

경상분지 서남부에 분포하는 백악기 진동화강암의 지화학적 특성: 아다카이틱(adakitic)한 특성을 중심으로

위수민^{1*} · 최선규² · 유인창³ · 신흥자⁴

¹한국교원대학교 지구과학교육과, ²고려대학교 지구환경과학과, ³경북대학교 지질학과, ⁴한국지질자원연구원

Geochemical Characteristics of the Cretaceous Jindong Granites in the Southwestern Part of the Gyeongsang Basin, Korea: Focussed on Adakitic Signatures

Soo Meen Wee^{1*}, Seon Gyu Choi², In Chang Ryu³ and Hong Ja Shin⁴

¹Dept. of Earth Sci., Korea National Univ. Edu., Chungbuk 363-791, Korea

²Dept. of Earth and Env. Sci., Korea Univ., Seoul 136-701, Korea

³Dept. Geol. Sci., Kyungpook Univ., Kyungpook 702-701, Korea

⁴Korea Inst. Geosci. Mineral Resour., Daejeon 305-350, Korea

Major, trace and rare earth elements data of the Cretaceous Jindong granitic rocks were investigated in order to constrain the magma source characteristics and to establish the paleotectonic environment of the southwestern part of the Gyeongsang Basin. Geochemical signatures of the granitic rocks from the study area indicate that all of the rocks have characteristics of calc-alkaline series in the subalkaline field, and progressively shift from metaluminous to peraluminous with differentiation. In the variation diagrams, the overall geochemical features of the granites show systematic variations in major and trace elements. Chondrite normalized REE patterns show generally enriched LREE($(La/Yb)_N=4.2-12.8$) and slight negative to flat Eu anomalies. Rb-Sr isotope data of the Jindong granites show that the whole rock age and Sr initial ratio are 114.6 ± 9.1 Ma and 0.70457, respectively. The Sr initial ratio of the Jindong granites is very similar to those of the Cretaceous granites from Masan, Kimhae and Busan area($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7049-0.707$). These results suggest that the magma have the mantle signature and intruded into the area during the early Cretaceous age. The Jindong granites have higher Al_2O_3 , Na_2O , Sr and lower K_2O , Y concentrations compared with typical calc-alkaline granitic rocks. These adakitic signatures are similar to those of adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. On the ANK vs. ACNK and tectonic discrimination diagrams, parental magma type of the granites corresponds to I-type, VAG granite. Interpretations of the geochemical characteristics of the granitic rocks favor their emplacement at continental margin during the subduction of Izanagi plate.

Key words : granite, adkite, calc-alkaline, I-type, VAG

주성분원소, 미량원소 및 희토류원소에 대한 지화학적 연구를 통하여 진동화강암의 성인과 마그마 근원물질의 지화학적특징 및 지구조적 환경을 살펴보았다. 진동화강암은 비알칼리암 중에서 칼크-알칼리계열의 화강암류이며, 마그마의 특성이 metaluminous에서 분화가 진행됨에 따라 peraluminous한 쪽으로 진행됨을 알 수 있다. 이들의 주성분 및 미량원소의 변화경향은 계계적인 연속성을 나타내며, 콘드라이트에 표준화한 희토류원소의 패턴은 일반적으로 경희토류원소가 부화되어 나타나며($(La/Yb)_N=4.2-12.8$), Eu의 이상이 거의 나타나지 않는다. 진동화강암체의 Rb-Sr전암연대는 114.6 ± 9.1 Ma이며 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 초생값은 0.70457로 나타났다. 낮은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 초생값은 경상분지 남부의 마산, 김해, 부산지역에 분포하는 백악기 화강암류들($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7049-0.707$)과 유사하다. 이는 진동화강암체의 관입시기가 경상분지내에 분포하는 백악기 화강암류 중에서 가장 오래된 백악기 초기였으며 근원물질이 상부맨틀과 관련이 있음

*Corresponding author: weesm@cc.knue.ac.kr

을 지시한다. 진동화강암체는 경상분지내의 다른 백악기 화강암류에 비해 상대적으로 높은 Al_2O_3 , Na_2O 및 Sr 과 낮은 K_2O 와 Y 의 함량을 보인다. 이들의 주성분원소(Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO) 및 미량원소(Sr , Y , Rb) 함량범위는 adakite의 범주에 포함되며 남서부 일본의 큐슈(Kyushu)섬에서 나타나는 화강암체와 유사한 adakitic한 지화학적 특성을 나타낸다. 지구조 편별도 및 ANK vs. ACNK도에 접시해본 결과 I-type의 화강암으로 지구조적 환경은 화산호화 강암(VAG) 영역에 해당된다. 이 결과로 미루어 진동화강암류는 중생대 백악기 이자나기판의 섭입과 관련되어 관입한 대류주변부 환경에서 생성되었음을 시사한다.

주요어 : 화강암, 아다카이트, 칼크-알칼리, I-type, 화산호화강암

1. 서 론

한반도에 분포하는 백악기 화강암류들은 대부분 경상분지내에 암주상으로 분포하며, 일부는 남부 해안을 따라 산재하여 나타난다. 경상분지 내에는 백악기에서 제 3기초에 걸쳐서 일어난 화성활동의 산물인 화강암류와 서로 성인적으로 연관성이 있을 것으로 추정되는 안산암질 및 유문암질의 화산암류가 광범위하게 분포하고 있다(Jin, 1981; Hong, 1987; 김규한과 이진수, 1993; Lee *et al.*, 1995; Jin, 2002). 경상분지 백악기 심성화성활동을 대표하는 불국사화강암류는 전형적인 칼크-알칼리계열로 자철석계열의 성격을 나타내며, 일본 남서부의 화강암질암의 관입과 시기가 유사하다(Jwa, 1996). 이 지역의 화성활동은 이자나기(Izanagi) 판의 섭입에 의한 것으로 알려져 왔으며(Uyeda and Miyashiro, 1974; Jin, 1985; Maruyama *et al.*, 1997), 판의 운동방향에 따라 화성활동의 형태 및 지역적인 지질활동의 특징을 나타낸다(Choi *et al.*, 2005). 경상분지내의 화강암류들은 방향성을 가지고 대상으로 분포하는 쥐라기의 대보화강암체들과는 달리 주로 암주상의 형태로 산재하여 분포하는데, 이들은 백악기의 진동화강암류, 상부백악기의 불국사화강암류 및 상부백악기에서 제3기초에 이르는 마산암류로 시기별로 크게 3대분 할 수 있다(이준동, 1991).

경상분지 내에서의 백악기 화성활동에 대한 많은 연구가 있지만 대부분이 불국사화강암류와 마산암류에 치우쳐 있고 가장 고기의 것으로 사료되는 진동화강암류에 대한 지구화학 분석 자료를 근거로 연구된 사례는 거의 없는 편이다. 이 연구는 진동지역의 화성활동의 특성을 규명하는 한편, 경상분지내의 백악기 화성활동을 연구하는데 필요한 지화학적 자료를 제공하고자 한다. 진동화강암체에 대한 암석학적 및 성인적 연구를 위하여 암석의 구성광물과 조직에 대한 관찰, 전암의 지구화학적 자료에 의한 마그마분화과정을 고찰하고 동위원소연구를 통한 마그마 근원물질 및 관입시기를 규

명하고자 한다. 또한, 인근지역의 화강암류와 비교하여 경상분지 서남부지역의 화성활동에 대한 특징을 지화학적 자료를 통해 알아 본다.

2. 일반지질 및 암석각론

경상분지는 백악기 좌수향(sinistral) 주향이동단층에 의하여 형성된 인리형분지(pull-apart basin)로서 분지 형성기인 백악기 초기에는 퇴적작용이 우세한 반면 백악기 후기에는 이자나기판의 섭입에 의한 화성활동이 활발히 일어났다(Maruyama *et al.*, 1997; 유인창 외, 2006). 분지변형기에는 국지적인 화성활동만 나타났으며, 이러한 지질현상은 시간에 따른 판의 섭입방향의 변화에 기인한다(Choi *et al.*, 2005, 2006). 연구지역의 지질은 백악기의 퇴적암류, 천부 관입암류 및 화산암류로 구성되며(Fig. 1), 퇴적암류는 이 지역에서 가장 오래된 층으로 2700-2900 m의 두께를 가지며 심한 지각변동을 받은 흔적은 보이지 않는다(이준동, 1991). 퇴적암류는 진동화강암체의 북서부에 분포하는 사암 및 이암으로 구성된 함안층과 화강암체 주변부에 광범위하게 나타나며 세일, 사암 및 석회질 세일 등으로 구성된 진동층으로 구분되며, 진동층은 진동화강암류의 관입으로 접촉부가 호온펠스화 되어있다. 진동화강암체는 이들 퇴적암류를 북서-남동방향으로 길게 관입하여 나타나며 과거에는 단일화강섬록암체로 기재되어 왔으나 그 후 여러 연구에서(박희인 외, 1985; 최석원, 1986; 이준동, 1987, 1991) 반려암, 석영섬록암, 화강섬록암 등으로 구성된 하나의 복합관입암체임이 밝혀졌다. 반려암과 석영섬록암은 진동화강암체의 북서부에 소규모로 분포하며, 화강섬록암은 암체 전반에 걸쳐 광범위하게 분포한다. 석영섬록암은 소규모의 암체로 여러 곳에서 발견되며, 소규모로 분포하는 석영섬록암은 이 지역의 대상 화강암질암체와의 관계는 경계가 불분명하지만 산출상태와 화학성분의 변화가 연속적인 것으로 미루어 동일마그마의 분화산물인 것으로 추정된다(이

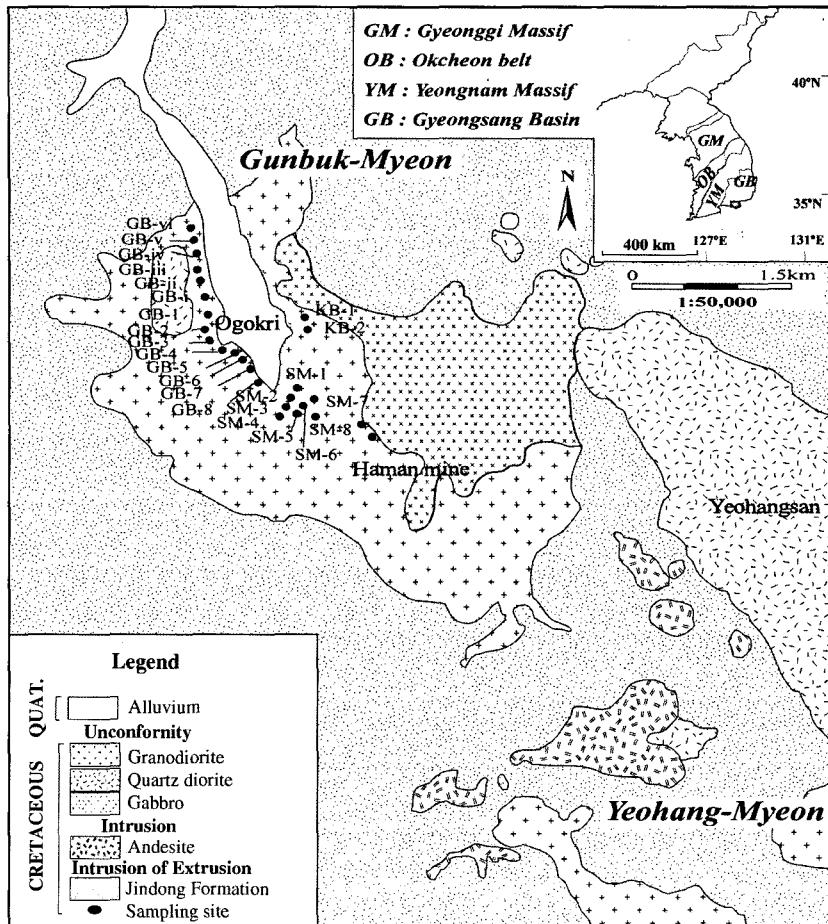


Fig. 1. Geological map showing the sampling locations of Jindong granitic rocks (after Park *et al.*, 1985). In the inset diagram the tectonic provinces of southern part of the Korean peninsula are shown.

준동, 1991). 화성암 관입시의 화성활동에 기인한 염기 성과 산성의 암맥이 곳곳에 나타나며, 염기성암맥의 구성암석은 휘록암이며 산성암맥은 대체로 규장암으로 이들은 최후기의 관입암으로 추정된다(이준동, 1991). 진동화강암체의 동쪽인 마산도포 서부지역에서는 하양층 군에 속하는 힘안층이 넓게 분포하고 있으며, 이를 각섬석-흑운모화강암이 관입하고 있다. 퇴적암류의 구성암석은 주로 이암, 세일, 실트스톤이며 충리발달이 현저하다. 바산 각섬석-흑운모화강암은 이를 저반상으로 관입하고 있으며, 이 화강암류를 마산 미문상화강암이 암맥상으로 관입하고 있다.

진동화강암체 전반에 걸쳐서 광범위하게 분포하는 화강섬록암은 사장석, 흑운모, 석영 등으로 구성되어 있으며, 자철석, 녹니석, 녹염석, 저어콘 및 인희석이 소량 관찰된다. 사장석은 조립질로 가장 흔하게 관찰

된다. 사장석입자들은 누대구조가 현저하게 나타나고 견운모화 작용을 많이 받았다. 부분적으로 녹염석이 관찰되며, 흑운모는 대체적으로 녹니석으로 변질되어 나타난다. 석영섬록암의 주 구성광물로는 대부분이 사장석이며 알칼리장석, 흑운모, 석영 등으로 구성되어 있으며 부성분 광물로는 자철석, 녹니석 등이 소량 존재한다. 사장석반정은 장경 2-3 mm로 대체로 조립이며 누대구조가 잘 나타난다. 다량의 흑운모가 관찰되며 흑운모는 부분적으로 녹니석화 되어있고, 알칼리장석과 석영은 타형으로 소량 관찰된다. 각섬석-흑운모화강암은 석영, 정장석, 사장석, 각섬석, 흑운모로 구성되어 있으며, 녹염석, 녹니석, 자철석 및 인희석이 소량 관찰된다. 사장석은 자형-반자형인 정상적인 누대구조가 잘 나타나며 견운모화작용을 심하게 받았다. 알칼리장석과 석영은 반자형-타형의 형태로 나타난다. 각섬석과

흑운모의 변질로 생성된 2차 광물로 녹염석과 녹나석이 관찰된다.

3. 지구화학

3.1. 연구방법

진동화강암체의 암석화학적 특성을 밝히기 위해 총 53개의 시료를 채취하여 신선한 14개의 시료를 선택하여 캐나다에 소재하는 Activation Lab.에 의뢰하여 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소에 대해 분석을 실시하였다. 주성분원소와 일부 미량원소(Ba, Sr, Y, Sc, Zr)는 XRF로 분석하였고, 나머지 미량원소와 희토류원소는 ICP-MS를 사용하여 분석하였다. 분석오차를 살펴보기 위해 몇 개의 국제 표준시료를 같이 분석하였으며, 주성분 및 미량원소의 분석 오차는 대체로 5% 미만을 보이며, 함량이 매우 적은 몇 가지 미량원소들도 대체로 10%미만으로 나타났다. 진동화강암체 주변에 분포하는 비슷한 시기에 관입한 화강암류들과 지화학적 특성을 비교하기 위해 기 발표된 자료를 인용하였다.

3.2. 주성분원소

본 연구지역의 화강암류들의 주성분원소의 분석결과는 Table 1에 나타나 있으며, 진동화강암체들의 전반적인 SiO_2 함량은 51.3-68.1 wt.%를 보인다. 이는 경상분지 내에 분포하는 다른 지역의 화강암류에 비해 약간 염기성인 것부터 분화가 된 것까지 다양하게 나타난다. 이들은 비알칼리계열 중 칼크-알칼리계열에 속한다. 알루미늄포화도를 나타내는 그림에서 대부분의 암

석이 metaluminous 영역에 속하며, 전암화학조성에 따른 I-type과 S-type의 구분에서는 이들 화강암류가 I-type의 화강암류에 해당됨을 알 수 있으며(Fig. 2), 이는 경상분지내에 분포하는 불국사화강암류들의 일반적인 지화학적특징과 유사하다. 주성분원소에서 SiO_2 에 대한 각 산화물의 변화경향을 살펴보면, SiO_2 가 증가함에 따라 TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , FeO , CaO , P_2O_5 는 감소하고, K_2O 는 증가하며 Na_2O 는 일정한 경향을 나타내지 않고 분산되어 나타난다(Fig. 3). SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 K_2O 가 일정하게 증가하는 것은 대륙연변부에서 생성되는 화강암질마그마의 특성과 유사하다. 주성분원소의 함량변화는 진동화강암체를 구성하고 있는 암상들의 종류에 무관하게 전반적으로 연속된

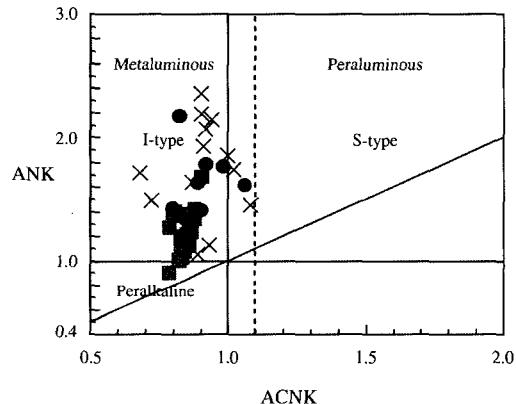


Fig. 2. Molar ANK [$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$] vs. ACNK [$\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})$] variation diagram (Maniar and Piccoli, 1989). Symbols: Jindong(●), Masan(■), Suncheon-Gwangyang(×).

Table 1. Major element contents of the Cretaceous Jindong granites (wt.%)

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	LOI	TOTAL
GB-4	59.04	16.76	0.59	5.17	0.09	2.74	5.81	3.10	3.30	0.62	0.17	1.78	99.16
GB-5	58.03	16.62	1.47	6.37	0.09	2.85	5.52	3.53	1.76	0.75	0.28	2.28	99.54
GB-6	65.37	15.97	0.90	3.56	0.03	1.86	4.61	3.96	1.28	0.47	0.16	1.76	99.92
GB-8	58.34	18.14	1.28	3.85	0.06	2.65	9.04	4.57	0.32	0.77	0.26	0.74	100.00
GB-I	51.29	19.55	5.03	4.65	0.21	4.87	9.06	3.24	0.35	0.78	0.15	0.32	99.51
GB-IV	61.61	16.72	1.01	5.39	0.05	2.00	3.38	3.86	2.00	0.50	0.22	2.06	98.80
HA-1	58.55	17.29	2.60	4.25	0.13	3.05	6.27	3.60	1.61	0.67	0.16	1.14	99.32
SM-3	67.13	15.24	1.66	2.53	0.04	1.46	4.07	3.58	2.42	0.41	0.12	0.84	99.48
SM-4	68.05	15.05	1.81	2.55	0.04	1.50	3.84	3.53	2.64	0.42	0.12	0.62	100.16
SM-5	66.96	14.93	1.65	2.67	0.04	1.45	3.95	3.48	2.43	0.41	0.11	1.19	99.27
SM-6	68.00	15.24	0.10	3.59	0.03	1.30	3.91	3.49	2.53	0.38	0.11	1.06	99.73
SM-7	62.48	16.69	3.35	2.33	0.05	2.11	5.36	3.79	1.99	0.59	0.18	0.58	99.51
SM-8	58.79	18.04	0.52	4.00	0.06	3.12	8.61	4.60	0.36	0.75	0.25	0.45	99.55
SM-8K	67.76	15.12	1.37	2.82	0.04	1.43	3.77	3.50	2.68	0.40	0.11	0.72	99.73

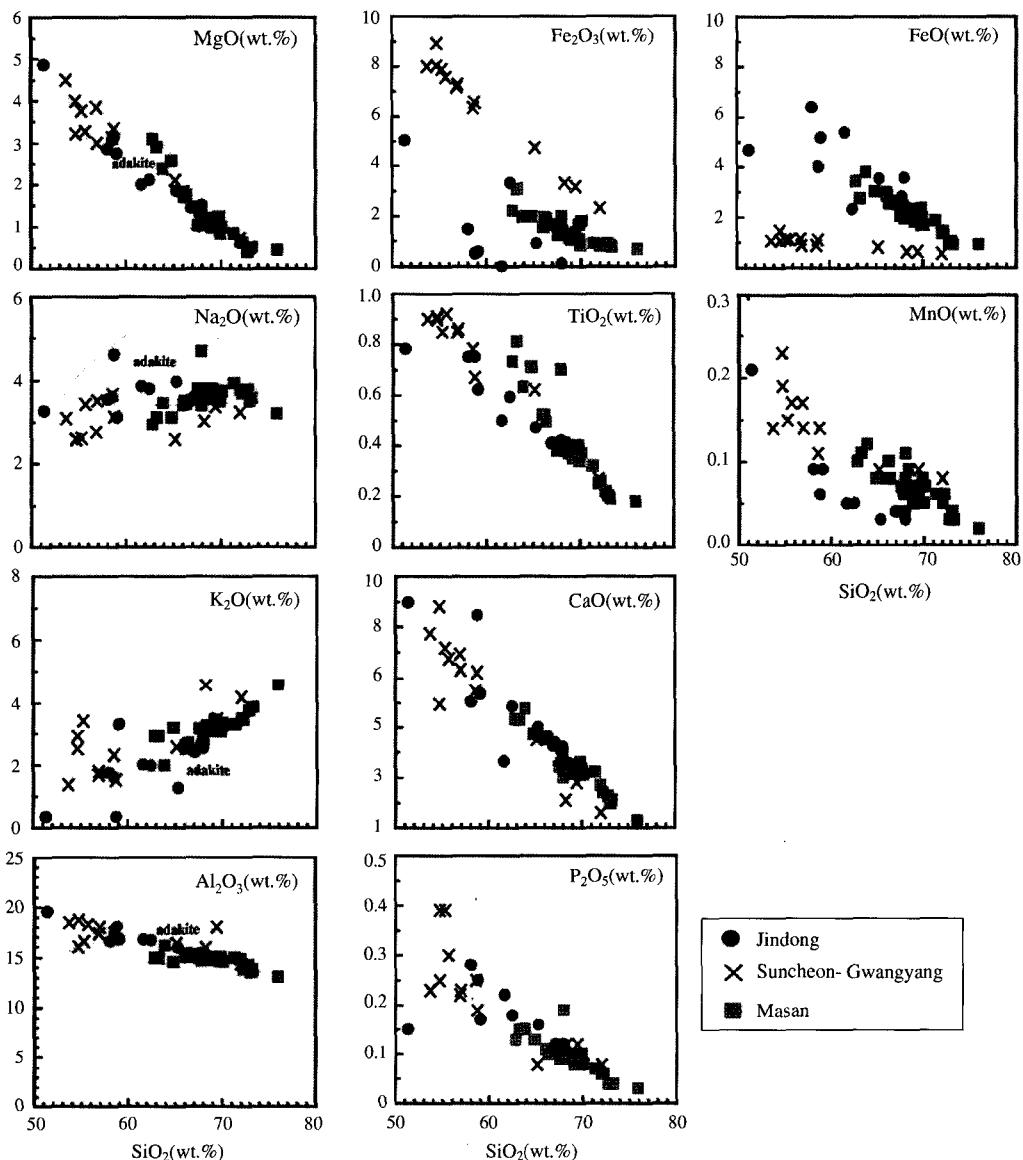


Fig. 3. Major element variations against $\text{SiO}_2(\text{wt.}\%)$ content of Jindong granitic rocks. Light gray shaded areas are the adakitic field(Kiji *et al.*, 2000). Masan and Suncheon-Gwangyang data from Lee(1994) and Park *et al.*(1993).

변화경향을 나타낸다. 이러한 연구지역에서 나타나는 화강암류들의 화학조성의 변화는 주로 마그마에서의 분별정출작용에 의한 것임을 나타내며, 이들의 근원물질이 서로 유사했을 가능성을 지시한다.

3.3. 미량원소 및 희토류원소

미량원소 및 희토류원소에 대한 화학분석결과는 Table 2에 나타내었다. 암석 내에 함유된 미량원소의 변화경향을 SiO_2 의 함량을 분화지수로 사용하여 살펴

본 결과 미량원소의 함량은 SiO_2 가 증가함에 따라 Rb, Ba, Zr, Th 등은 증가하고 Sr, Sc, Co는 감소하는 경향을 나타내며 다른 원소들은 분산이 심해 특별한 변화경향이 나타나지 않으며, 이와 같은 경향은 미량원소들 사이의 상대적인 함량변화에서도 뚜렷하게 나타난다(Fig. 4). 미량원소의 함량은 전반적으로 상당히 부화되어있는 양상을 나타내며 원시멘틀값에 표준화한 거미그림에서와 같이 함수유체에서 유동성이 높은 원소들(Rb, Ba, Th, Sr)은 부화되어 나타나는 반면,

Table 2. Trace and rare earth element concentrations of the Cretaceous Jindong granites(unit in ppm)

Sample	Rb	Ba	Sr	Y	Sc	Zr	Nb	Hf	Ta	Th	Co	La	Ce
GB-4	97	698	546	18	13	113	5	3.4	0.3	5.9	15	18.5	32.9
GB-5	68	400	469	19	14	112	5	3.3	0.4	5.3	15	28.4	53.5
GB-6	31	458	537	13	9	125	5	3.6	0.3	6.2	17	25.0	45.1
GB-8	4	168	707	16	13	97	4	2.7	0.2	2.3	11	17.1	38.9
GB-IV	76	138	571	12	20	26	4	3.5	0.3	4.5	19	27.3	49.2
GB-I	14	441	395	18	9	128	4	0.9	0.0	0.8	20	8.1	16.3
HA-1	51	286	467	22	14	122	5	3.6	0.2	4.5	15	20.7	43.5
SM-3	68	544	352	17	8	122	8	3.8	0.4	8.5	7	19.9	37.2
SM-4	71	577	341	20	7	144	6	4.4	0.4	9.6	7	23.5	44.0
SM-5	74	518	344	17	7	138	6	4.2	0.4	9.4	7	15.2	28.4
SM-6	71	567	355	15	7	125	5	3.8	0.4	9.4	6	15.1	27.5
SM-7	51	518	491	20	11	164	5	4.6	0.3	6.8	12	23.1	43.8
SM-8	5	164	686	19	13	81	5	2.3	0.2	2.7	7	15.5	35.8
SM-8K	80	614	355	15	8	127	5	3.9	0.4	8.8	7	24.3	45.8
Sample	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
GB-4	3.98	15.3	3.7	1.01	3.6	0.6	3.3	0.7	2.0	0.33	2.0	0.30	
GB-5	6.16	22.1	4.4	1.15	4.2	0.6	3.5	0.7	2.0	0.33	2.0	0.30	
GB-6	4.99	16.7	3.1	0.93	2.7	0.4	2.2	0.4	1.3	0.20	1.3	0.21	
GB-8	4.99	19.3	3.9	1.44	3.7	0.5	3.0	0.6	1.7	0.27	1.7	0.26	
GB-IV	5.90	21.4	4.3	1.24	3.8	0.6	3.1	0.6	1.8	0.26	1.6	0.24	
GB-I	2.11	9.4	2.2	1.14	2.4	0.4	2.3	0.4	1.3	0.20	1.3	0.20	
HA-1	5.54	21.3	4.8	1.09	4.5	0.7	4.1	0.9	2.4	0.38	2.4	0.35	
SM-3	4.17	16.4	3.2	0.87	2.9	0.5	2.8	0.5	1.7	0.30	2.0	0.30	
SM-4	5.18	20.0	3.8	0.93	3.5	0.6	3.3	0.6	2.0	0.35	2.4	0.36	
SM-5	3.27	11.6	2.6	0.82	2.6	0.4	2.7	0.6	1.7	0.30	2.0	0.30	
SM-6	3.24	11.6	2.5	0.79	2.6	0.4	2.5	0.5	1.6	0.27	1.8	0.29	
SM-7	5.36	19.4	4.2	1.10	4.0	0.6	3.5	0.7	2.2	0.35	2.3	0.33	
SM-8	4.73	18.5	4.0	1.35	3.8	0.5	3.3	0.7	1.9	0.30	2.0	0.28	
SM-8K	5.20	18.1	3.7	0.88	3.4	0.5	2.8	0.6	1.7	0.29	1.9	0.29	

HFSE(Ti, Nb, Y)와 같은 유동성이 낮은 원소들은 결핍된 양상을 보여주는데, 이는 섭입대와 관련되어 생성된 칼크-알칼리계열 암석의 특징을 잘 나타낸다(Fig. 5).

희토류원소의 패턴(Fig. 6)은 경희토류원소가 중희토류원소에 비하여 전체적으로 부화되어 나타나며(La/Yb=6.23-18.86), (La/Yb)c로 나타낸 LREE/HREE비의 변화를 SiO₂에 대해 살펴보면 분화가 진행될수록 증가하는 변화경향을 나타낸다. 희토류원소의 패턴은 전반적으로 기울기가 유사하고 대체로 평행한 배열을 나타내며, 이것으로 미루어 화강암류들은 유사한 균원물질로부터 생성된 마그마로부터 분별결정에 의하여 화학조성의 변화를 가져왔다고 생각된다.

4. 지화학적 특성 및 토의

4.1. 진동화강암체의 Rb-Sr 전암연대

진동화강암체의 Rb-Sr전암연대는 기초과학지원연구

소의 VG54-30 열이온화질량분석기(TIMS)를 이용하여 측정되었고 그 결과는 Table 3에 나타내었다. 분석된 자료로부터 계산된 전암연대는 114.6±9.1 Ma로 나타나며 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr의 초생값은 0.704572±0.000056(2σ)로 나타났다(Fig. 7). 이 결과는 이 지역에 관입한 화강암질 마그마의 관입시기는 백악기 초기였으며 균원물질이 상부맨틀과 관련이 있음을 지시한다. 진동화강암체와 유사한 Rb-Sr 전암연대를 나타내는 화강암체는 인접한 마산지역의 각섬석-흑운모화강암(100.1 Ma: Jin, 2002) 및 연구지역의 서쪽에 분포하는 순천-광양암체(101 Ma: 박천영 외, 1993)와 경상분지 북서쪽에 위치하는 월악산화강암(108.6 Ma: Jin, 2002), 무암사화강암(109.9 Ma: Jin, 2002)등이 있다.

진동화강암체의 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr의 초생값은 경상분지 동남부에 분포하는 마산, 진해, 밀양, 산내, 부산 및 언양(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7049-0.707: Jin, 2002)등지에 분포하는 백악기 화강암류의 초생값과 유사한 매우 낮은 값을

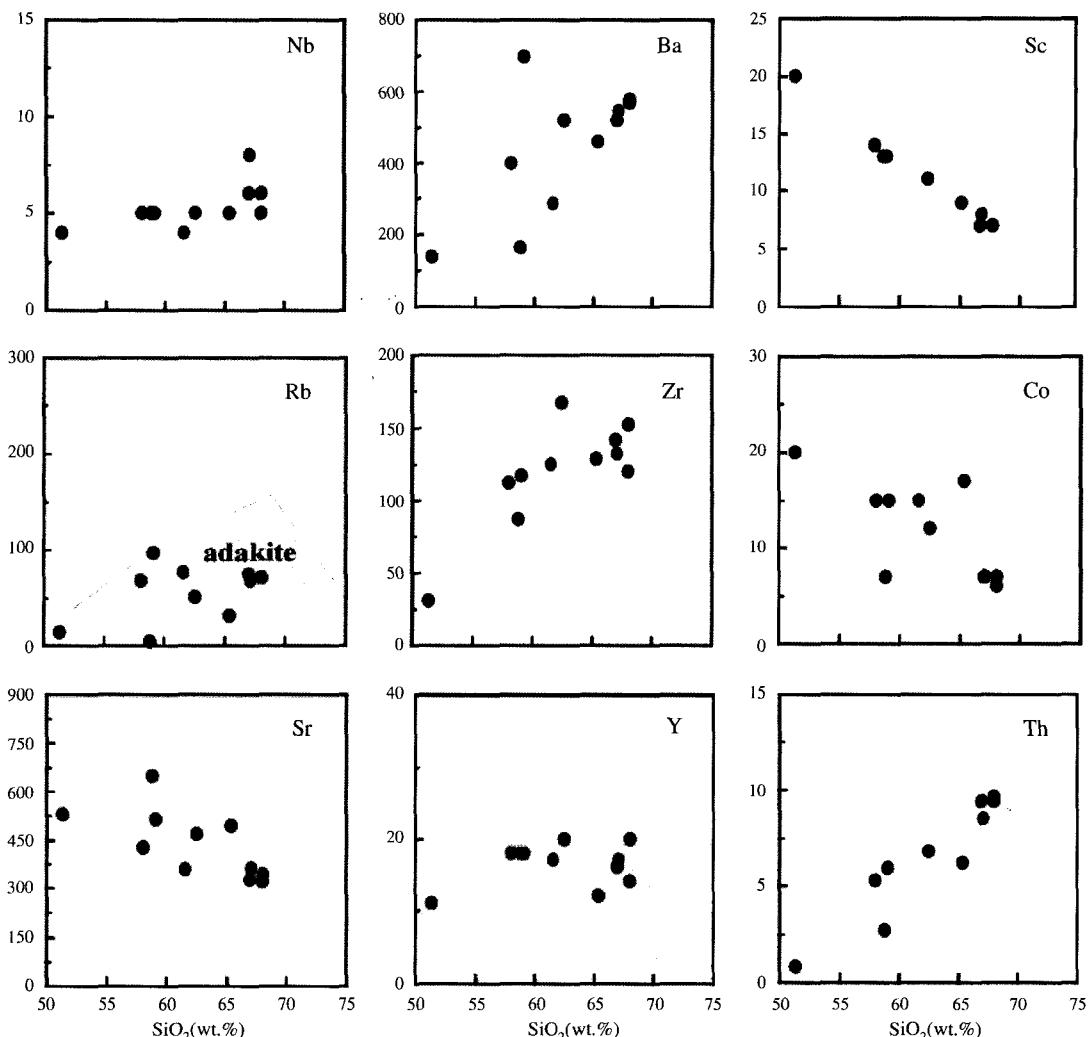


Fig. 4. Trace element(unit in ppm) variations against SiO₂(wt.%) contents of the Jindong granites. Shaded areas are the adakitic field(Defant and Drummond, 1990; Kiji *et al.*, 2000; Ishihara and Jin, 2005).

가지며 이는 무암사(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710: 진명식 외, 1991)나 월악산(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7151: 진명식 외, 1991)의 값과는 큰 차이를 나타낸다. 따라서 진동화강암체를 포함한 한반도 남부지역에 관입한 백악기 화강암질마그마는 상부맨틀로부터 기원되었음을 나타내며, 무암사 및 월악산지역의 마그마는 근원물질이 다르거나 혹은 지각에 심하게 오염되었을 가능성을 시사한다.

4.2. 인근지역에 분포하는 동시기 화강암류와 지화학적 특성 비교

진동화강암체와 지리적으로 인접한 지역에 분포하면서 관입시기나 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr의 초생값이 유사한 마산 각섬

석-흑운모화강암과 순천-광양암체를 진동화강암체와 서로 비교해보았다. 이들을 암석기재학적인 관점에서 살펴보면 주 구성광물이 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모 및 각섬석으로 구성되어 있으며 진동화강암체를 구성하는 암석들과 구성광물면에서 유사하다. 또한 이들의 주성분원소의 지구화학적 특징도 분화에 따른 일련의 연속성을 나타내며, 단지 마산 각섬석-흑운모화강암이 다른 암체들에 비해 다소 분화된 경향을 나타낸다 (Fig. 3). 특히, 진동화강암체와 순천-광양암체는 주성분 원소뿐만 아니라 미량원소 및 희토류원소들의 함량도 매우 유사하게 나타난다. SiO₂ 평균 함량이 순천-광양 지역의 경우 60.2%, 진동 지역의 경우 62.2%로 유사

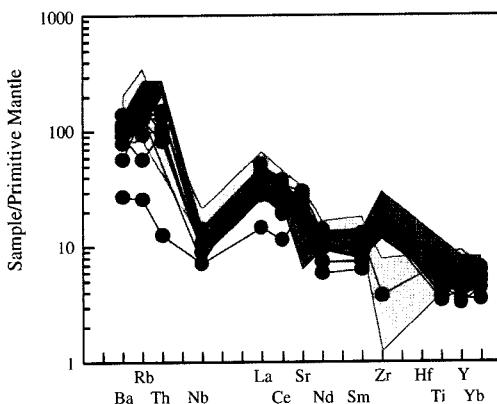


Fig. 5. Primitive mantle-normalized trace element patterns for whole rock samples from Jindong granitic rocks. Primitive mantle-normalization values are from Sun and McDonough(1989). Dark and light gray shaded areas represent ranges of samples from the Masan and Suncheon-Gwangyang area (data from Lee, 1997 and Park *et al.*, 1993).

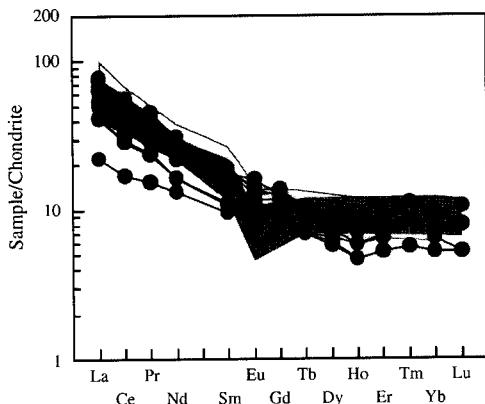


Fig. 6. Chondrite-normalized rare earth element patterns for whole rock samples from Jindong granitic rocks. Normalization values are from Sun and McDonough (1989). Dark and light gray shaded areas represent ranges of samples from the Masan and Suncheon-Gwangyang area (data from Lee, 1997 and Park *et al.*, 1993).

하며, 분화에 따른 산화물의 함량 및 변화 경향도 FeO 와 Fe_2O_3 를 제외하고는 거의 유사하게 나타난다. 미량원소의 경우도 Ba, Co, Y, Nb, Hf, Th 등의 함량이 유사하고, 또 두 지역의 희토류 원소 함량 및 콘드라이트에 표준화한 패턴을 비교해보면 Eu(-)이상이 거의 나타나지 않는 등 전체적인 패턴 또한 유사하며, $(\text{La/Yb})_{\text{C}}$ 값도 순천-광양 지역의 경우 6.1~14.9, 진동 지역은 4.21~12.8로 중희토류(HREE)에 대한 경희토류(LREE)의 부화정도도 비슷하게 나타난다(Figs. 5

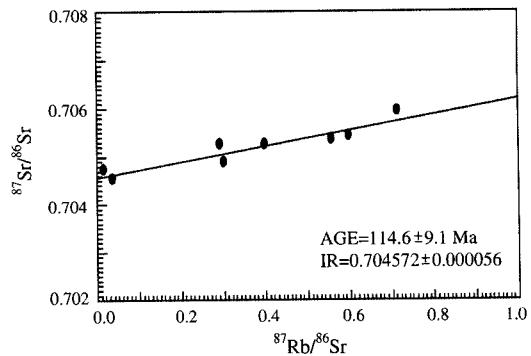


Fig. 7. Rb-Sr whole rock isochron of the Jindong granitic rocks.

Table 3. Rb-Sr isotope data of the granitic rocks in the Jindong area

Sample	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}^{(1)}$	Rb(ppm) ⁽²⁾	Sr(ppm) ⁽²⁾	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$
SM-4	0.705324 ± 9	67.2	347	0.5592
SM-5	0.705404 ± 8	72.8	352	0.5974
GB-I	0.704545 ± 8	7.37	582	0.0367
GB-4	0.705949 ± 8	73.9	300	0.7133
JD-16	0.705257 ± 8	70.4	512	0.3967
JD-21	0.704892 ± 5	51.6	495	0.3019
JD-23	0.705244 ± 5	57.7	571	0.2926
JD-27	0.704706 ± 7	3.6	683	0.0154

⁽¹⁾Standard deviation by 2 sigma.

⁽¹⁾The value of NBS987 during experiment was 0.71019.

⁽²⁾Analyzed by isotopic dilution method.

and 6). 이런 특성으로 보아 순천-광양 지역과 진동 지역의 암체는 관입시기 뿐만 아니라 유사한 마그마근원 물질에서 생성·분화되었음을 시사한다.

4.3. 진동화강암체와 adakite의 지화학적 특성비교

아다카이트(adakite)란 “sodic and felsic”한 암석으로 주로 섭입대와 관련하여 산출되며 섭입된 해양지각(subducted oceanic crust: Maruyama *et al.*, 1997)이나 염기성 하부지각(mafic lower crust: Kagami *et al.*, 1992)의 부분용융에 의하여 만들어진 마그마로부터 생성된 암석으로 전형적인 칼크-알칼리화강암과 비교하여 높은 Sr 및 낮은 Y의 함량으로 구분된다(Defant and Drummond, 1990). 이러한 지화학적 특성을 지닌 adakite는 아직까지 우리나라에서는 보고된 바는 없지만 일본 남서부에 위치한 큐슈 지방의 백악기 화강암체들에서 이러한 adakite들이 발견되며, 이 암체들은 관입시기(120~100 Ma)뿐만 아니라 고지리적인 위치나 고지구조적환경(paleo-tectonic environment)이 진동화

강암체와 유사하다(Kamei, 2004).

진동화강암체는 경상분지 내에 분포하는 다른 백악기 화강암류들과 비교해서 구별되는 지화학적 특성을 나타내고 있다. 이들은 경상분지 내의 다른 백악기 화강암류들에 비해 상대적으로 높은 Al_2O_3 , Na_2O 및 Sr 과 낮은 K_2O 와 Y 의 함량을 보인다.

Defant and Drummond(1990)에 의하면 전형적인 adakite의 지화학적 특성은 높은 Sr 함량(>400 ppm)과 낮은 HREE ($\text{Yb} \leq 1.8 \text{ ppm}$) 및 $\text{Y}(<18 \text{ ppm})$ 함량으로, LREE가 HREE에 비해 부화되어($(\text{La/Yb})_N > 10$) 있다고 하였는데, 진동화강암류의 Sr , Yb 및 Y 의 평균값은 각각 475 ppm, 1.96 ppm 및 19 ppm으로 adakite 영역에 해당하거나 경계값에 가까우며, $(\text{La/Yb})_N$ 은 7.2로 평균적인 adakite 값에 비해 약간 부화된 HREE값을 나타낸다. Defant and Kepezhinskas(2001)는 adakite의 지화학적 범위를 $\text{SiO}_2(>56\%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(>15\%)$, $\text{Na}_2\text{O}(>3.5\%)$, $\text{Sr/Y}(>40)$ 로 정의 하였고 그 후 Ishihara and Jin(2005)에 의해 $\text{Sr/Y}(>20)$ 의 범위가 다소 낮게 정의 되었는데, 진동화강암의 주성분원소의 평균값은 $\text{SiO}_2(60.33\%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3(17.19\%)$, $\text{Na}_2\text{O}(3.60\%)$ 으로 adakite 영역에 해당되며, Kiji *et al.*(2000)이 제시한 adakite의 주성분원소(Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO) 및 미량원소(Sr , Y , Rb)의 함량범위에 대부분의 진동화강암류가 도시된다(Figs. 3 and 4). 일반적으로 adakite를 구분하는 가장 좋은 방법으로 알려진 Sr/Y vs. Y (Defant and Drummond, 1990)에서 진동화강암류들은 경상분지내의 다른 백악기 화강암류와는 구분되어 adakite범주에 잘 도시된다(Fig. 8).

원시맨틀값에 표준화한 거미그림(Fig. 9a)에서 진동화강암류는 adakite의 평균값(Condie, 2005)에 비해 Rb , Ba , Th 과 같은 함수유체에서 유동성이 높은 원소들이 다소 부화되어 나타나는 경향이 있다. 그러나 이러한 특징은 일본 남서내대 큐슈 지방의 adakitic Shiraishino 화강섬록암(Kamei, 2004)과 유사한 형태를 나타내며, 일본 남서내대 산요벨트의 adakitic Tamba 화강암류(Kiji *et al.*, 2000)와 남중국 Dexing의 adakitic 반암(Wang *et al.*, 2006) 및 동중국 Sulu belt의 adakite(Guo *et al.*, 2006)와 같이 HREE가 부화된 것을 알 수 있다. 콘드라이트에 표준화한 희토류원소의 함량 및 패턴을 보면(Fig. 9b) 경희토류원소가 중희토류원

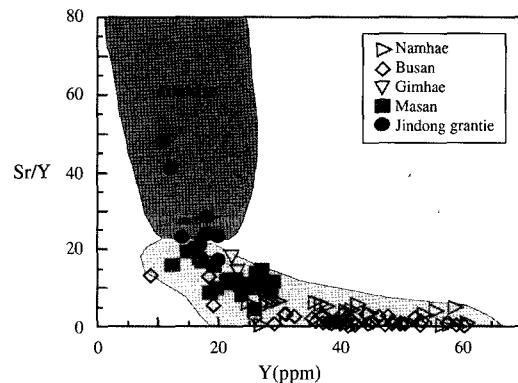


Fig. 8. Sr/Y vs. Y discrimination diagram for the adakite. Modified Sr/Y ratio of adakite range(Ishihara and Jin, 2005) is used in this diagram. Shaded areas represent adakite range(dark gray) and compositions of the Cretaceous granites(light gray) from Gyeongsang Basin (data from Lee, 1997; Jwa, 1998; Lee and Lee, 1999).

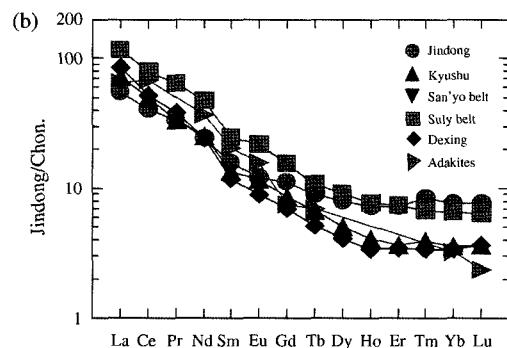
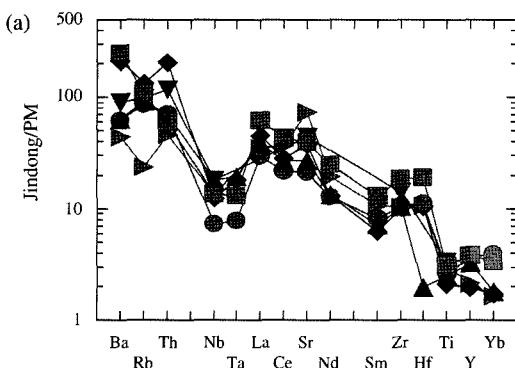


Fig. 9. (a) Normalized average trace element plots for the Jindong(●), Kyushu(▲), San'yo belt(▼), Sulu belt(■), Dexing(◆) and average adakite(►) (data from Condie, 2005; Guo *et al.*, 2006; Kamei, 2004; Kiji *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006). Primordial mantle normalizing values from McDonough *et al.* (1992). (b) Chondrite normalized REE patterns for the Jindong(●), Kyushu(▲), San'yo belt(▼), Sulu belt(■), Dexing(◆) and average adakite(►) (data from Condie, 2005; Guo *et al.*, 2006; Kamei, 2004; Kiji *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006).

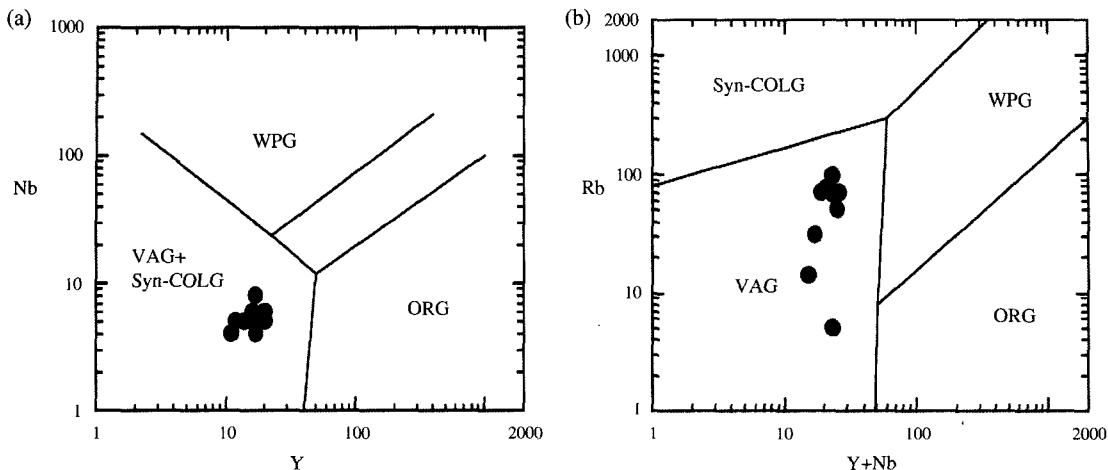


Fig. 10. (a) Nb vs. Y discrimination diagram for the Jindong granitic rocks, and (b) Rb vs. Y+Nb discrimination diagram for the Jindong granitic rocks (Pearce *et al.*, 1984).

소에 비해 전체적으로 부화되는데 ($\text{La/Yb}=5.07\sim19.23$), 진동화강암의 LREE 및 MREE는 adakite 평균값 (Conde, 2005)과 거의 일치하고 있지만, HREE는 보다 부화된 특성을 나타낸다. 이는 남중국 Dexing 지방의 adakitic 반암(Wang *et al.*, 2006)과 유사한 패턴을 보인다. 이러한 지화학적 특성으로 미루어 진동화강암류가 경상 분지내에 분포하는 다른 백악기 화강암류에 비해 상당히 adakitic한 특성을 가지고 있는 것으로 사료된다.

4.4. 마그마유형 및 지구조적 환경

본 연구 지역에서 나타나는 화강암류들의 마그마의 근원 물질을 알아보기 위해 ANK vs. ACNK 상관도 (Fig. 2)에 도시한 결과 대부분 암체들의 ACNK 값이 1.1보다 작은 I-Type으로 나타났으며(White and Chappell, 1983), 이러한 지화학적 특성은 남한의 백악기 화강암류의 마그마 유형과도 잘 일치한다(Jin, 1981). 주성분 원소의 화학 조성을 바탕으로 연구 지역 화강암류를 생성시킨 마그마의 특성을 알아보기 위해 SiO_2 vs. $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 의 상관도(Irvine and Barager, 1971)에 도시해본 결과, 연구 지역 대부분의 암체들이 subalkaline 화성암류에 해당되며, AFM도에 도시했을 때 대부분이 calc-alkaline 마그마 분화의 특징을 보여주며, 분화가 진행됨에 따라 마그마의 특성이 metaluminous에서 peraluminous한 쪽으로 진행됨을 알 수 있다.

본 연구지역에 분포하는 화강암류들의 지화학적 특성을 이용하여 화강암질 마그마의 생성 환경을 알아보기 위해 지구조 판별도에 접시해본 결과, Y vs. Nb 상관도(Fig. 10a)를 보면 본 연구 지역의 화강암류들이

대부분 VAG+syn-COLG에 도시되며, Rb vs. Y+Nb 상관도(Fig. 10b)에서는 VAG 영역에 도시되며, 또한 미량원소들을 Primitive mantle에 표준화하였을 때 뚜렷한 Nb(-)이상이 나타나는 것으로 보아 섭입과 관련된 마그마 활동에 의해 형성되었다는 것을 알 수 있다 (Ryerson and Watson, 1987). 위와 같이 미량원소에 의한 암석학적 특성에 따라 본 연구 지역 화강암류의 마그마 관입의 지구조적 환경은 중생대 백악기 이자나 기판의 섭입과 관련되어 관입한 대류주변부 환경에서 형성되었음을 시사하며, 마그마의 근원물질은 낮은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 초생값으로 미루어 맨틀물질과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다.

5. 결 론

진동화강암체에 대한 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소에 대한 지화학적 특징으로 유추한 마그마의 유형 및 근원물질, 관입연대 및 지구조적인 환경은 다음과 같다.

1. 진동화강암은 비알칼리암 중 calc-alkaline계열의 분화 과정을 거친 I-Type의 화강암류이며, 마그마의 특성이 metaluminous에서 분화가 진행됨에 따라 peraluminous한 쪽으로 진행됨을 알 수 있다.

2. 진동화강암체의 Rb-Sr전암연대는 114.6 ± 9.1 Ma로 계산되며 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 초생값은 0.70457로 나타났다. 낮은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 의 초생값은 경상분지 남부지역에 분포하는 백악기 화강암류들과 동일하다. 이 결과는 진동화강암체의 관입시기는 경상분지내에 분포하는 백악기 화강

암류 중에서 가장 오래된 백악기 초기였으며 균원물질이 상부멘틀과 관련이 있음을 지시한다.

3. 진동화강암체는 경상분지내의 다른 백악기 화강암류에 비해 상대적으로 높은 Al_2O_3 , Na_2O 및 Sr 과 낮은 K_2O 와 Y 의 함량을 보인다. 이들의 주성분원소 (Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , MgO) 및 미량원소(Sr, Y, Rb) 함량범위는 adakite의 범주에 포함되며 경상분지내의 다른 백악기 화강암류들과는 달리 진동화강암류는 adakitic한 지화학적 특성을 나타낸다.

4. 지구조 판별도에 접시해본 결과 화산호화강암(VAG)영역에 해당되며, 대부분의 암체들은 중생대 백악기 이자나기판의 섭입과 관련되어 관입한 대륙주변부 환경에서 생성되었음을 시사한다.

사 사

이 논문은 과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10553-0)의 지원에 의해 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드린다.

참고문헌

- 김규한, 이진수 (1993) 경상퇴적분지내에 분포하는 백악기 화산암류의 암석지구화학적 연구. *지질학회지*, v. 29, p. 84-96.
- 박천영, 윤정한, 박영석 (1993) 순천-광양지역에 분포하는 화성암류에 대한 Rb-Sr동위원소 및 암석지구화학적 연구. *한국자원공학회지*, v. 30, p. 53-65.
- 박희인, 최석원, 장호완, 채동현 (1985) 경남 힘안-군북지역의 동광화작용에 대한 연구. *광산지질학회지*, v. 18, p. 107-124.
- 유인창, 최선규, 위수민 (2006) 한반도 동남부 백악기 경상분지의 형성과 변형에 관한 질의. *자원환경지질*, v. 39, p. 129-149.
- 이준동 (1987) 경남 진동-마산 일대에 분포하는 화강암류와 접촉변성작용에 관한 연구. *서울대학교 박사학위논문*, 115p.
- 이준동 (1991) 경남 진동-마산 일대의 화강암류에 대한 암석학적 연구. *지구과학회지*, v. 12, p. 230-247.
- 이춘희, 이상원 (1999) 거제도에 분포하는 화강암에 대한 암석학 및 암석화학적 연구. *한국지구과학회지*, v. 20, p. 61-79.
- 좌용주 (1998) 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구 II. 미량원소 지구화학과 Rb-Sr 방사성 연대. *자원환경지질학회*, v. 31, p. 473-483.
- 진명식, 주승환, 지세정, 김성환, 신성천 (1991) 방사성동위원소 연령측정에 의한 옥천습곡대 북서부 중생대화강암체의 관입시기와 지열사연구. *동위원소지질연구 KR-91-1D-2*, 한국자원연구소, 35p.
- 최석원 (1986) 힘안지역 동광상의 성인에 관한 연구. *서울대학교 박사학위논문*, 116p.
- Choi, S. G., Ryu, I. C., Pak, S. J., Wee, S. M., Kim, C. S. and Park, M. E. (2005) Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geol. Reiews*, v. 26, p. 115-135.
- Choi, S. G., Pak, S. J., Kim, C. S., Ryu, I. C. and Wee, S. M. (2006) The origin and evolution of mineralizing fluids in the Cretaceous Gyeongsang Basin, Southeastern Korea. *Jour. Geochem. Explor.* v. 89, p. 61-64.
- Condie, K. C. (2005) TTGs and adakites: are they both slab melts?. *Lithos*, v. 80, p. 33-44.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, v. 347, p. 662-665.
- Defant, M. J. and Kepezhinskas, P. (2001) Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS Trans.*, 82, 65-69.
- Guo, F., Fan, W. and Li, C. (2006) Geochemistry of late Mesozoic adakites from the Sulu belt, eastern China: magma genesis and implications for crustal recycling beneath continental collisional orogens. *Geol. Magazine*, v. 143, p. 1-13.
- Hong, Y. K. (1987) Geochemical characteristics of Pre-cambrian, Jurassic and Cretaceous granites in Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 20, p. 35-60.
- Ishihara, S. and Jin, M. S. (2005) The Jechoen Granite- A western extension of the Hida Granite? *Abst. Korea Econ. Environ. Geol.*, p. 16-17.
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Jour. Earth Sci.*, v. 8, p. 523-548.
- Jwa, Y. J. (1996) Chemical Composition of Korean Cretaceous Granites in the Gyeongsang Basin I. Major Element Variation Trends. *Jour. Korean Earth Sci. Soc.*, v. 17, p. 318-325.
- Jin, M. S. (1981) Petrology and geochemistry of the Cretaceous granitic rocks in southern Korea. *Ph D. Thesis*, Seoul Nation. Univ., 144p.
- Jin, M. S. (1985) A relationship between tectonic setting and chemical composition of the Cretaceous granitic rocks in southern Korea. *Jour. Geol. Sci. Korea*, v. 21, p. 67-73.
- Jin, M. S. (2002) The study of Mesozoic igneous activity in the southern part of the Korean Peninsula - History, problems and perspectives -. In Mesozoic sedimentation, igneous activity and mineralization in south Korea. KIGMR., p. 111-126.
- Kagami, H., Iizumi, S., Tainoso, Y. and Owada, M. (1992) Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-aleogene granitoid rocks, Southwest Japan. *Arc. Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 112, p. 165-177.
- Kamei, A. (2004) An adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. *Jour. Asian Earth Sci.* v. 24, p. 43-58.
- Kiji, M., Ozawa, H. and Murata, M. (2000) Cretaceous adakitic Tamba granitoids in northern Kyoto, San'yo belt, southwest Japan. *Japanese Mag. Mineral. Petrol. Sci.* v. 29, p. 136-149.
- Lee, J. I. (1994) Major Element Geochemistry of the Shallow-depth Emplaced Granitic Rocks, Southern Part of the Kyeongsang Basin, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 30, p. 482-496.
- Lee, J. I. (1997) Trace and rare earth element geochemistry of granitic rocks, southern part of the Kyongsang Basin, Korea. *Geosci. Jour.* v. 1, p. 167-178.

- Lee, J. I., Kagami, H. and Nagao, K. (1995) Rb-Sr and K-Ar age determinations of the granitic rocks in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea: Implication for cooling history and evolution of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochem. Jour.*, v. 29, p. 363-376.
- Maniar, P. D. and Piccoli, P. M. (1989) Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 101, p. 635-643.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997) Paleogeographic maps of the Japanese Island: plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, v. 6, p. 121-142.
- McDonough, W. F., Sun, S. S., Ringwood, A. E., Jagoutz, E., Hoffmann, A. W. (1992) K, Rb and Cs in the earth moon and evolution of the earth's mantle. *Geochem. Cosmochim. Acta* v. 56, p. 1001-1012.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. and Tindle, A. G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrol.*, v. 25, p. 956-983.
- Ryerson, F. J. and Watson, E. B. (1987) Rutile saturation in magmas: implications for Ti-Nb-Ta depletion in orogenic rock series. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 86, p. 225-239.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins*. *Geol. Soc. Spec. Pub.* v. 42, p. 313-345.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974) Plate tectonics and the Japanese islands: A synthesis. *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 85, p. 1159-1170.
- Wang, Q., Xu, J. F., Jian, P., Bao, Z. W., Zhao, Z. H., Li, C. F., Xiong, X. L. and Ma, J. L. (2006) Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization. *Jour. Petrol.* v. 47, p. 119-144.
- White, A. J. R. and Chappell, B. W. (1983) Granitoid types and their distribution in the Lachlan fold belt, southeast Australia. *Geol. Soc. Am. Bull. Memoir*, v. 159, p. 21-33.

2005년 6월 1일 원고접수, 2006년 8월 31일 게재승인.