 시기도 이러한 변성작용시의 교란을 나타내는 것으로 해석할 수 있다.

알칼리 화강암과의 성인비교

충주철광 부근의 산성 변성화산암들과 주변의 알칼리 화강암(김진섭 외, 1998)과 비교해보면 대부분의 주원소는 대체로 비슷한 변화경향을 보인다고 할 수 있다. 미량원소 중에서 희토류원소와 고장력원소들의 함량이 매우 높은 값을 보이는 것은 공통적인 특징이다. 또한 두 암상 모두 A-형 마그마의 특징을 보이며, 그 중에서도 A1-형으로 분류된다. 이러한 요소들은 흔히 나타나는 현상이 아니기 때문에 알칼리 화강암과 산성 변성화산암류가 동일한 시기에 같은 기원의 마그마로부터 기원하였을 가능성을 시사한다.

그러나 두 암상들의 Nd 동위원소 값은 현저한 차이를 나타낸다. 즉, 산성 변성화산암의 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값은 비교적 높은 값을 보이며 이는 마그마의 생성과 분화에 지각의 영향이 별로 없었음을 시사한다. 이는 거미 도형에서도 Nb(-) 이상치가 없음으로 뒷받침된다. 이러한 사실은 변성화산암의 조성이 상당히 산성이란 점을 감안하면 매우 예외적인 현상이라고 할 수 있다. 반면에 알칼리 화강암은 훨씬 낮은 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값을 보이며 Nb(-) 이상치를 보이는 시료가 많다. 이 것은 알칼리 화강암의 생성시에는 지각의 영향이 어느 정도 있었음을 의미한다.

산성 변성화산암과 알칼리 화강암이 현저하게 다른 Nd 동위원소 값을 갖고 있음은 이들이 동원 마그마로부터 유래되었으며 단순히 지표에 분출된 화산암과 깊은 곳에 정지한 심성암일 가능성을 배제한다. 만약 이들이 동일한 시기에 형성되었다면 분출된 산성 화산암

의 경우 마그마가 비교적 빠르게 상승하여 분출되었으며 이로 인하여 지각에 의한 영향이 적었던 것으로 볼 수 있다. 반면에, 알칼리 화강암의 경우는 마그마가 생성 후 심부 지각 내에 정지한 후 동화작용을 일으키기에 충분한 시간 머무른 후 상부로 이동하여 관입하였기 때문에 보다 높은 지각물질의 영향을 보이는 것일 수 있다. 그러나 산성 화산암과 알칼리 화강암 모두가 매우 분화된 조성을 나타내기 때문에 알칼리 화강암을 형성한 마그마만 지각심부에 오래 체류했다고 보기 어렵다. 또한 알칼리 화강암들이 산성 화산암들을 직접 관입접촉하고 있으며, 알칼리 화강암의 입도 등으로 볼 때 비교적 얇은 깊이의 관입을 나타낸다. 이러한 얇은 깊이의 관입은 이들이 상당히 냉각되기 전에 지표 가까이로 상승하였다는 것을 나타내며, 화산암들에 비해서 훨씬 더 오랜 기간을 심부에 머무르다 올라왔다고 보기 어렵게 만드는 요소이다.

희유금속광상의 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값 역시 산성 화산암들과 마찬가지로 비교적 높은 값을 보이기 때문에 이들이 낮은 $\epsilon_{Nd}(0)$ 값을 갖는 알칼리 화강암에서 유래되었을 가능성은 없다. 따라서 광화작용시 알칼리 화강암은 단지 열원으로만 작용하였을 뿐이며, 이러한 광상성분들은 희토류원소와 고장력원소들을 고농도로 갖고 있던 산성 화산암들로부터 용출되어 광상이 형성되었을 것으로 생각된다. 이러한 광상형성 기작은 알칼리 화강암의 생성시기가 산성 화산암에 비해 상대적으로 후기일 가능성을 시사한다.

알칼리 화강암과 산성 화산암이 서로 다른 Nd 동위원소 조성을 갖는 것은 이들이 직접적인 성인적 관계를 갖지 않음을 나타낸다고 생각할 수 있다. 즉, 두 암상이 서로 다른 시기에 형성된 것으로 해석할 수 있다.

이 경우 동일한 지역에 산성 화산암들을 형성시킨 750 Ma의 시기와 알칼리 화강암을 형성시킨 330 Ma의 두 시기에 동일한 A1-형 마그마활동이 반복되었음을 의미한다. 문제점으로 지적할 수 있는 것의 하나가 알칼리 화강암이 상당한 규모의 독립암체를 형성하지 못하고 맥상 관입체의 형태로 계명산층 여러 곳에 산재하여 나타난다는 점이다. 이는 용융사건이 상당한 규모의 마그마를 형성할 정도로 오래 지속되지 못하였음을 시사한다. 또한 이 지역의 알칼리 화강암은 일반적인 A1-형 마그마들과는 달리 지각물질의 영향이 비교적 현저하게 나타난다.

A1-형의 비교적 드문 유형의 마그마 작용이 동일한 지역에 반복되어 나타난다는 것은 가능성이 그리 높지 않은 현상이다. 비록 독립된 동일한 A1-형 마그마 작용을 전적으로 배제할 수는 없지만, 석탄기에 소규모

열곡의 형성과 같은 국지적으로 상당한 정도의 지온상승을 가져온 지질사건으로 심부에서 소규모의 화강암질 마그마가 생성된 것으로 해석할 수도 있다. 이 경우 기존 규장질 지각물질의 재용융을 야기할 정도면 충분하며, 반드시 A1-형의 지구조적 조건일 필요는 없다. 백립암상에 이를 정도의 고온성 변성작용이 탐지되지 않기 때문에 아마도 짧은 기간 동안의 활동이었을 것으로 추정된다.

결론적으로 산성 화산암들은 750 Ma에 형성되었다고 보는 것이 더욱 타당하다고 판단된다. 알칼리 화강암들이 형성된 330 Ma의 시기에 A1-형의 마그마를 만들 수 있는 조구조적 환경이 반복되었을 수도 있으나, 이보다는 이 시기에 국지적인 소규모의 지각용융이 야기되어 750 Ma에 형성된 A1-형 물질들과 오래된 지각물질을 포함하는 마그마를 형성하였다. 이 마그마가 상승하여 열원으로 작용하면서 희토류원소, 고장력원소, 우라늄-토륨 등의 원소를 재배치하여 광상을 형성한 것으로 판단된다. 750 Ma의 생성시기로 초기치를 계산하면, 충주철광 부근의 산성 변성화산암들은 양의 값을 갖게 된다(Table 1의 $\epsilon_{Nd}(750)$ 참조). 이는 이들이 맨틀기원의 마그마 분화물이라는 앞에서의 추론을 다시 한번 뒷받침해준다.

결 론

계명산층 내의 충주 철광상의 주변에 분포하는 산성 변성화산암들은 높은 희토류원소의 함량과 현저한 Eu(-) 이상치, 높은 고장력원소의 함량의 특징을 가진다. 상부지각물질의 포함여부를 나타내는 지표로 활용되는 Nb(-) 이상치가 발견되지 않았음은 이들의 생성에 오래된 지각물질이 개입되지 않았음을 나타낸다. Nd 동위원소 역시 맨틀조성에 가까운 값을 나타내어 지각물질의 혼연이 상당한 규모로 일어나지 않았음을 지시한다. 지구조 판별도에서는 판내부 환경에 도시되며, 또한 A-형 마그마의 특징을 잘 보여준다. 한편 Eby(1992)의 분류에서는 A1-형 마그마의 영역에 도시된다. 이러한 점들을 종합할 때 이들이 섭입대와 관련된 조산대와는 무관한 환경에서 만들어졌으며, 대륙의 내부에 발달하는 열곡지대에서 맨틀 기원의 마그마가 분화되어 생성되었음을 지시한다.

충주철광상 부근의 산성 변성화산암들과 함께 동일한 지역에 분포하는 알칼리 화강암과 희유원소 광상의 Nd 동위원소 값을 비교하면 산성 변성화산암과 희유원소 광석의 Nd 동위원소 값은 서로 중첩된 범위를 나타내며, 모두 알칼리 화강암에 비해 훨씬 더 맨틀 값

에 가까운 값을 보인다. 따라서 희유원소 광석과 알칼리 화강암이 모두 약 330 Ma의 일치하는 연대를 나타내지만(박맹언과 김근수, 1995; 김진섭 외, 1998) 희유원소 광상을 형성한 원소들이 알칼리 화강암에서 유래되지는 않았다고 판단된다. 이보다는 알칼리 화강암의 관입시 야기된 지각 내 열수의 순환에 의해 변성화산암 내의 높은 희토류원소 및 고장력 원소들이 용출되어 광상을 배태시킨 것으로 추정된다.

충주 철광상 부근의 산성 변성화산암과 알칼리 화강암은 A1-형의 마그마로 볼 수 있는 여러 지구화학적 특징들이 공통적으로 나타나기 때문에 이들이 함께 330 Ma 경에 생성되었을 가능성을 전적으로 배제할 수는 없다. 하지만 Nb(-) 이상치와 Nd 동위원소 값에서 대조적인 값을 보임으로 직접적인 분화관계로 설명할 수 없다. 만약 이들이 동일한 시기에 동일한 근원물질의 용융에 의해 만들어졌다 하더라도 알칼리 화강암은 지각 심부에서의 체류 동안에 상당한 정도의 지각물질 혼염을 겪은 것으로 판단된다.

충주 철광상 부근의 산성 변성화산암들의 Sm-Nd 동위원소 분석자료는 잘 정의된 동시선을 정의하지 않으며, 약 280 Ma에 해당하는 기울기를 갖고 분산된다. 이러한 분산은 이들의 생성시 혹은 생성이후에 동위원소계에 상당한 교란이 일어났음을 의미한다. 이는 이들이 계명산층의 다른 지역 및 문주리층 내의 산성 변성화산암들과 마찬가지로 신원생대인 750 Ma에 생성되었으며, 약 330 Ma의 알칼리 화강암 관입과 그 후 약 280 Ma경의 광역변성작용 영향으로 Nd-Sm 동위원소계가 교란된 것으로 해석하는 것도 가능함을 시사한다. 이 경우 알칼리 화강암의 생성은 국지적인 지열상승으로 인한 지각물질의 재용융으로 생성된 것으로 볼 수도 있다. 즉, 이미 A1-형의 특징을 갖고 있던 지각물질과 기존 지각물질의 일부가 함께 용융되어 알칼리 화강암을 생성시켰다고 볼 수 있다. 동일한 A1-형의 마그마를 생성시킬 수 있는 환경이 750 Ma와 330 Ma의 시기에 동일한 지역에서 반복되어 일어나는 것은 확률적으로 드물다고 생각되기 때문에 지각 재용융 모델이 더 타당할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 한국학술진흥재단의 순수기초연구그룹 지원사업(KRF-2003-070-C00046)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드린다. 원고에 대해 건설적 비평을 해주신 심사위원들께도 감사드린다.

참고문헌

- 강지훈, 류충렬, 1997, 충주 계명산지역 옥천변성대의 화성 활동과 지질구조. 암석학회지, 6, 151-165.
- 고상모, 김종환, 박계현, 2005, 옥천변성대 충주지역의 신원생대 A-형 화성활동. 암석학회지, 14, 157-168.
- 고정선, 윤성효, 이상원, 1996, 경주 남산일대의 A-형 화강암의 암석학 및 지화학적 특성. 암석학회지, 5, 142-160.
- 김기완, 이흥규, 1965, 한국지질도, 1:50,000 충주도폭. 국립지질조사소.
- 김용준, 조동룡, 이창신, 1998, 한반도 남서부 남원 일대에 분포하는 A형 대강 화강암의 암석학, 지화학 및 지구조적 의미. 자원환경지질, 31, 399-413.
- 김종환, 박중권, 고상모, 1995, 옥천층군의 지질과 광상. 한국자원연구소 기본연구사업 보고서. KR-95(B)-4, 1-51.
- 김진섭, 박맹언, 김근수, 1998, 충주지역 계명산층 내에 산출하는 알칼리 화강암의 지구화학적 연구. 자원환경지질, 31, 349-360.
- 나기창, 김형식, 이동진, 이상헌, 1982, 충주층군과 서산층군의 비교연구. 광산지질, 15, 177-188.
- 박맹언, 김근수, 1995, 충주지역 희토류 광상의 성인: 산출 상태와 지화학적 특성. 자원환경지질, 28, 59-612.
- 박맹언, 김근수, 1998, 계명산층 페그마타이트에 수반되는 우라늄·토륨 광상의 지구화학적 연구. 자원환경지질, 31, 365-374.
- 박맹언, 김근수, 최인식, 1997, 계명산층내 알칼리 화강암 기원의 Nb-Y 광화작용에 수반되는 퍼구소나이트의 지구 화학 및 산출특성 연구. 자원환경지질, 30, 395-406.
- 박종길, 김성원, 오창환, 김형식, 2003, 옥천변성대 북서부 계명산층 내 변성화산암류의 지구화학 및 지구연대학적 연구와 그 지구조적 의의. 암석학회지, 12, 155-169.
- 박종길, 김성원, 오창환, 2004, 옥천변성대 북동부 계명산층 변성화산암에 대한 시생대 연령의 해석의 문제점 및 재해석. 암석학회지, 13, 244-246.
- 오민수, 1989, 어래산지역의 갈렘석광상. 광산지질, 22, 151-166.
- 이대성, 장기홍, 이하영, 1972, 옥천계내 향산리돌로마이트층에서의 Archaeocyatha의 발견과 그 의의. 지질학회지, 8, 191-197.
- 임명혁, 김영업, 장태우, 1991, 충주지역 대항산 규암층 주변일대의 변형량 분석 및 변형작용사. 지질학회지, 27, 191-199.
- 조문섭, 김태훈, 김현철, 2004, 옥천변성대 규장질 변성용회암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대: 신원생대(약 7.5억년 전) 화산활동. 암석학회지, 13, 119-125.
- 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.
- 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.
- Eby, G.N., 1992, Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20, 641-644.
- 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.
- Lee, H.-Y., Yu, K.M., and Lee, S.J., 1989, Microfossils from the limestone pebbles of the Hwanggangri Formation and the Hyangsanri Dolomite in the Okcheon Zone, South Korea. *J. Paleont. Soc. Korea*, 5, 91-101.
- 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. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 31, 583-607.
- 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.
- 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., PartII, Geol. Min. Inst. Korea*, 1, 1-118.

(2005년 8월 6일 접수; 2005년 9월 8일 채택)