Econ. Environ. Geol.
Vol. 31, No. 4, p. 349-360, 1998.

충주지역 계명산층 내에 산출하는 알카리 화강암의 지구화학적 연구

김진섭* · 박맹언** · 김근수*

A Geochemical Study of the Alkali Granite in the Kyeomyeongsan Formation

Jin-Seop Kim*, Meong-Eon Park and Gun-Soo Kim***

ABSTRACT : The alkali granite occurred as small stock and dyke is distributed in the Kyeomyeongsan Formation in the vicinity of the Chungju city. Geochemical characteristics in major and trace element of alkali granite in the Kyeomyeongsan Formation indicate that the alkali granites are peralkaline and have similar geochemical features to the A-type alkali granite. The rock enriched in HFSE such as Zr, Nb, Y, REE etc. According to the discrimination diagram the alkali granites mostly belong to the within-plate granite field, and to the A_1 group of A-type granite. This suggests that they might be emplaced in a extentional rift environment. The alkali granites are characterized by remarkably high total REE content, and enriched, relatively flat to somewhat HREE-depleted patterns with large negative Eu anomaly. The Sm-Nd age of the alkali granite is 338±30 Ma with $\varepsilon_{Nd(t)}$ beings -7.3 to -8.5. On the basis of the geochemical studies the source magma was derived from a enriched mantle-like source and had a few or clearly interaction with sialic continental crust. In conclusion, the alkali granitic rock of the Kyeomyeongsan Formation might be formed from the high F^- peralkaline magma that was emplaced in continental rift environment, and generated at the early Carboniferous.

서 론

충주지역 계명산층 내에는 알카리 교대작용에 수반된 희유원소광상 (Zr, Nb, REE)과 U-Th 페그마타이트 광상이 확인됨으로써 (박맹언, 김근수, 1994, 1995, 1998), 이들 광상을 형성한 광화관련 화성암의 파악에 대한 관심이 집중되고 있다. 계명산층 내에는 소규모 암주와 암맥상의 화성암이 광범위하게 발달되어 있다. 이들 암석은 충주도폭 (김기완, 이홍규, 1965)에서 중생대 백악기로 분류되었으나 그 산출이 계명산층 내에 한정되어 있어 정확한 관입시기에 대한 연구가 요청되어 왔다. 박맹언, 김근수 (1995)는 계명산층내에 발달하는 희유원소 광상 연구에서 광화시기를 고생대 석탄기로 보고함으로써 광화관련 화성암의 관입시기가 고생대일 가능성을 시사하였다.

본 연구는 계명산층 내에 불규칙하게 관입 분포하는 화성암중 산성암에 대한 주성분 및 미량원소, 희토류원소 특성과 Nd-Sm 동위원소 연구를 통하여, 이들 화성암류를 분류하고 기원과 조구조 환경 및 관입시기를 규명하기 위하여 수행되었다. 본 연구는 지금까지 국내에서 충분히 검토되어 있지 않은 고생대 화성활동과 이에 수반된 광화작용의 특성을 이해하는데 중요한 자료가 되며, 또한 고생대 한반도 조구조 환경의 특성을 파악함으로써 한반도 초기 지각 변천사를 확립하는데 유익한 단서가 될 것으로 생각된다.

* 부산대학교 지질학과 (Department of Geology, Pusan National Univ., Pusan 609-735, Korea)
** 부경대학교 지구환경과학부 (Division of Earth Environ. Sciences, Pukyong National University)

지질개요

연구 지역은 충청북도 충주시 서남부에 위치하며, 계명산층으로 알려진 변성암류가 넓게 분포하고 있다. 계명산층은 한반도 중부 충주지역을 중심으로 하여 옥천대의 북측 경계부와 경기 육괴의 두 구조대를 분리시키는 전이대를 따라 북동-남서 방향으로 분포하며, 변성양상이 옥천층군 및 경기 편마암복합체와 상이하고 지질구조가 복잡함에 따라 층서대비 및 지질시대에 대한 논란이 계속되고

있는 실정이다. 계명산층의 층서적 위치를 옥천계의 기반암으로 보는 견해 (김기완, 이홍규, 1965; 김옥준, 1968, 1970; 이대성, 1974)와 옥천계의 일부로서 그 상부 또는 하부로 해석 (Reedman *et al.*, 1973; Lee, 1986; Cluzel *et al.*, 1991; Kang, 1994)하는 견해로 구분된다. 퇴적시기에 대해서는 옥천계와 층서대비에 대한 증거 부족, 퇴적 후 변형 및 변성작용의 영향 등으로 인해 구체적으로 밝혀지지 않은 상태이며, 구조지질학적 해석에 의해 선캠브리아기에서 고생대까지 이견이 많다. Cluzel (1992)은 옥천대를 이화령, 보은, 두륜산, 피바령, 충주 unit로 구분하고, Kang (1994)은 옥천대 중 충주 북동부지역을 중심으로 부산, 충주, 계명산 nappe로 구분하였으며, 이 중 충주 unit 및 계명산 nappe는 섬장암 내지 석영몬조니암질 심성암과 조면암질 산성화산암을 수반한다고 보고하였다.

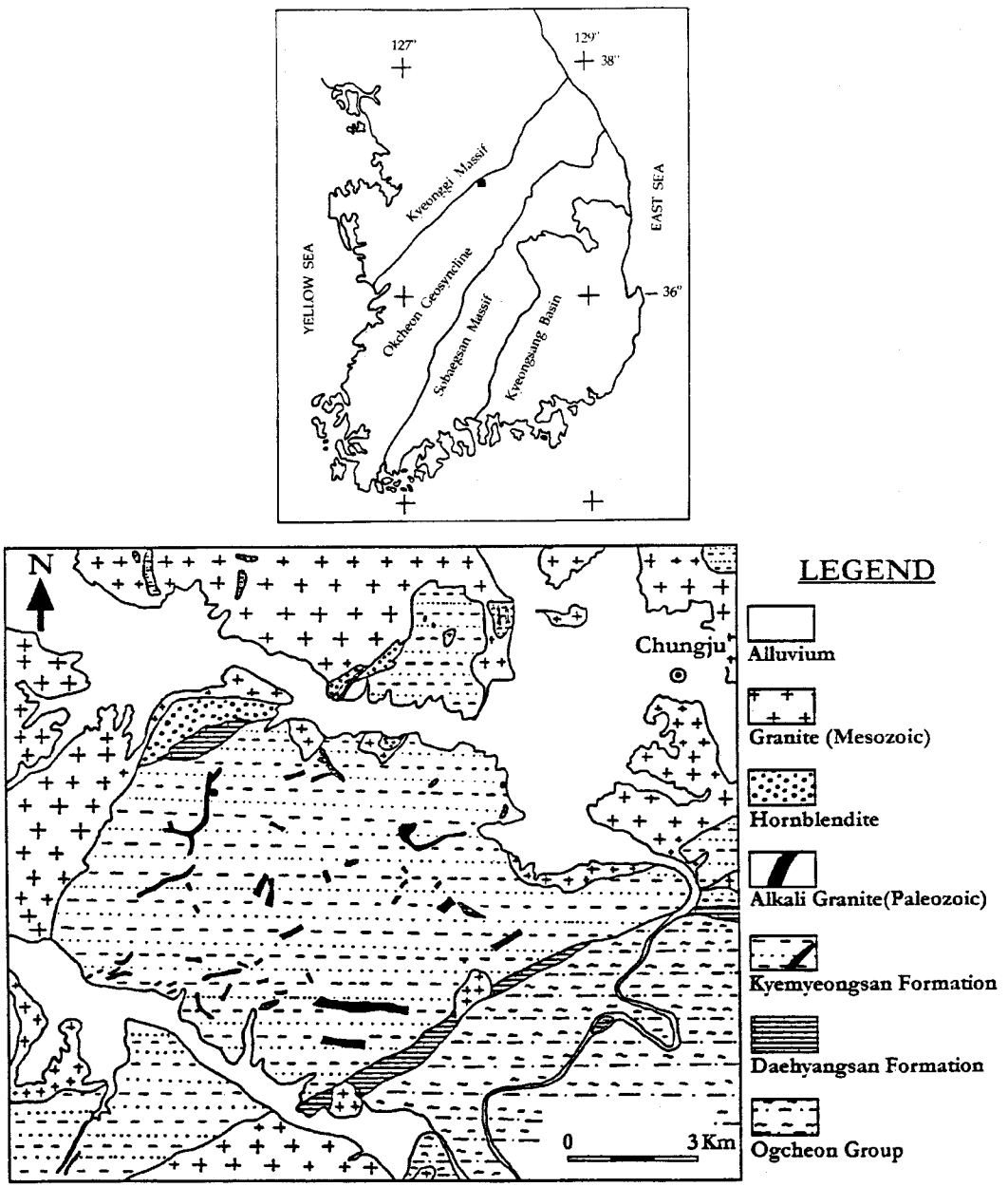

Fig. 1. Generalized geologic map of the study area.

계명산층을 구성하는 변성암은 편암, 규암, 각섬암 및 결정질 석회암으로 구분된다. 변성암류의 엽리는 N50~70° E의 주향과 60~80° SE의 경사를 보이며, 저 내지 중정도의 각섬암상의 변성정도가 알려져 있다 (나기창 등, 1982; Kim, 1977). 알카리 화강암 (박맹언, 김근수, 1995)은 계명산층 내에 소규모의 암주 또는 암맥상으로 분포하며 (Fig. 1), 압쇄암의 수반과 광물조성상의 차이에 의해 중생대 화강암인 충주화강암과 구별된다. 또한 상기 변성암류는 계명산층 외곽부에 광역적으로 관입 분포하는 저반상의 중생대 화강암질암에 의해 둘러싸여 있다.

알카리 화강암

암석기재

계명산층 내에 소규모의 암주 내지 암맥상으로 산출되고 있는 화강암질암 (알카리 장석 화강암)은 세립 내지 중립질의 입상조직을 띠며, K-장석의 색깔로 인하여 암석 전체가 연홍색을 띤다. 이들 암석은 계명산층 주변에 저반상으로 광범위하게 분포하는 중생대 화강암과는 구성광물, 입자조직, 화학조성의 차이로 인해 구분되나 경계부에서는 노두의 발달이 불량하여 상호간의 관계 파악이 어렵다. 일반적으로 철광상 및 REE 광체와 밀접히 수반되어 분포하고 있다. 편암을 포획하거나 뚜렷한 관입에 의한 접촉관계를 나타내며 산출되고, 단층에 의해 분포양상이 규제되기도 한다. 구성광물의 함량변화는 매우 불규칙하고, 유색광물이 많은 석영섬장암에서 유색광물이 거의 수반되지 않는 알카리 화강암에 이르는 분화양상을 나타낸다. 강한 파쇄작용에 의해 압쇄암화되어 있으며, 다량의 세립질 알카리장석들이 재결정작용에 의해 형성되어 있다. 저반으로 분포하는 중생대 화강암은 계명산층과의 경계부에서 변질작용에 의한 알카리 장석의 형성과 교대조직이 발달하지 않는데 비하여 알카리 화강암은 편암과의 경계부에서는 교대작용을 수반한 희토류원소 광상을 형성한다 (박맹언, 김근수, 1995).

알카리 화강암은 암맥상으로 산출되는 암상과 교대상으로 산출되는 암상의 두 유형으로 나타난다. 모암인 편암을 자르는 양상을 나타내지만 일부는 접촉관계가 점이적으로 변화하는 양상을 보이기도 한다. 교대암의 암상으로 산출되는 알카리 화강암은 암맥상의 암석에 비해 K-장석이 보다 우세하며 석영의 함량이 감소하는 경향이 있다. 이러한 암상들 간의 상호관계는 점이적이며 입자의 크기와 조직으로 볼때 분화 차이에 의한 결과로 생각된다. 충주 도폭에서 중생대 백악기 화강암으로 분류하였으나 지금까지 이들 암석에 대한 절대 연령 측정은 수행되지 않았다. 산출 및 분포 특성이 계명산층 내에 국한되고, 특히 충주지역 철광상이나 희유원소 광상과 밀접하게 수반되는 특성으로 보아 희유원소 광화 관련 화강암으로 추정되어 왔다 (박맹언, 김근수, 1995). 구성광물의 모드 조성 (Table 1)에 근거한 Streckeisen (1976)의 분류에 의하면 알카리 화강암 영역에서 석영섬장암 영역까지 다양한 조성 변화를 보인다 (Fig. 2).

주구성광물은 K-장석 (주로 미사장석), 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석 등이며, 갈렴석, 저어콘, 스핀, 형석, 인회석, 휘석 등을 비롯하여, 변질산물인 견운모, 방해석, 녹니

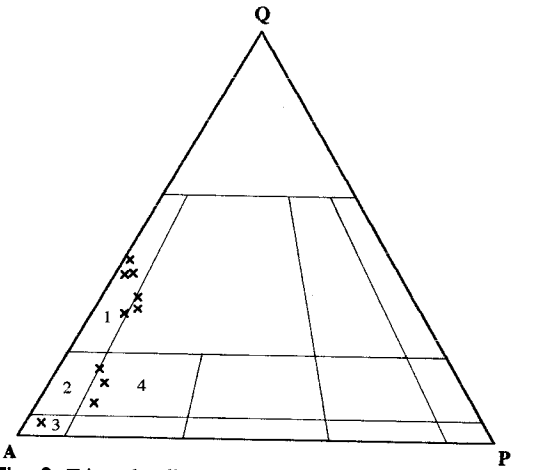

Fig. 2. Triangular diagrams of modal quartz (Q)-alkali feldspar (A)-plagioclase (P) for the alkali granitic rocks. 1; Alkali feldspar granite, 2; Quartz alkali feldspar syenite, 3; Alkali feldspar syenite, 4; Quartz syenite.

Table 1. Modal composition of the alkali granite in the Kyeomyeongsan Formation (in volume %).

Sample no.	CJ-21	CJ-22	CJ-31	CJ-32	CJ-33	CJ-41	CJ-42	CJ-43	CJ-44	CJ-47
Quartz	33.5	29.5	13.7	16.7	9.6	42.3	37.7	38.3	30.5	5.2
Alkali-feldspar	58.1	62.3	70.9	70.5	77.2	56.4	57.4	55.6	58.2	88.9
Plagioclase	6.4	5.8	9.5	7.1	10.1	0.6	1.3	2.9	7.5	2.3
Mafic mineral	1.6	0.1	3.8	3.2	1.1	0.4	2.5	1.9	1.2	1.2
Accessary mineral	0.3	0.5	0.5	0.7	0.8	0.2	0.6	0.4	0.2	1.5
Opaque mineral	0.1	1.8	1.6	1.8	1.2	0.1	0.5	0.9	2.4	0.9

Table 2. Microprobe analyses of the K-feldspar and Plagioclase for the alkali granite.

	K-feldspar					plagioclase			
SiO_2	64.48	64.20	64.38	64.94	64.10	67.72	66.59	67.90	68.40
Al_2O_3	18.41	17.65	17.92	17.65	18.13	18.77	18.93	19.39	19.58
Na_2O	0.45	0.59	0.59	0.54	0.89	11.14	10.97	11.21	11.04
K_2O	17.51	17.21	16.27	17.00	16.71	0.29	0.17	0.00	0.18
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
Sum	100.84	99.66	99.15	100.13	100.18	97.91	96.65	99.04	99.20
Formular (O=8)									
Si	2.98	3.00	3.01	3.01	2.98	3.02	3.00	2.99	3.00
Al	1.00	0.97	0.99	0.97	0.99	0.99	1.01	1.01	1.01
Na	0.04	0.05	0.05	0.05	0.08	0.96	0.96	0.96	0.94
K	1.03	1.03	0.97	1.01	0.99	0.02	0.01	0.00	0.01
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00

석 등이 수반된다. 미문상 조직과 퍼어사이트는 관찰되지 않으며 미사장석의 격자상 쌍정이 우세하게 나타난다.

광물 화학조성

알카리 화강암의 구성광물의 화학조성을 파악하기 위하여 고려대학교 전략광물자원 연구센터의 JXA 8600 전자현미분석기 (EPMA)를 이용하여 광물조성 분석을 실시하였다. 광물의 정량 분석은 EDS (energy dispersion mode)으로 하였으며, 분석 조건은 가속전압 (accelerating voltage); 15 kv, 빔 직경 (beam diameter); 10 μm, 빔 전류 (probe current); 30 nA, 빔 조사 시간; 60 sec에서 행해졌다.

장석류는 주로 K-장석 (미사장석)과 알바이트 성분 (Ab98-100)을 주로하는 순수한 Na 사장석으로 구성되어 있다 (Table 5). 흑운모의 화학조성은 Fe/(Fe+Mg)비가 0.33~0.36의 범위로 흑운모 영역에 속한다 (Table 6). 각섬석 및 휘석은 Ca 성분이 풍부하며, 각섬석은 tschermakitic hornblende와 tschermakite에 해당되며, 휘석은 diopside와 hedenbergite 고용체 영역에 상당한다 (Table 2).

암석지구화학

분석방법

전암 시료의 주성분과 미량원소 분석은 기초과학지원연구소에서 Philips사의 XRF (X-ray Fluorescence Spectrometry/PW 1480)와 ICP/MS를 사용하여 분석하였으며, 분석시 측정강도를 얻기 위한 전압, 전류 조건은 전압 40 Kv, 전류 30 mA이다. 검정에 이용된 표준물질은 미국

Table 3. Microprobe analyses of the biotite for the alkali granite.

SiO_2	39.69	39.32	39.86	38.87	39.93	40.15	39.07	39.30	39.45	39.70
Al_2O_3	11.77	11.30	11.90	11.62	11.32	12.32	11.63	11.84	11.81	11.88
TiO_2	0.45	0.44	0.38	0.65	0.58	0.43	0.44	0.00	0.61	0.47
FeO	15.62	15.23	14.83	15.46	15.53	14.15	15.00	14.07	14.20	14.68
MgO	16.19	15.66	16.53	15.67	15.57	15.52	15.67	15.71	16.07	15.93
MnO	0.94	0.53	0.58	0.59	0.63	0.81	0.84	1.01	0.88	0.91
Na_2O	0.31	0.27	0.26	0.00	0.00	0.00	0.27	0.32	0.41	0.39
K_2O	10.65	10.19	10.66	10.45	10.64	8.94	10.08	10.15	10.52	10.56
Sum	95.62	92.93	95.01	93.31	94.18	92.32	93.01	92.38	93.95	94.52
Formular (O=22)										
Si	5.98	6.07	6.00	5.99	6.09	6.13	6.02	6.07	6.01	6.02
Al	2.09	2.06	2.11	2.11	2.04	2.22	2.11	2.16	2.12	2.12
Ti	0.05	0.05	0.04	0.08	0.07	0.05	0.05	0.00	0.07	0.05
Fe	1.97	1.97	1.87	1.99	1.98	1.18	1.93	1.82	1.81	1.86
Mg	3.64	3.60	3.70	3.60	3.54	3.53	3.60	3.62	3.65	3.60
Mn	0.12	0.07	0.07	0.08	0.08	0.11	0.11	0.13	0.11	0.12
Na	0.09	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	0.10	0.12	0.11
K	2.05	2.01	2.05	2.05	2.07	1.74	1.98	2.00	2.04	2.04

Table 4. Microprobe analyses of the amphibole and pyroxene for the alkali granite.

	amphibole						pyroxene			
SiO_2	44.71	42.89	42.23	44.45	44.41	51.24	50.33	50.46	51.16	51.25
Al_2O_3	7.11	7.90	8.22	6.71	7.51	0.93	0.72	0.80	0.61	1.28
TiO_2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	19.41	19.90	19.79	18.81	19.56	15.30	16.71	15.49	14.94	14.78
MgO	9.77	9.52	9.29	9.91	9.85	8.78	7.77	8.41	8.42	8.08
MnO	0.92	1.01	1.00	1.16	1.02	0.63	1.14	1.25	0.75	0.78
Na_2O	1.88	2.19	2.18	1.96	1.98	1.91	2.13	1.71	2.07	2.72
K_2O	1.52	1.69	1.38	1.27	1.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	10.87	10.84	10.67	10.49	10.79	19.70	20.07	20.23	20.02	19.10
Sum	96.18	95.94	94.75	94.76	96.40	98.48	98.87	98.34	97.96	97.95
formular (O=23)						formular (O=6)				
Si	6.95	7.07	6.71	6.99	6.89	2.00	1.99	1.99	2.01	2.01
Al	1.30	1.46	1.54	1.24	1.37	0.04	0.03	0.04	0.03	0.06
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	2.52	2.62	2.63	2.47	2.54	0.50	0.55	0.51	0.49	0.49
Mg	2.26	2.23	2.20	2.33	2.28	0.51	0.46	0.49	0.49	0.47
Mn	0.12	0.13	0.14	0.15	0.13	0.02	0.04	0.04	0.02	0.03
Na	0.57	0.67	0.67	0.60	0.59	0.14	0.16	0.13	0.16	0.21
K	0.30	0.34	0.28	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	1.81	1.83	1.81	1.77	1.79	0.82	0.85	0.85	0.84	0.80

지질조사소에서 제작한 국제공인 표준물질 12개와 상용으로 시판되는 MBH analytical의 표준물질 12개이다. Nd동위체 조성 분석은 일본 쯔꾸바대학 지구과학연구과의 Finnigan MAT262RPQ (nine Faraday cup collectors) 질량분석기를 사용하여 측정하였다. 측정된 동위원소비 ($^{143}Nd/^{144}Nd$)는 $^{146}Nd/^{144}Nd$=0.7219로 규격화 (normalize)하였다. LaJolla 표준시료에 대한 $^{143}Nd/^{144}Nd$비의 값은 0.511854±9 (2 σm)이다. 농축된 Sm과 Nd는 HPLC data에 근거하여 동위체 희석법으로 재측정하였다.

$^{147}Sm/^{144}Nd$의 오차는 ±0.3% (1σ)보다 좋다고 추정되며 (Na, 1994), $^{143}Nd/^{144}Nd$의 오차는 시료 평균±0.003% (1σ)이다. 동시선 연대 (isochron age)는 Kullerud (1991)의 최소자승법과 ^{147}Sm의 붕괴상수 $6.54\times10^{-12}\,yr^{-1}$ (Lugmair, Marti, 1978)을 이용하여 계산하였다. 동시선상의 데이타의 정확도를 MSWD 대신 goodness-of-fit(R^2)로 나타내었다.

주성분 원소와 미량 원소

알카리 화강암의 주성분 원소 및 미량 원소 함량을 Table 5에 나타내었다. 알카리 화강암은 68.70~76.30 wt.% SiO_2, 7.35~14.75% Al_2O_3, 0.71~8.13% FeO* 및 비교적 높은 알카리 함량 (6.25~9.96%)을 가지며, 높은 K_2O/Na_2O (1.65~5.31)값이 특징적이다. 주성분 원소의 조성은 낮은 CaO, MgO 및 Al_2O_3, 그리고 높은 Na_2O+K_2O, K_2O/Na_2O 및 (Fe_2O_3/FeO+Fe_2O_3+MgO) 비 (0.55~0.64)를 보여줌으로써 A-형 화강암 (Ishihara, 1988; Loiselle, Wones, 1979)과 유사한 특성을 나타낸다. 부성분 광물로 수반되는 형석의 공생은 간접적으로 높은 F의 활동도를 지시한다. A-형 화강암은 흔히 상당한 양의 희토류원소-함유 광물을 수반하는데 이는 본 지역의 알카리 화강암 내에서도 높은 희토류원소 함량과 부성분 광물로 희토류원소를 함유하는 광물의 존재와 잘 부합된다.

Winchester, Floyd (1977)가 제안한 SiO_2에 대한 Zr/TiO_2 도표에서 알카리 화강암은 주로 유문석영안산암 (rhyodacite)과 유문암 (rhyolite)에서 퍼알카린 유문암 또는 석영조면암을 지칭하는 코멘다이트 (comendite)-판텔러라이트 (pantellerite) 영역에 도시된다 (Fig. 3). 알루미나 포화도에 근거한 분류 (streckeisen, 1976)에 의하면 본 역의 알카리 화강암은 퍼알루미나 (peraluminous)에서 퍼알카린 (peralkaline) 화강암 계열에 해당되며 (Fig. 4), 노옴 값에서 부분적인 acmite의 존재는 퍼알카린 마그마의 특성을 반영한다. 이들 암석의 알카리 마그마의 특성은 아래의 미량 원소의 자료에 의해서도 역시 제시된다. 비교적 높은 Ba, Rb 및 낮은 Sr함량을 보이며, 높은 Zr (88~2043 ppm)과 Hf (2~53 ppm) 함량, 그리고 역시 높은 Ta, Nb, Y 및 Ce와 같은 HFSE (high field strength elements)의 함량을 가진다.

알카리 화강암은 후기의 관입암에 의한 광역적, 국부적 변성작용을 받았기 때문에 이동성이 큰 알카리 원소들을

Table 5. Major and trace element abundances of the alkali granite.

Sample no.	CJ-21	CJ-22	CJ-31	CJ-32	CJ-33	CJ-34	CJ-41	CJ-42	CJ-43	CJ-44	CJ-45	CJ-46	CJ-47
SiO_2 (%)	76.30	69.85	68.70	70.21	71.28	72.62	73.36	73.68	73.15	70.89	73.05	74.00	71.52
TiO_2	0.01	0.23	0.16	0.12	0.17	0.07	0.20	0.27	0.41	0.43	0.39	0.45	0.24
Al_2O_3	12.13	14.75	14.53	14.49	13.64	14.17	13.59	10.16	7.35	8.58	8.83	10.01	10.40
FeO*	0.71	2.67	2.89	2.08	2.71	2.08	1.55	3.90	6.41	8.13	6.33	3.98	6.66
MnO	0.01	0.50	0.39	0.22	0.41	0.20	0.11	0.28	1.45	0.71	0.38	0.36	0.38
MgO	0.01	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.02	0.07	0.16	0.12	0.09	0.11	0.06
CaO	0.17	1.22	2.08	1.84	0.73	1.40	0.28	1.08	2.68	1.90	1.74	1.32	0.17
Na_2O	2.48	2.64	2.99	4.01	1.75	4.08	1.70	2.69	1.83	2.46	2.33	1.21	1.51
K_2O	6.62	6.64	4.94	4.71	7.88	4.38	8.26	4.71	4.42	4.53	4.11	6.43	5.96
P_2O_5	0.01	0.07	0.10	0.07	0.05	0.03	0.04	0.02	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01
L.O.I.	0.44	1.21	1.35	2.07	1.20	0.92	0.71	0.94	1.06	0.80	0.84	0.63	0.61
Sum	98.89	99.82	98.16	99.87	99.85	99.99	99.82	97.80	98.67	98.59	98.11	98.52	97.52
Ba (ppm)	221.06	1250.85	841.88	758.61	1198.27	680.04	684.71	432.45	351.15	236.02	54.19	452.15	230.61
Rb	170.45	164.03	123.74	24.82	14.48	122.73	160.59	123.04	92.67	167.64	33.16	237.20	178.23
Sr	28.03	193.77	168.99	143.62	172.02	158.64	50.47	108.20	81.75	41.04	16.17	77.19	23.57
Ta	10.69	12.09	10.53	4.56	7.98	6.54	12.21	37.49	99.13	73.16	14.56	124.06	71.75
Nb	76.20	169.36	98.70	36.45	87.83	55.12	178.00	324.86	544.35	804.76	332.96	912.78	604.50
Hf	3.67	1.19	2.11	7.45	5.23	2.35	11.45	18.35	37.63	52.38	47.57	43.71	42.05
Zr	129.72	87.96	101.43	230.87	162.13	68.54	378.08	715.65	1429.94	2042.82	1562.40	1704.69	1724.05
Y	66.80	92.02	88.12	25.42	66.35	42.44	154.00	176.11	243.60	527.38	315.64	474.89	373.25
Th	32.46	16.91	23.68	11.37	27.18	25.83	65.52	128.50	276.68	258.70	206.32	277.60	251.53
U	8.40	1.14	2.75	1.62	0.96	3.61	9.66	25.95	96.71	74.70	44.23	70.28	42.74

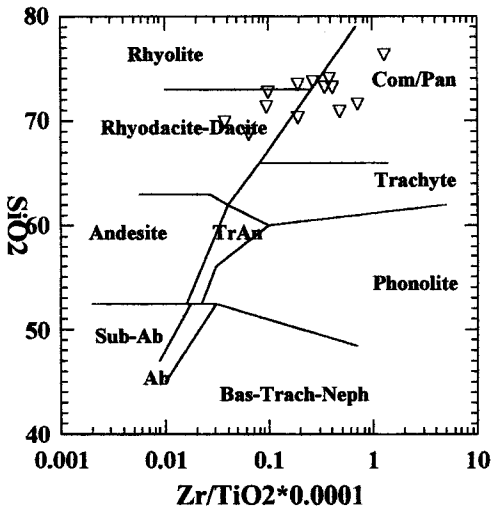

Fig. 3. SiO_2 vs. Zr/TiO_2 diagram of Winchester and Floyd (1977).

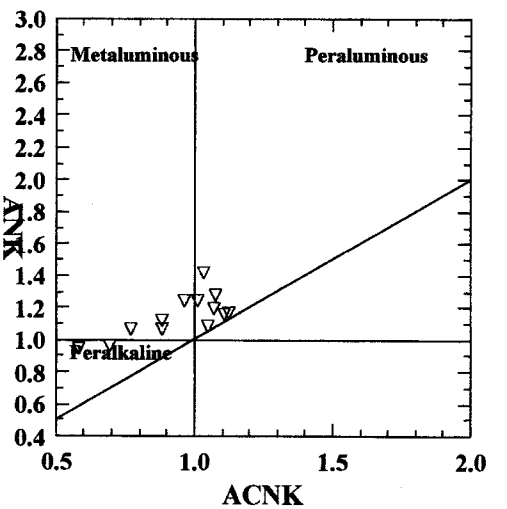

Fig. 4. Molar $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ vs. $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O+CaO)$ diagram of the alkali granite.

변성암의 특성에 이용하는 것은 합리성이 결여된다. 따라서 계명산층 내의 알카리 화강암에 대한 분류는 변질 또는 변성과정에서 상대적으로 이동성이 적은 불호정성 (immobile) 미량 원소를 이용하였다. 미량 원소 중에서 Y과 Nb 사이의 비는 암석의 성인적 특성을 밝히는데 중요한 정보를 제공 (Pearce, Cann, 1973)해 왔으며, 특히 변성암 지역에서 불호정성 원소 (immobile element)인 Zr/TiO_2 및 Nb/Y 비를 암석의 특성을 규명하는데 이용해 왔다 (Floyd and Winchester, 1978). 이들 원소의 비율을 이용한 도표에서 Zr/TiO_2 비는 분화 지수 (dif- ferentiation index)를 제공하고, Nb/Y 비는 알카리도 (alkalinity)를 지시한다. Floyd, Winchester (1978)에 의한 Zr/TiO_2-Nb/Y 도표에서, 계명산층 내의 알카리 화강암은 특징적으로 높은 Nb/Y 비를 나타내며 이는 알카리

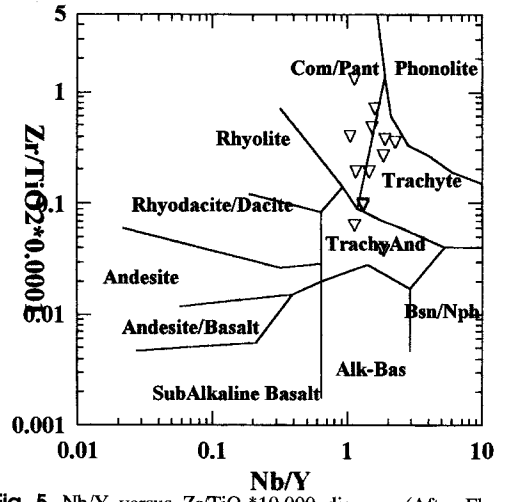

Fig. 5. Nb/Y versus Zr/TiO_2*10,000 diagram (After Floyd and Winchester, 1978).

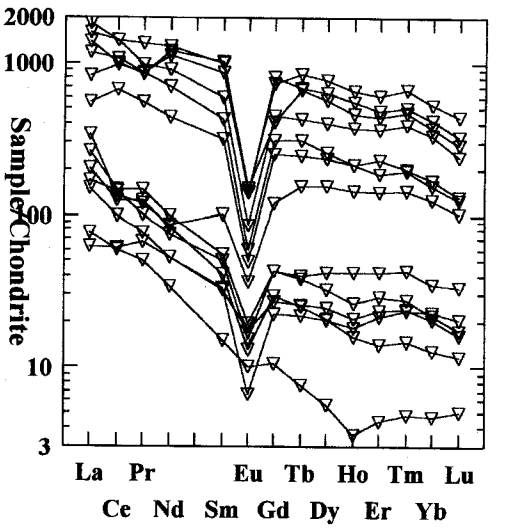

Fig. 6. Chondrite-nomalized rare earth element patterns of the alkali granite.

영역이 우세한 것으로 분류된다 (Fig. 5). Zr/TiO_2 비는 석영조면암 (trachyte)에서 코멘다이트 - 판텔러라이트 영역까지 상당히 분화된 특성을 나타낸다.

알카리 화강암류의 주성분 및 미량 원소 조성은 대체적으로 볼 때 MgO, CaO 함량은 낮고, K_2O, Na_2O와 전체 FeO의 함량이 대보화강암과 충주화강암의 조성 (김규한, 1992)보다 높으며 변화폭이 크다. 이는 석영에 비해 K-장석이 많고 유색광물의 함량이 낮은 암상의 특징과 잘 일치된다. 미량 원소 중 Ba, Y 및 Zr의 함량이 높고 Sr 함량은 낮다. 또한 이들 중 Ba, Y, Zr 함량은 대보화강암의 미량 원소 (김규한, 1992)과 비교할 때 상대적으로 높은 편이며, 특히 Zr 및 HFSE 함량이 높은 특징을 나타낸다.

희토류원소 (REE)

알카리 화강암에 대한 희토류원소 함량 (Table 4)을 콘드라이트 (Boynton, 1984)로 규격화 시킨 양상은 Fig. 6과 같다. 알카리 화강암은 희토류원소가 부화된 높은 희토류원소 함량 (129.41~4022.08 ppm)이 특징적이며, 강한 Eu 부 (-) 이상 (Eu/Eu*=0.16~0.59)을 가지는 상대적으로 중희토류원소 (HREE)가 다소 결핍된 (Ce/Yb_N= 1.07~9.59) 평행한 (flatted) 양상을 보인다. 희토류원소 분포양상을 보면 희토류원소가 특히 부화된 것과 다소 결핍된 두 군으로 분류된다. 이러한 특성은 알카리 화강암의 산출 특성과 화학조성에서도 반영되는데, 이들 희토류원소 분포양상 및 함량의 차이는 알카리 화강암의 분화정도의 차이로 해석된다. 산출상태 및 지구화학적 조성에서 희토류원소의 함량이 낮은 군은 암맥상으로 주로 산출되며, 석영이 K-장석보다 우세하고 조립질이며 유색광물의 함량이 감소한다. 화학조성상 알루미늄 및 나트륨이 증가하며 철 및 미량 원소가 감소하는 특성을 보인다. 희토류원소의 함량이 우세하고 더욱 강한 Eu 부 (-)을 보이는 군은 희유원소 광상과 밀접하게 수반되어 산출하며 암석조직상 보다 세립으로 파쇄 또는 교대 작용을 받은 흔적이 나타나기도 한다. 이 암석은 다량의 저어콘 및 희토류원소 함유 광물을 수반한다. 또한, 희토류원소 분포양상이 희유원소 광체나 주변 모암과 매우 유사하며 (박맹언, 김근수, 1995), 이들 암석이 동일한 기원 물질에서 유래 되었음을 반영한다.

Sm-Nd 동위원소

계명산층의 알카리 화강암의 관입시기와 기원에 관한 보다 정확한 정보를 얻기 위하여 Sm-Nd 동위원소 분석을 행하였다. 알카리 화강암에 대한 Sm, Nd함량 및 Nd 동위원소 조성을 Table 7에 나타내었다. 알카리 화강암에 대한 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 비는 0.5119458~0.5124847이며, Sm/Nd 비의 범위는 0.13~0.52 이다. 비록 통계학적인 오차는 다소 보이지만 (R^2=0.988) 암석 시료에 대한 전암 동시선 연대는 338±30 Ma로 나타났다 (Fig. 7). 이 연대를 이용해서 계산된 $\varepsilon_{Nd(t)}$ 값은 -7.25에서 -8.47까지의 범위를 나타낸다. 이 값은 알카리 화강암의 기원물질이 부분용융에 의해 부화된 맨틀로부터 유래하였거나 상승하는 중에 대륙지각 구성물질 (약 $\varepsilon_{Nd(t)}$=-15, Wasserburg,

Table 6. Rare earth element (REE) data of the alkali granite.

Sample no.	CJ-21	CJ-22	CJ-31	CJ-32	CJ-33	CJ-34	CJ-41	CJ-42	CJ-43	CJ-44	CJ-45	CJ-46	CJ-47
La (ppm)	23.08	55.10	62.63	28.16	95.69	74.72	123.70	203.80	300.30	503.60	428.50	674.00	581.00
Ce	58.48	95.17	137.04	57.06	139.84	118.41	129.50	632.60	936.00	960.01	1023.60	1358.00	1333.40
Pr	9.14	10.40	13.96	6.85	20.28	17.32	16.45	76.13	118.51	114.27	118.64	185.22	132.37
Nd	37.54	37.67	52.70	24.22	70.17	60.17	61.70	310.48	801.90	852.40	501.17	909.69	638.94
Sm	7.64	7.53	11.78	3.47	12.79	9.55	23.16	73.67	198.86	236.96	98.95	231.78	138.72
Eu	0.58	1.49	1.33	0.88	1.67	1.13	3.13	4.26	12.44	12.17	5.22	12.96	7.47
Gd	6.89	8.17	13.17	3.28	13.18	9.07	36.28	77.12	225.14	244.38	95.01	124.83	138.72
Tb	1.27	1.50	2.34	0.44	2.20	1.45	9.00	14.38	49.09	40.12	17.82	38.58	24.66
Dy	7.69	9.36	16.10	2.14	12.44	7.95	58.55	89.97	293.08	242.41	98.50	216.33	152.40
Ho	1.53	1.76	3.57	0.30	2.25	1.34	12.31	18.09	55.54	47.19	18.06	38.92	31.50
Er	5.35	5.85	10.44	1.08	7.14	3.50	34.88	56.36	152.55	121.21	46.42	110.66	91.35
Tm	0.83	0.86	1.54	0.17	0.97	0.52	5.15	7.17	23.70	17.86	6.94	16.89	13.97
Yb	5.65	5.01	8.65	1.17	5.46	3.16	30.88	42.22	131.92	102.90	38.06	93.21	82.07
Lu	0.77	0.61	1.25	0.19	0.66	0.44	3.86	4.94	16.81	12.37	4.77	11.01	9.23
ΣREE	166.44	240.48	336.50	129.41	384.74	308.73	548.55	1611.19	3315.54	3507.85	2501.66	4022.08	3375.80
(Ce/Yb)n	2.65	4.86	4.05	12.48	6.55	1.07	1.07	3.83	1.82	2.39	6.88	3.73	4.16
Eu/Eu*	0.25	0.59	0.33	0.81	0.40	0.33	0.33	0.18	0.18	0.16	0.17	0.24	0.17

Eu* : Eu values derived by interpolation between the values of Sm and Gd.

Table 7. Sm and Nd concentrations (in ppm), and Nd isotopic data for the alkali granite.

Sample no.	143Nd/144Nd (2s)*	Sm (ppm)	Nd (ppm)	147Sm/ 144Nd	εNd(0)	εNd(t)**	T2DM (Ma)***	Age (Ma)
CJ-21	0.5120440(9)	7.64	40.54	0.1134	-11.59	-8.03	1441	335
CJ-22	0.5120879(8)	7.53	37.67	0.1203	-10.73	-7.47	1395	335
CJ-32	0.5120523(9)	3.98	24.22	0.0989	-11.43	-7.25	1400	335
CJ-31	0.5121560(7)	12.18	46.89	0.1564	-9.40	-7.68	1344	335
CJ-34	0.5119458(6)	8.55	65.24	0.0789	-13.50	-8.47	1499	335
CJ-42	0.5124151(9)	173.22	381.34	0.2734	-4.35	-7.64	1765	335
CJ-44	0.5124847(8)	434.12	831.03	0.3144	-2.99	-8.03	1692	335

* Nomalized to the $^{146}Nd/^{144}Nd$ ratio of 0.7219.

** $\varepsilon Nd(t)=[\{(^{143}Nd/^{144}Nd)sample/0.512638\}-1]\times10^4$; ages used in calculation is 335 Ma.

*** $T2DM=1/\lambda\ \ln[1+\{(^{143}Nd/^{144}Nd)sample-0.513114\}/\{(^{147}Sm/^{144}Nd)sample-0.222\}]$, $\lambda=6.54\times10^{-12}/y$.

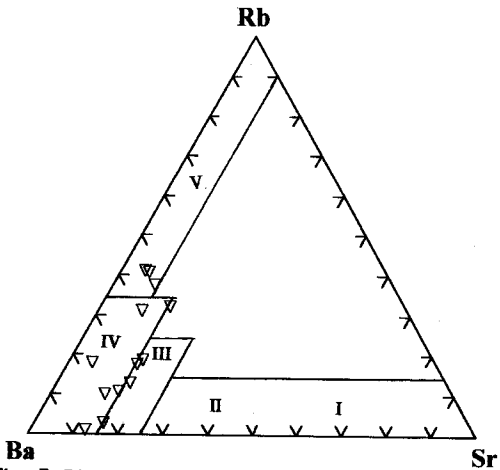

Fig. 7. Rb-Ba-Sr ternary variation diagram for the alkali granites. I; Diorite, II; Granodiorite and quartz diorite, III; Anomalous granite, IV; Normal granite, V; Strongly differentiated granite.

DePaolo, 1979)에 의해 상당히 혼염되었음을 암시한다. Nd 동위원소 진화도 (isotope evolution diagram)는 Sm-Nd 모델연령으로 부터 유래된 원연령 (source age)의 범위 가능성을 보여준다.

모델연령은 맨틀에서 Nd이 분리되어 지각에 체재한 시간으로 간주될 수 있으며, 구성암석의 고기지각 진화과정을 이해하는데 이용되기도 한다 (Depalo, Wasserburg, 1976; Jacobsen, Wasserburg, 1979). 알카리 화강암의 Nd모델 연령 (two-stage Nd model ages (T_2^{DM}))은 Jacobsen (1988)의 계산식을 이용해서 구해졌는데 약 1.35~1.76 Ga의 범위 값을 보인다. 이 값은 Na(1994), Lee (1991)에 의해 제시된 선캠브리아기 기반암인 경기 편마암 복합체나 소백산 편마암 복합체 (2.6~2.1 Ga)와 옥천대 내의 중생대 화강암류 (1.7~2.2 Ga) 보다 낮으며, 옥천 변성퇴적암 (문주리층; 1.3~1.7 Ga)과 유사한 값을 보인다.

토 의

알카리 화강암은 주구성광물 이외에 형석, 인회석, 스핀, 파이로클로르, 갈렴석, 저어콘 등의 희토류원소가 풍부한 광물을 함유한다. 계명산층 내의 알카리 화강암과 같은 많은 알카리 화성암은 희토류원소가 부화되어 있고, 이것은 희토류원소를 함유하는 광물뿐만 아니라 인회석, 형석, 파이로클로르 같은 광물의 치환에 의해 야기될 수 있다 (Neary, Highley, 1984). 콘드라이트 (chondrite)에 비해 특히 희토류원소의 부화정도는 (1) 근원물질에서 초기 희토류원소의 농축 (initial REE concentration in the source), (2) 부분용융의 정도 (degree of partial melting), (3) 결정분화작용 (subsequent fractional crystallization) 등에 좌우된다 (Wilson, 1989). 동위원소 조성에서 두군의 알카리 화강암이 동일 기원으로 추정되는바, 희토류원소 분포양상의 차이는 부분용융의 정도 아니면 결정분화작용의 결과 또는 양자 모두 일 가능성을 갖는다. 희토류원소가 풍부한 알카리 화강암에 있어서 경희토류원소 (LREE)의 부화는 보다 결핍된 알카리 화강암 마그마보다 부분용융의 정도가 작은 산물로 설명되지만, 부분용융의 정도가 작을수록 $(Ce/Yb)_N$의 비가 증가하는데, 반대로 전자의 $(Ce/Yb)_N$ (평균 3.36) 비가 후자 (5.54)보다 더 낮다. 그러므로 두 군의 화강암 사이의 희토류원소 분포양상의 차이를 단지 부분용융의 정도 변화로 설명하는데는 무리가 있다. 극단적으로 높은 함량의 경희토류원소는 갈렴석이나 스핀의 농축 결과인 것으로 생각한다. 희토류원소의 전 함량 및 Eu 부 (-) 이상의 증가와 다소 비슷한 희토류원소 분포양상은 희토류원소가 풍부한 암석이 결핍된 암석으로 부터의 분화작용, 특히 장석의 결정분화작용에 의한 것임을 지시한다. 이러한 결과는 희토류원소가 풍부한 알카리 화강암의 낮은 Ba, Sr함량 및 높은 Rb/Sr 비에 의해서도 지지된다 (Fig. 7). 그러나, 분화작용 만으로도 알카리 화강암 (REE-bearing alkali granite)의 높은 중희토류원소의 부화를 설명할 수는 없다. 알카리 화강암의 중희토류원소의 부화는 알카리 화강암질 마그마내의 높은 불소 (F) 함량의 결과로 추정된다. 왜냐하면, 마그마 내에서 불소 활동도 (fluorine activity)의 증가는 탈중합작용 (depolymerization)을 야기시키고 그 결과 규산질 용융체에서 경희토류원소에 비해 상대적으로 중희토류원소를 더 보유하기 때문이다 (Taylor, 1984). 높은 F 함량은 모달 형석의 존재와 Zr, Nb, Y와 같은 HFSE의 높은 농도에 의해서 지시된다. 희토류원소가 풍부한 알카리 화강암에서의 중희토류원소의 부화는 상당한 양의 저어콘의 존재와, 마그마에서의 높은 불소 (F) 함량이 중요한 역할을 했다고 생각된다. 높은 불소 함량은 복합체 형성 효과를 통해 고농도의 HFSE 함량을 촉진시킨다 (Collins *et al.*, 1982). 높은 불소 함량은 교대된 맨틀기원, 지각물질의 혼염, 확장 환경 (extensional environment)과 관련된 높은 용융온도, 이미 존재하는 암석의 교대작용 (metasomatism) 등의 다양한 방법에 의해 기인될 수 있다. A형 화강암에서의 높은 불소 함량은 일반적으로 확장 환경에서의 높은 용융온도에 의한 것으로 설명한다 (Brown *et al.*, 1984; Bonin, 1990; Skjerlie, Johnston, 1992). 마그마의 높은 온도 조건은 저어콘과 인회석 같은 부성분 광물의 용해도를 앙양시킨다. 그리고 높은 열적 안정도를 가지는 흑운모나 각섬석 같은 광물로부터 F-의 분해에 의해 불소의 농축이 증가한다. A형 화강암의 높은 용융온도는 확장 환경하에서 맨틀로부터 유래된 마그마가 지각-맨틀 경계부로의 결정작용과 연관되는 것으로 사료된다 (Creaser *et al.*, 1991; Skjerlie, Johnston, 1992). 희토류원소의 분포양상은 불소 (F)가 알카리 화강암의 화학 조성을 결정하는데 중요한 역할을 한 것을 지시한다.

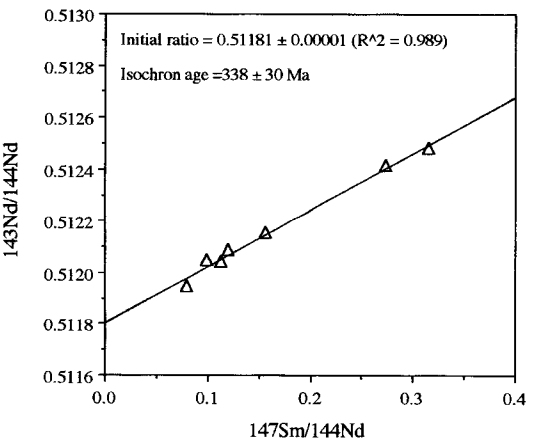

Fig. 8. Sm-Nd isochron diagram of the alkali granites in the Kyeomyeongsan Formation.

계명산층 내에 산출하는 알카리 화강암의 주성분 및 미량 원소의 지구화학적 조성은 알카리 마그마의 특성을 나타내며, 소위 A형 화강암과 유사한 특성을 갖는다. 또한, Pearce *et al.* (1984)의 도표에 도시하면 (Fig. 9) 판내부 화강암 영역 (within-plate granite field)에 해당되며, Eby (1992)의 A형 화강암 분류 도표에서 A_1 영역에 속한다 (Fig. 10). Eby (1992)에 따르면, A_1 영역은 해양성 현무암 (island arc basalt)의 화학조성에 대비되며, 확장 환경인 대륙 열극 또는 판내부 마그마 작용동안 정치된 마그마의 특성을 나타낸다.

결론적으로 알카리 화강암의 지구화학적 특성은 대륙

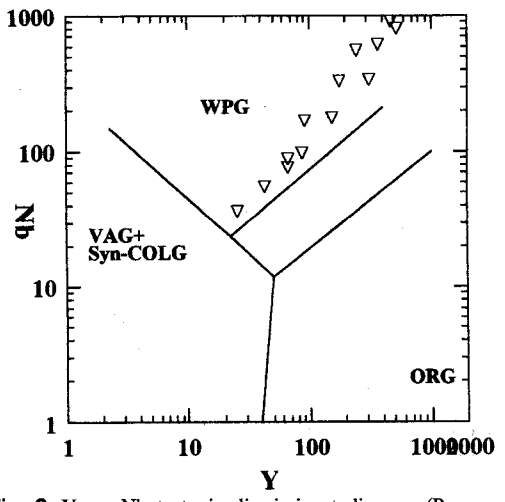

Fig. 9. Y vs. Nb tectonic discriminant diagram (Pearce *et al*, 1984).

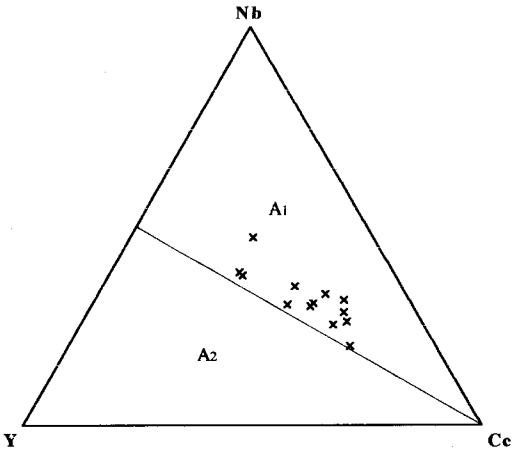

Fig. 10. Y-Nb-Ce plots for distinguishing A_1 and A_2 granites (Eby, 1992).

열극 환경에서 정치된, 불소 (F)가 풍부한 알카리 마그마로부터 형성된 암석임을 지시한다. 이러한 결과는 Cluzel (1992)과 Kang (1994)의 계명산층 화성작용의 해석과 일치된다. 알카리 화강암에 대한 Nd동위원소 동시선 연대는 338 Ma를 보이는데, 이는 계명산층 내에서의 고생대 마그마티즘을 제안한다. 이 연대는 계명산층 내의 희유원소 광상의 광화시기 (박맹언, 김근수, 1995)와도 잘 일치한다.

국내 고생대 화성활동에 대해서는 영남육괴 북서부에 위치하는 울진 광산 서측에서 선캠브리아기의 화강편마암과 페그마타이트를 관입하여 산출하는 우백질 화강암체가 고생대 중기로 알려져 있으며, 이 시기의 화성암류의 관입은 상부 오오도비스기에서 하부 석탄기에 걸친 대결층 기간이 끝날 무렵 중부 데본기에 이르러 새로운 퇴적작용이 시작되는 평안계 퇴적분지의 침강에 앞선 지괴운동의 소산으로 해석된 바 있다 (Yun, 1978). 한편 북한에서의 고생대 화성활동은 청진복합체, 평강복합체, 남강복합체 및 두만강복합체의 일부에서 알려져 있으며, 주로 하부 데본기에서 상부 페름기에 속한다 (Geology of Korea; N. Korea, 1990). 이 중 페름기로 알려진 평강복합체 내의 화강암질암의 연대는 361Ma로 측정된 바 있으며, 마그마의 근원을 조산대 또는 대륙판의 열극형 구조대에 수반되는 심부기원 현무암질 마그마로부터 형성되었다고 해석하였다. 평강-금화지역 평강복합체 중에는 주로 알카리암인 반려암과 섬장암이 수반되며, 이들 암석과 성인적 연관성을 가지고 저어콘, 희토류원소, Nb 및 자철석을 함유하는 광상이 수반된다. 이와 같이 우리나라의 고생대 마그마티즘은 대륙 열극 조구조 환경에서 주로 발생하였으며, 희유원소 광물의 광화작용과 밀접한 관련성이 있다.

결 론

1. 계명산층 내에 분포하는 알카리 화강암의 주성분 및 미량 원소의 지화학적 특성은 알카리성 또는 퍼알카린 마그마의 특성을 지시한다.

2. 알카리 화강암은 지구조 판별도에서 판내부 화강암 영역 (within-plate granite field)에 도시되며, A형 화강암 분류도에서 확장 환경 (extensional environment)에서 정치된 암석의 특징을 반영하는 A_1 군에 해당된다.

3. 알카리 화강암은 상당히 높은 희토류원소 함량에 의해 특징지워지며, 강한 Eu 부 (-) 이상을 갖는 중희토류원소 (HREE)가 다소 결핍된 평행한 양상의 희토류원소 분포 양상을 갖는다.

4. 알카리 화강암에 대한 Sm-Nd 동시선 연대는 338± 30 Ma, $\varepsilon_{Nd(t)}$는 -7.3에서 -8.5까지 범위를 보인다. 이것은 초기 석탄기에 형성되었으며, 근원마그마가 부분 용융에 의해 부화된 맨틀에서 유래되었거나, 마그마의 상승 도중 대륙지각 물질에 의해 상당히 혼염된 마그마의 특징을 지시한다.

5. 연구대상 암석에서 얻어진 Nd 모델 연령은 1.4~1.8 Ga의 범위로, 선캠브리아기 기반암인 경기 편마암 복합체나 소백산 편마암 복합체 (2.6~2.1 Ga)와 옥천대 내의 중생대 화강암류 (1.7~2.2 Ga) 보다 낮으며, 옥천 변성퇴적암 (문주리층; 1.3~1.7 Ga)과 유사한 값을 보인다.

6. 계명산층 내의 알카리 화강암의 전암 화학조성 및 Nd 동위원소 성분은 이들 암석이 높은 불소를 함유하는 대륙 열극 환경에서 정치된 알카리 마그마로부터 형성 되

었을 가능성을 시사한다.

사 사

본 연구는 전략광물자원 연구센터 (1997년)와 학술진흥재단 ('95~'97)에 의해 지원되었으며, 이에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

김규한 (1992) 남한의 일부 중생대화강암류의 지구화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 435-446.

김기완, 이홍규 (1965) 1/5만 충주도폭 지질설명서와 지질도. 상공부 국립지질조사소, 단행본.

김옥준 (1968) 충주-문경간의 옥천계의 층서와 구조. 광산지질, 1권, p. 36-46.

김옥준 (1970) 남한 중부지역의 지질과 지대구조. 광산지질, 2권, p. 73-90.

나기창, 김형식, 이동진, 이상헌 (1982) 충주층군과 서산층군의 비교 연구. 광산지질, 15권, p. 177-188.

박맹언, 김근수 (1998) 충주지역 계명산층내의 페그마타이트에 수반되는 우라늄, 토륨 광상의 '지구화학 및 광물학적 연구. 1997년도 전략광물자원 연구센터 지원과제 보고서.

박맹언, 김근수 (1995) 충주지역 희토류광상의 성인: 산출상태와 지화학적 특성. 자원환경지질학회, 28권, p. 599-612.

박맹언, 김근수 (1994) 충주지역 계명산층의 지화학적 특성에 관한 연구. 한국암석학회 제3차 정기발표회 요약문.

이대성 (1974) 옥천계 지질시대 결정에 관한 연구. 연세논총, 11p.

Bonin, B. (1990) From orogenic to anorogenic setting: Evolution of granitoid suits after a major orogenesis. Geol. J., v. 25, p. 261-270.

Boynton, W.V. (1984) Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In P. Henderson (ed.) Elsevier Science Publishers B. V., p. 63-114.

Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources, Jounal of Geological Society of London, v. 141, p. 413-426.

Cluzel, D. (1992) Ordovician bimodal magmatism in the Ogcheon belt(South Korea): an intracontinental rift-related volcanic activity. Jour. Southeast Asian Earth Sci., v. 7, p. 195-209.

Cluzel, D., Cadet, J.P., Kim, D.H., Hwang, J.H. and Lee, B.J. (1991) Early Paleozoic geodynamic evolution of the Ogcheon belt(South Korea). Stratigraphy and tectonic setting of the Ogcheon Supergroup. In Cluzel, D., (ed.), Ph.D. thesis, The Ogcheon belt (South Korea) summary, p. 51-68.

Collins, E.J., Beams, S.D., White, A.J.R. and Chappell, B. W. (1982) Nature and Origin of A-type granites with particular reference to southeastern Austrailia, Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 80, p. 189-200.

Creaser, R.A., Price, R.C., and Wormald, R.J. (1991) A-type granite revisited: Assessment of a residual-source model, Geology, v. 19, p. 163-166.

DePaolo, D.J. and Wasserburg, G.J. (1976) Nd isotopic variations and petrogenetic models. Geophys. Res. Letter, v. 3, p. 249-253.

Eby, G.N. (1992) Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications, Geology, v. 20, p. 641-644.

Floyd, P.A. and Winchester, J.A. (1978) Identification and discrimination of altered and metamorphosed volcanic rocks using immobile elements. Chemical Geology, v. 21, p. 291-306.

Geology of Korea; N. Korea (1990).

Ishihara, S. (1988) A type granitoids and REE ore deposits. Chishitsu News, no. 409, p. 6-24.

Jacobsen, S.B. (1988) Isotopic constraints on crustal growth and recycling, Earth and Planetary Science Letters, v. 90, p. 315-329.

Jacobsen, S.B. and Wasserburg, G.J. (1979) Nd and Sr isotopic study of the Bay of Islands ophiolite complex and the evolution of the source of mid-ocean ridge basalts. J. Geophys. Res., v. 84, p. 7429-7455.

Kang, J.H. (1994) Geological Structure and Tectonics of Ogcheon Zone in the Chungju-Jangseonri Area, South Korea. Jour. Sci. Hiroshima Univ., Series C, v. 10, p. 11-23.

Kim, H.S. (1977) Mineralogy and petrology of the Precambrian iron deposits, Korea. J. Geol. Soc, Korea, v. 13, p. 191-211.

Kullerud, L. (1991) On the calculation of isochrons: Chem. Geol.,v. 87, p. 115-124.

Lee, C.H. (1986) Stratigraphy and depositional environments in the Ogcheon Supergroup with the special consideration on the carbonate key deds. Dr. Thesis, Univ. of Tsukuba, Ibaraki, Japan.

Loiselle, M.C. and Wones, D.R. (1979) Characteristics and origin of anorogenic granites. Abst. W. Prog. Geol. Soc. America, v. 11, p. 468.

Lugmair, G.W. and Marti, K. (1978) Lunar initial 143Nd/144Nd; differential evolution of yhe lunar crust and mantle. Earth Planet. Sci. Lett., 39, p. 349-357.

Nakamura, S. (1923) Chuseihoku-do, mineral resources of Chosen (Korea). Chikyu, 8.

Na, C.K. (1994) Genesis of granitoid batholiths of Okchon zone, Korea and its implications for crustal evolution, Ph.D. dissertation, University of Tsukuba, 154 p.

Neary, C.R. and Highley, D.E. (1984) The economic importance of rare earth elements. In P. Henderson (ed.), Elsevier Science Publishers B. V., p. 423-466.

Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. Earth and Planetary Sci. Letter, v. 19, p. 290-300.

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, v. 25, p. 956-983.

Reedman, A.J., Fletcher, C.J.N., Evans, R.B., Workman, D.R., Yoon, K.S., Rhyu, H.S., Jeong, S.H. and Park, J. N. (1973) The geological, geophysical and investigations in the Hwanggangri area, Chungcheongbug-do. In Report of Geological and Mineral Exploration. Part 2. Report of Mineral Exploration. Geol.

Min. Inst. Korea, v. 1, p. 1-118.
Skjerlie, K.P. and Johnston, A.D. (1992) Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites, Geology, v. 20, p. 263-266.
Streckeisen, A. (1976) To each plutonic rock its proper name, Earth Sci. Rev., v. 12, p. 1-33.
Taylor, R.P. (1984) Role of fluorine in melt depolymerization, lanthanide fractionation, and the genesis of granophile deposits, Geological Association of Canada Program with Abstracts, no. 9, p. 110.
Wasserburg, G.J. and DePaolo, D.J. (1979) Models of earth structure infered from neodymium and strontium isotopic abundances. Proc. Nat. Acad. Sci. USA, v. 76, p. 3594-3598.
Wilson, M. (1989) Igneous petrogenesis. Unwin Hyman, London, 466p.
Winchester, J.A. and Floyd P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma sereir differentiation products using immobile elements, Chemical Geology, v. 20, p. 325-343.
Yun, S. (1978) Petrography, chemical composition and depositional environments of the Cambro-Ordovician sedimentary sequence in the Yeonhwa I mine area, southeastern Taebaegsan region, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 14, p. 145-174.

1998년 4월 6일 원고접수