

진동화강암체의 아다카이틱한 특성

위수민^{1*} · 김윤지¹ · 최선규² · 박정우² · 유인창³

¹한국국외원대학교 지구과학교육과, ²고려대학교 지구환경시스템과학과, ³경북대학교 지질학과

Adakitic Signatures of the Jindong Granitoids

SooMeen Wee^{1*}, Yunji Kim¹, SeonGyu Choi², JungWoo Park² and InChang Ryu³

¹Dept. of Earth Sciences, Korea National Univ. Education

²Dept. of Earth & Environmental Sciences, Korea Univ.

³Dept. of Geology, Kyeongbuk National Univ.

The eastern extension of the Cordilleran-type orogenic belt continues from southeastern China to the Chukot Peninsula through the Korean Peninsula. The Gyeongsang basin, located in the southeastern part of the Korean Peninsula and the Inner Zone of southwest Japan are characterized by extensive distribution of Cretaceous to Tertiary I-type calc-alkaline series of intrusive rocks. These intrusive rocks are possibly the result of intensive magmatism which occurred in response to the subduction of the Izanagi Plate beneath the northeastern part of the Eurasian Plate. The Jindong granitoids within the Gyeongsang basin are reported to be adakites, whose signatures are high SiO₂, Al₂O₃, Sr, Sr/Y, La/Yb and, low Y and Yb contents. The major and trace element contents of the Jindong granitoids fall well within the adakitic field, whereas other Cretaceous granites in the same basin are plotted in the island arc ADR area in discrimination diagrams. Chondrite normalized REE patterns show generally enriched LREEs ((La/Yb)_c = 3.6-13.8) and slight negative to flat Eu anomalies. The mean Rb-Sr whole rock isotopic age of the Jindong granitoids is 114.6 ± 9.1 Ma with an initial Sr isotope ratio of 0.70457. These values suggest that the magma has mantle signature and intruded into the area during Early Cretaceous. The Jindong granitoids have similar paleogeographical locations, paleotectonic environments and intrusion ages to those of the Shiraishino granodiorites of Kyushu Island and the Tamba granitoids of San'yo belt located on southwestern Japanese arc.

Key words : Adakite, Cretaceous granite, Gyeongsang Basin, Jindong granitoids

한반도 남동부에 위치한 경상분지와 일본의 서남내대는 중국 남동부에서부터 러시아 추콧(Chukot) 반도를 잇는 코딜러형(Cordilleran-type) 조산벨트의 동쪽 확장부로서 백악기와 제3기에 걸쳐 관입한 I-형의 칼크-알칼리 계열 화강암류가 광범위하게 분포하고 있으며, 이들은 이자나기(Izanagi)판의 섭입과 관련된 화성활동의 산물로 생각된다. 고지리적 위치, 고지구조적 환경 및 관입 시기(120~100Ma)가 진동화강암체와 유사한 일본 서남내대 큐슈 지역의 시라이시노(Shiraishino) 화강섬록암 및 산요벨트의 탐바(Tamba) 화강암류는 높은 SiO₂, Al₂O₃, Sr, Sr/Y, La/Yb 및 낮은 Y, Yb 함량으로 특징지어지는 아다카이트(adakite)로 보고되었다. 진동화강암의 주성분원소(Al₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO) 및 미량원소(Sr, Y, Rb) 함량 범위는 일본 서남내대에 분포하는 백악기 아다카이트질 화강암의 범주에 포함되고, 아다카이트의 판별도로 가장 널리 이용되는 Sr/Y vs. Y 관계도에서 경상분지 내의 일반적인 백악기 화강암류가 호상열도형 ADR(Island Arc ADR) 영역에 분포하는 것과 명확히 구분되어 진동화강암류는 아다카이트 범주에 접시된다. 진동화강암의 희토류원소 패턴은 경희토류원소가 부화되어[(La/Yb)_c = 3.6~13.8] 나타난다. Rb-Sr 전암연대는 114.6 ± 9.1Ma이며 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr의 초생값은 0.70457로, 진동화강암체는 백악기 초기에 관입한 화강암체로서 근원물질이 상부맨틀과 밀접한 연관이 있음을 지시한다.

주요어 : 아다카이트, 백악기화강암, 경상분지, 진동화강암체

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

1. 서 론

한반도 남동부의 경상분지와 일본의 서남내대는 중국 남동부에서부터 러시아 추콧(Chukot) 반도를 잇는 중생대에서 신생대에 걸친 코딜레라형(Cordilleran-type) 조산벨트의 동쪽 확장부로서 I-형 칼크-알칼리 계열의 백악기에서 제3기에 걸쳐서 관입한 화강암류가 광범위하게 분포하고 있으며(Jin, 1980; Kagami *et al.*, 1992; Nakajima, 1994; Cheong *et al.*, 2002), 이들의 성인은 이자나기(Izanagi)판의 섭입과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다(Lee *et al.*, 1987; Cheong *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2005; Oh, 2006). 일본은 동해의 확장이 완료된 약 15Ma 이전에는 유라시아 대륙과 연결되어 있었던 것으로 생각되며(Otofuji and Matsuda, 1984; Otofuji *et al.*, 1985), 경상분지 내 백악기-제3기 화강암류의 암상과 연대 및 동위원소 특징은 일본 서남부 화강암의 특징과 잘 일치한다(Cheong *et al.*, 1998). 본 연구는 경상분지의 남서부에 분포하는 백악기 진동화강암류를 대상으로 기존에 연구된 일본 서남부 큐슈(Kyushu) 지역과 산요벨트(Sanyo belt)의 백악기 화강암류와 비교하여 지화학적 특성 및 지구조적 환경을 고찰하였다.

진동화강암은 칼크-알칼리 계열의 I-형으로 경상분지에 분포하는 백악기 화강암류의 전형적인 특성을 갖지만, 경상분지 내에 분포하는 다른 백악기 화강암류와는 성인적 차이에 기인한 지화학적 특성이 확연히 구별된다. 진동화강암과 고지리적 위치와 고지구조적 환경 및 관입 시기가 유사한 일본 서남내대 큐슈 지역의 시라이시노 화강섬록암(Kamei, 2004) 및 산요벨트의 탐바 화강암류(Kiji *et al.*, 2000)는 섭입 환경과 관련하여 고실리카, 고알루미나, 높은 Sr, Sr/Y, La/Yb 및 낮은 Y, Yb 함량의 특징(Defant and Drummond, 1990; Defant and Kepezhinskis, 2001)을 나타내는 아다카이트(adakite)로 분류되었다.

본 연구에서는 기 발표된 진동화강암의 화학분석자료(Wee *et al.*, 2006)를 보완하여 16개의 시료에 대한 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소의 분석을 실시하였으며, 일본 서남내대에 분포하는 백악기 아다카이트질 화강암류와의 비교 고찰을 통하여 진동화강암의 아다카이트한 지화학적 특성과 성인에 대해 논의하고자 한다.

2. 지질 및 암석 개요

진동 지역은 경상분지의 남서부에 위치하며, 백악기

중기 하양층군 진동층의 퇴적암, 백악기 후기 유천층군의 안산암, 친부관입암류인 진동화강암체 및 관입 화성활동에 기인한 염기성맥암과 산성맥암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 하양층군의 상부에 해당되는 진동층은 하부로부터 흑색 내지 암회색 셰일, 회색의 역암과 사암, 회색 내지 자색의 셰일 및 치트로 구성되며, 총층후는 1,500 m에 달한다(Park and Chi, 1963). 진동층의 주향은 N15°~45°E, 경사는 5°~20°SE로 연구 지역에 넓게 분포되어 있으며 진동화강암체가 관입하였는데, 관입 접촉부의 퇴적암은 주로 셰일과 이암으로 심하게 변성되어 호온펠스화 되어 있다(Heo *et al.*, 2003). 화성암의 관입시 화성활동에 기인한 염기성과 산성 암맥이 곳곳에 나타나며, 염기성 암맥의 구성 암석은 휘록암이고 산성 암맥은 대체로 규장암이며, 이들은 최후기의 관입암으로 추정된다(Lee, 1991). 유천층군의 층후는 2,000~3,000 m로 화산암 및 퇴적암으로 구성되어 있는데, 안산암은 본 역에서 나타나는 유일한 화산암으로 진동층의 퇴적암 내에 소규모의 관입 또는 분출암으로 나타난다(Heo *et al.*, 2003).

진동화강암체는 Park and Chi(1963)에 의해 단일 화강섬록암체로 진동리 도폭에 기재되었으나, Park *et al.*(1985)의 연구에서 의령 도폭 내 소규모의 화강섬록암, 석영섬록암 및 반려암과 연계된 복합관입암체로 보고되었다. 의령 도폭 내 군북-함안 지역에 분포하는 암체는 Park *et al.*(1985)와 Choi(1986)에 의해 화강섬록암, 석영섬록암 및 반려암으로 구분되었고, 진동리 도폭에 분포하는 암체는 Lee(1987)에 의해 화강섬록암 및 석영섬록암으로 구분되고 일부는 마산암으로 분류되었다. Lee and Lee(1994)은 오희리 부근 광화지역의 진동화강암체를 반려암, 석영섬록암, 토날라이트 및 화강섬록암으로 구분하고, 비광화지역의 진동화강암체를 화강섬록암과 석영섬록암으로 분류하였다. 반려암과 석영섬록암은 의령 도폭 내 광화 지역인 군북-함안 일대에 소규모로 분포하는데, 석영섬록암은 암체 전반에 걸쳐 광범위하게 분포하는 대상의 화강섬록암체와 그 경계가 불분명하다.

진동화강암류는 암상 및 경하 관찰에 의한 결과로부터 화강섬록암, 석영섬록암, 반려암으로 구분된다. 화강섬록암은 사장석, 석영, 각섬석, 흑운모가 주를 이루고, 녹니석, 녹립석, 점토광물, 불투명 광물이 함유되어 있다. 석영의 함량이 높으며, 유색 광물은 각섬석이 우세하고 흑운모와 녹니석으로 구성되며, 변질광물로는 녹니석, 녹립석 및 점토 광물이 나타난다. 사장석은 알바이트 쌍정, 칼스바드 쌍정, 페리클린 쌍정 및 조성

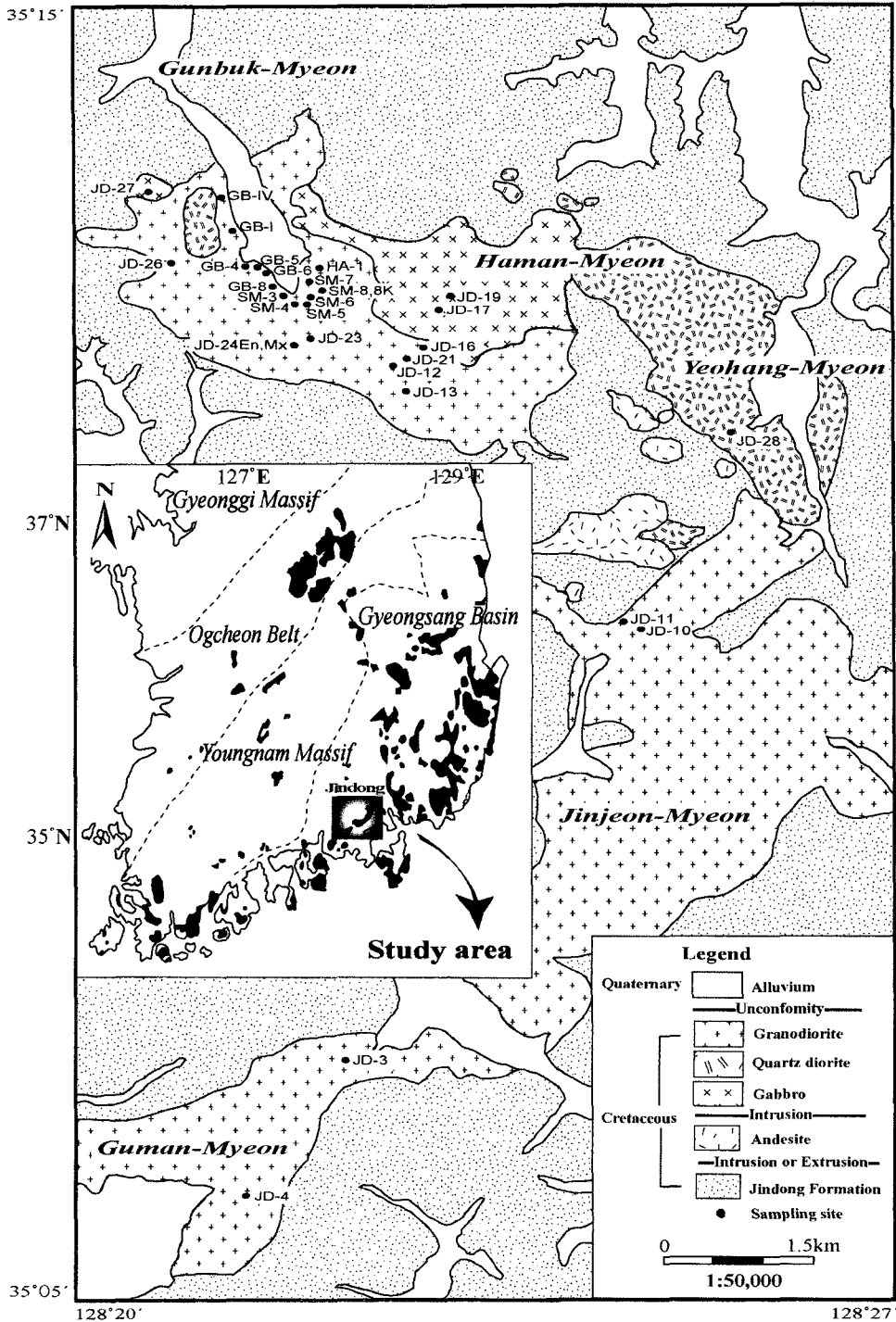


Fig. 1. Simplified Geological map (modified from Park *et al.*, 1985) of Jindong area showing the sampling localities. In the inset diagram the tectonic provinces of southern part of the Korean peninsula are shown.

차이로 인한 누대 조직이 관찰되며, 주상의 각섬석은 다색성을 보이며 사장석, 흑운모와 연정을 이루는데,

일부 각섬석 결정은 불투명 광물을 포획하고 있다. 흑운모는 갈색 내지 녹색의 다색성을 보이고 한방향의

벽개가 뚜렷하며, 일부 흑운모 입자는 벽개를 따라 녹니석, 점토 광물로 교대되어 나타난다.

석영섬록암은 사장석, 각섬석 및 흑운모가 주를 이루고, 석영의 함량이 높으며, 녹니석, 점토광물, 불투명 광물을 수반한다. 유색 광물은 각섬석이 주를 이루고, 흑운모와 일부 변질된 녹니석이 관찰된다. 사장석은 알바이트 쌍정이 우세하게 나타나며, 조성 차이에 따른 누대 조직의 특징을 보여준다.

반려암은 사장석과 휘석이 대부분을 차지하는데, 휘석은 사방휘석과 단사휘석이 모두 나타나며, 녹니석 및 불투명 광물이 관찰된다. 사장석은 대부분 알바이트 쌍정이 나타나고, 일부 칼스바드 쌍정과 페리클린 쌍정

이 함께 나타나기도 한다. 사방휘석이 단사휘석에 비해 우세하게 나타나고, 휘석 입자의 가장자리에서 다색성의 뚜렷한 차이를 보이는 부분이 관찰되며, 녹니석은 주로 미세 균열을 따라 성장하였다.

3. 지구화학

진동 지역에서 야외 지질 조사를 통해 채취한 16개의 시료를 캐나다에 소재한 Activation Lab.에 의뢰하여 주성분원소와 일부 미량원소(Ba, Sr, Y, Sc, Zr)는 X선 형광분석기(XRF)로, 그 외 미량원소와 희토류원소는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 분석하였

Table 1. Whole-rock major (in wt.%), trace (in ppm) element and calculated normative mineral composition of Jindong granitoids.

Sample	JD-3	JD-4	JD-10	JD-11	JD-12	JD-13	JD-16	JD-17	JD-19	JD-21	JD-23	JD-24	JD-24	JD-26	JD-27	JD-28
SiO ₂	64.19	57.95	64.90	65.02	63.58	55.29	57.79	45.31	49.46	58.88	60.96	55.07	60.61	64.03	44.26	61.36
TiO ₂	0.520	0.556	0.469	0.421	0.465	0.741	0.713	0.854	1.101	0.670	0.451	0.798	0.644	0.484	1.077	0.591
Al ₂ O ₃	16.33	18.57	16.57	15.74	16.86	18.05	17.56	21.42	19.51	17.87	17.6	18.67	17.36	16.43	21.72	17.47
Fe ₂ O ₃	0.88	2.12	1.20	1.17	0.88	3.12	1.99	4.11	3.58	0.41	2.34	1.49	1.10	0.71	4.63	2.62
FeO	2.86	4.65	2.79	3.31	4.13	5.02	5.23	6.87	6.76	6.38	4.27	6.63	5.31	4.40	7.52	2.33
MnO	0.027	0.078	0.043	0.037	0.075	0.075	0.068	0.182	0.186	0.104	0.034	0.026	0.023	0.100	0.187	0.135
MgO	1.72	2.44	1.13	1.42	1.72	3.43	2.94	6.73	5.03	2.49	1.73	3.62	2.62	1.73	6.15	2.13
CaO	4.99	5.78	3.89	3.98	4.83	6.22	5.73	11.16	9.40	5.97	4.92	4.81	4.84	4.49	11.5	5.05
P ₂ O ₅	0.13	0.30	0.11	0.13	0.17	0.13	0.18	0.02	0.26	0.19	0.22	0.21	0.22	0.17	0.30	0.23
Na ₂ O	3.58	4.45	3.95	3.41	3.82	4.04	3.82	1.56	3.34	3.78	3.78	3.51	3.38	3.72	1.64	5.09
K ₂ O	3.08	0.82	3.62	2.70	1.99	1.78	2.27	0.15	0.19	1.38	1.90	2.97	2.00	2.19	0.07	0.67
LOI	0.98	1.60	0.73	1.03	0.98	1.49	0.85	0.75	0.42	1.01	0.51	1.4	1.29	0.86	<0.01	1.62
Total	99.29	99.30	99.40	98.37	99.49	99.39	99.14	99.11	99.23	99.13	98.71	99.20	99.40	99.31	99.04	99.30
Ba	633	239	1123	648	532	310	424	63	176	365	457	467	424	506	70	252
Rb	64	26	57	66	54	70	72	7	3	42	60	120	86	58	4	24
Sr	416	627	529	395	488	447	515	578	562	500	570	491	507	428	674	532
Y	28.5	19.1	16	21.3	19.1	22.9	20.1	6.3	20.5	22.5	17.3	14	25.3	23.8	9.4	24.6
Zr	187	118	142	135	129	94	100	14	71	110	102	100	157	159	9	129
Nb	5.6	3.8	4.8	4.7	4.2	2.9	3.1	0.4	2.5	3.4	3.6	3.1	4.1	4.8	0.4	5.4
Th	10.70	2.25	8.43	9.06	5.85	3.19	4.20	0.24	0.31	5.44	4.44	3.74	4.74	7.70	0.19	5.25
U	2.77	0.57	2.53	2.09	1.26	1.30	1.21	0.09	0.11	1.43	1.28	1.28	1.58	1.64	0.07	1.37
Pb	<3	16	6	4	7	60	73	3	<3	5	4	<3	8	10	<3	12
Zn	13	16	16	20	29	28	23	56	69	28	27	27	19	50	91	54
Ga	17	20	15	15	16	18	17	21	19	17	18	19	18	17	20	19
Ge	1.4	1.5	1.4	1.6	1.5	1.7	1.6	1.3	1.4	1.5	1.5	1.8	1.3	1.6	1.4	1.7
Cu	2	11	5	9	17	49	6	6	11	4	6	100	99	92	16	1
Ni	7	8	3	5	6	7	7	15	17	5	4	13	8	8	20	8
V	79	73	58	54	57	164	118	303	225	102	46	143	97	61	292	70
Cr	40	24	51	56	48	23	26	19	29	26	30	24	42	47	40	35
Hf	5	3.0	3.9	3.9	3.5	2.6	2.8	0.4	1.7	3.3	2.9	2.7	4.0	4.3	0.3	3.5
Cs	1.1	1.0	1.4	1.4	1.7	2.8	2.7	1.8	0.7	2.3	4.0	7.4	4.9	1.9	0.8	0.6
Sc	13	11	7	8	9	22	16	25	29	14	8	19	14	10	23	9
Co	5	13	6	10	8	12	12	29	24	13	9	21	19	9	33	6

Table 1. Continued.

Sample	JD-3	JD-4	JD-10	JD-11	JD-12	JD-13	JD-16	JD-17	JD-19	JD-21	JD-23	JD-24	JD-24	JD-26	JD-27	JD-28
La	37.1	19.2	14.9	22.1	19.9	22.2	15.7	3.45	10.8	16.9	16.6	22.6	29.9	23.3	5.96	16.2
Ce	66.1	40.8	28.0	42.7	40.1	42.2	33.6	6.77	24.2	36.3	34.9	42.2	55.7	47.3	13.2	38.8
Pr	7.40	5.32	3.47	5.08	5.03	5.20	4.50	0.89	3.51	4.78	4.60	5.20	6.49	5.84	1.91	5.48
Nd	25.6	21.5	12.2	18.0	18.3	19.2	17.9	4.35	15.3	19.1	17.6	19.8	23.9	22.0	8.56	21.4
Sm	4.97	4.82	2.30	3.33	3.45	4.44	4.19	1.39	4.12	4.42	3.90	4.30	4.41	4.12	2.43	4.44
Eu	1.07	1.30	0.73	0.914	1.07	1.06	1.09	0.692	1.45	1.21	1.16	1.07	1.37	1.10	1.02	1.25
Gd	4.47	3.61	2.25	3.36	3.32	3.52	3.51	0.89	3.88	3.95	3.13	3.48	4.17	3.86	2.05	3.69
Tb	0.73	0.57	0.37	0.59	0.55	0.62	0.61	0.16	0.64	0.67	0.51	0.52	0.69	0.63	0.30	0.60
Dy	4.27	3.33	2.23	3.25	3.10	3.70	3.52	1.05	3.86	3.91	2.85	2.69	4.10	3.69	1.82	3.61
Ho	0.89	0.65	0.48	0.68	0.64	0.76	0.72	0.22	0.77	0.78	0.58	0.51	0.84	0.76	0.35	0.71
Er	2.75	1.98	1.52	2.17	1.99	2.40	2.22	0.66	2.25	2.38	1.71	1.40	2.59	2.40	1.04	2.14
Tm	0.413	0.299	0.24	0.341	0.303	0.372	0.326	0.099	0.325	0.355	0.265	0.204	0.389	0.383	0.15	0.325
Yb	2.63	1.89	1.58	2.22	1.98	2.41	2.07	0.68	2.09	2.31	1.74	1.34	2.39	2.54	0.95	2.12
Lu	0.443	0.311	0.253	0.355	0.314	0.377	0.326	0.116	0.320	0.373	0.287	0.239	0.370	0.393	0.147	0.343
<i>Molecular Norms</i>																
Quartz	19.28	12.09	17.99	24.28	20.44	5.13	9.33	-	0.06	14.15	17.78	5.61	18.56	21.42	-	15.16
Corundum	-	0.43	-	0.20	0.03	-	-	-	-	-	0.64	1.06	0.97	0.13	-	-
Orthoclase	19.78	5.46	23.05	17.53	12.87	11.97	15.04	1.04	1.29	9.10	12.51	19.93	13.24	14.15	0.49	4.41
Albite	32.19	41.39	35.14	30.99	34.50	37.99	35.43	15.35	32.21	34.99	34.74	32.94	31.22	33.62	16.10	46.71
Anorthite	19.58	27.85	16.77	19.31	23.20	27.27	24.98	56.20	40.79	28.74	23.70	23.73	23.44	21.52	56.79	23.46
Diopside	3.06	-	1.21	-	-	2.99	2.28	3.15	5.29	0.47	-	-	-	-	2.56	0.51
Hypersthene	4.32	9.75	4.10	5.82	6.81	11.41	9.89	16.33	15.72	9.60	7.97	13.21	9.71	6.96	13.13	7.35
Olivine	-	-	-	-	-	-	-	3.88	-	-	-	-	-	-	5.69	-
Magnetite	0.95	1.76	0.99	1.14	1.28	2.12	1.87	2.98	2.77	1.80	1.69	2.15	1.68	1.31	3.30	1.24
Ilmenite	0.58	0.64	0.52	0.47	0.53	0.87	0.81	1.03	1.31	0.77	0.51	0.93	0.73	0.54	1.31	0.66
Apatite	0.26	0.63	0.22	0.26	0.34	0.27	0.37	0.04	0.56	0.39	0.45	0.43	0.45	0.34	0.65	0.48

으며(Table 1), 도표는 기 발표된 진동화강암 자료(Wee *et al.*, 2006)를 취합하여 사용하였다. 국제 표준시료를 같이 분석한 결과, 주성분원소의 오차 한계는 5% 미만이며, Tb, Tm, Lu(<10%)을 제외한 대부분의 미량 원소 및 희토류원소의 오차 한계는 6% 미만으로 나타났다. 기 발표된 경상분지 내의 백악기 화강암류에 대한 지화학적 분석 자료들을 참조하였으며, 일본 서남 내대 큐슈 지역의 아다카이트(시라이시노 화강섬록암) 및 산요벨트의 아다카이트(탐바 화강암)와의 비교 해석으로 진동화강암체의 지화학적 특성을 고찰하였다.

3.1. 주성분원소

진동화강암체에 대한 주성분원소의 분석 결과를 하커(Harker)의 성분변화도에 도시한 결과는 Fig. 2와 같다. 진동화강암류의 SiO₂ 함량 범위는 44.3~68.1 wt.%로 열기성암에서 산성암에 이르는 넓은 변화폭을 갖는다. 하커변화도에서 진동화강암체의 산화물은 SiO₂의 함량이 증가함에 따라 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃(T), MgO, CaO, P₂O₅는 감소하고, K₂O는 분산되면서 증

가하는 경향을 보이는데, 고철질 암석에 주로 농집되는 TiO₂, Fe₂O₃(T), MgO, CaO, P₂O₅ 성분에서 SiO₂ 함량의 증가에 따른 감소 경향이 비교적 잘 인지된다. 진동화강암체의 일부 산화물 Al₂O₃, Fe₂O₃(T), MgO, CaO, P₂O₅, Na₂O, K₂O의 함량 변화는 큐슈 아다카이트와 유사하고, Fe₂O₃(T), CaO, K₂O의 경향은 산요벨트 아다카이트와 유사하게 나타나며, Xiong *et al.*(2006)이 정리한 아다카이트의 평균 범위에 잘 일치한다(Fig. 2). 진동화강암류의 주성분원소는 하커변화도에서 선상의 연속된 변화 경향을 나타내고, MgO를 분화지수로 도시한 변화도에서 역시 연속적인 경향을 나타내는 것으로 미루어 진동화강암류는 유사한 근원 물질로부터 결정분화한 산물로 해석된다.

진동화강암체를 형성한 마그마의 특성으로 SiO₂ vs. A/CNK 몰비 관계도에서 A/CNK 값은 0.82~1.06(평균 0.93)으로 나타나 1.1보다 작은 I-Type으로 구분되고, 일부 시료가 경계에 분포하지만 대부분 중알루미나(metaluminous) 영역에 해당한다. SiO₂ vs. Na₂O+K₂O 관계도(LeBas *et al.*, 1986)에 도시하면 진동화강암류

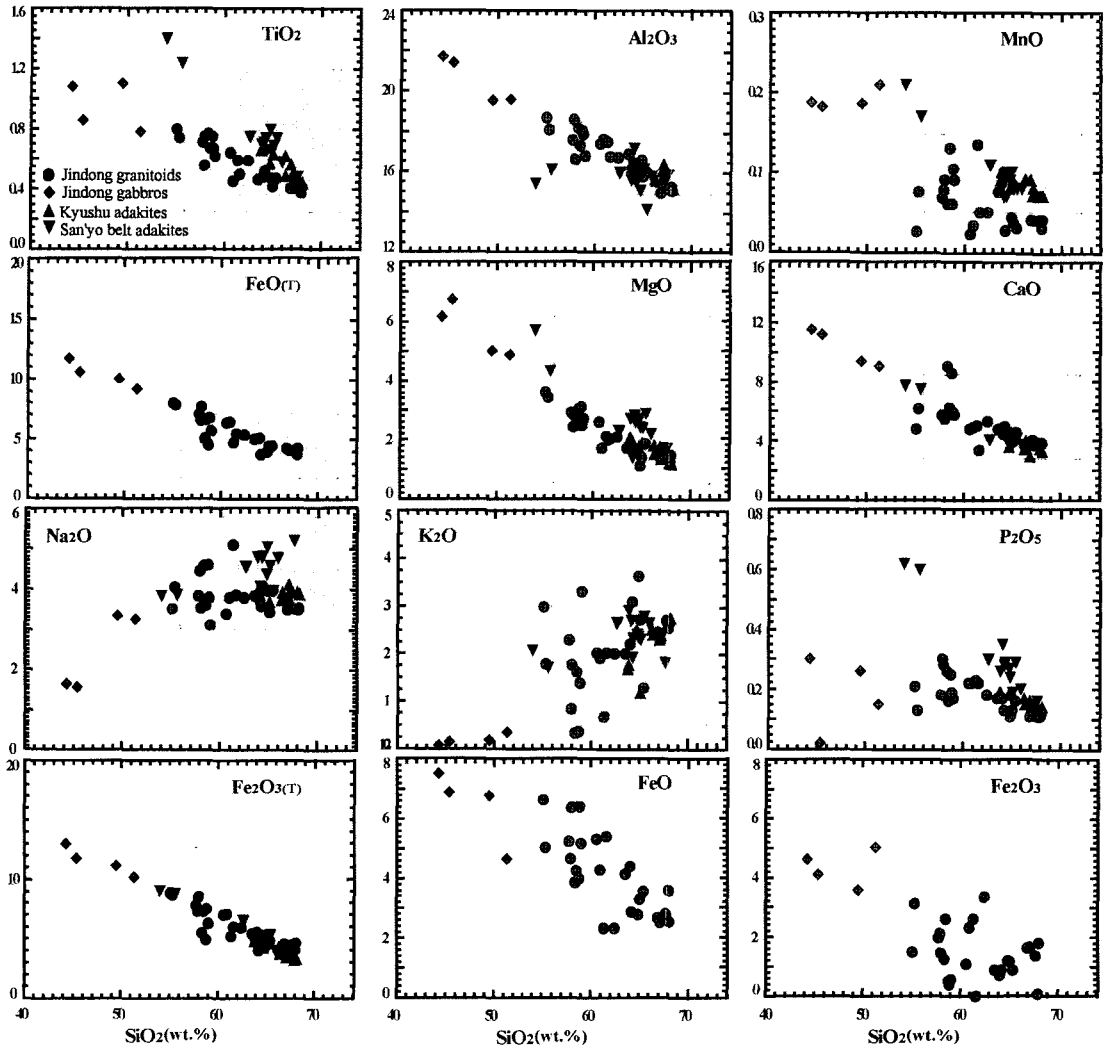


Fig. 2. Harker variation diagrams for major element (in wt.%) of Jindong granitoids. Shaded areas represent adakite range(Xiong *et al.*, 2006). Symbols: Jindong granitoids (●), Jindong gabbros (◆), Kyushu adakites (▲), San'yo belt adakites(▼). Data from Kyushu adakite(Kamei, 2004) and San'yo belt adakite(Kiji *et al.*, 2000) are plotted for comparison.

는 비알칼리(subalkaline)영역 중 칼크-알칼리(calc-alkaline) 계열에 속하며, 반러암에서 화강섬록암에 이르는 분화 특징을 보여준다(Fig. 3).

3.2. 미량원소 및 희토류원소

진동화강암체에 대한 미량원소의 분석 결과(Table 1)를 성분변화도에 도시한 결과, 분화가 진행됨에 따라 Ba, Zr, Y, Nb, Th, Hf는 증가하고, Sr, Ni, Sc, Co는 감소하는 경향을 나타내며, 이외의 원소들은 분산되어 나타난다(Fig. 4).

거미그림(spider diagram)에서 유동성이 큰 LILE

(Ba, Rb, Th, Sr)는 부화된 반면 유동성이 작은 HFSE (Nb, Ta, Ti, Y)는 결핍된 양상을 보여(Fig. 5a), 화산호 환경에서 생성된 화강암류의 전형적인 특징을 나타낸다(Condie, 1989; Wilson, 1989). 희토류원소의 패턴은 경희토류원소(LREE)가 중희토류원소(HREE)에 비하여 전체적으로 부화되어 나타나는((La/Yb)_c=3.6–13.8) 남한에 분포하는 백악기 화강암질암의 전형적인 패턴을 나타낸다(Fig. 5b). 특히, Rb vs. Nb 관계도에서 진동화강암의 Nb 함량은 경상분지 내 다른 백악기 화강암류(Hong, 1987; Lee, 1997)에 비해 특징적으로 낮으며, 일본 서남내대의 아다카이트와도 구

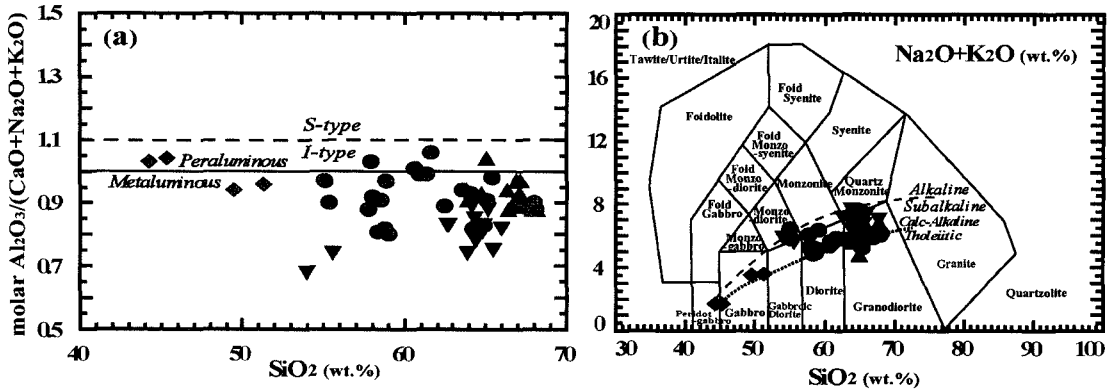


Fig. 3. (a) Molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ vs. SiO_2 diagram and (b) (Na_2O+K_2O) vs. SiO_2 diagram of Jindong granitoids. Symbols are the same as in Fig. 2.

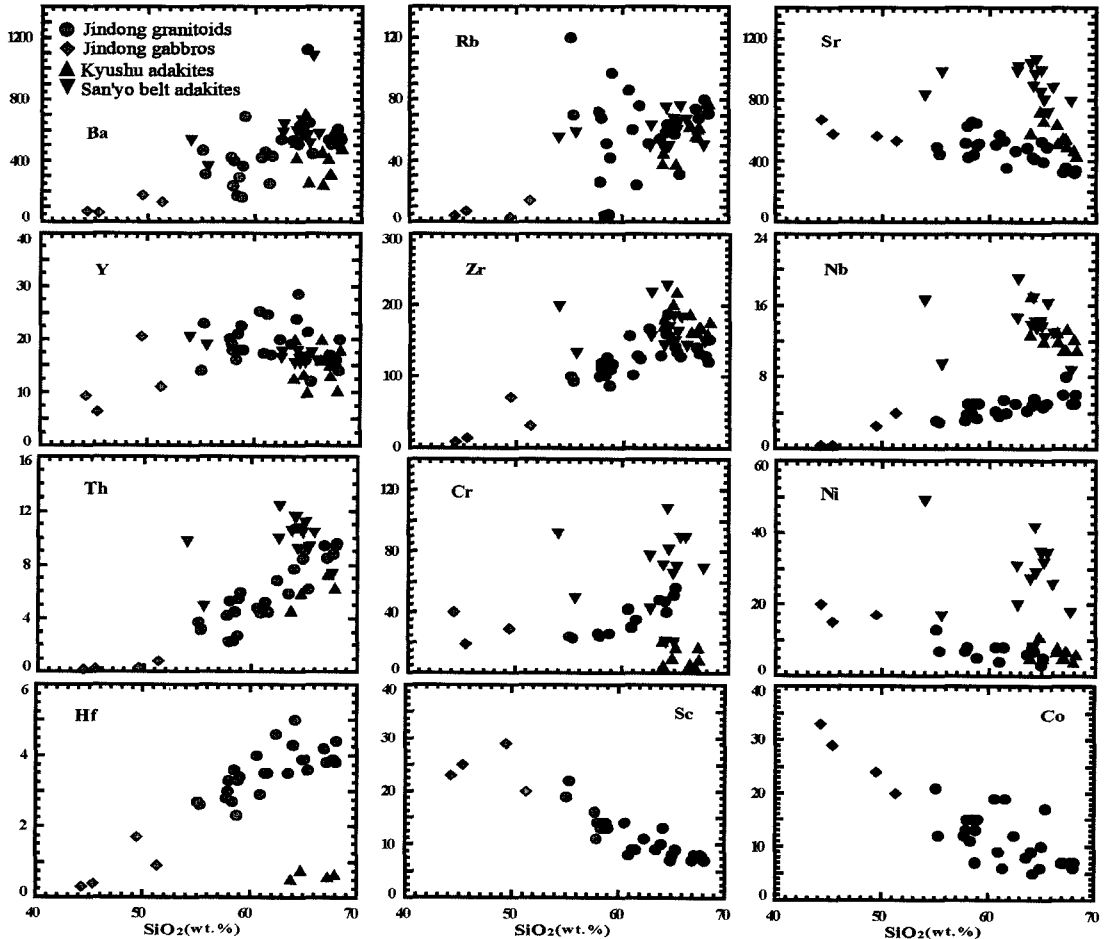


Fig. 4. Trace element variation diagrams of Jindong granitoids(unit in ppm). Symbols are the same as in Fig. 2.

별된다(Fig. 6).

진동화강암체를 형성한 마그마의 생성 환경을 유추

하기 위해 지구조 판별도(Pearce *et al.*, 1984)에 도시한 결과, Rb vs. Y+Nb 관계도와 Ta vs. Yb 관계도

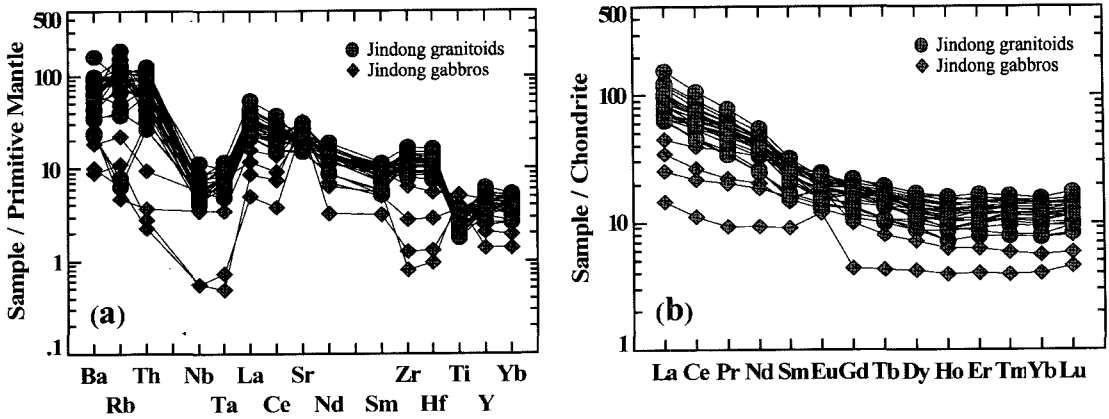


Fig. 5. (a) Primitive mantle-normalized trace element patterns and (b) chondrite-normalized REE patterns of Jindong granitoids. Normalizing factors after Sun and McDonough(1989).

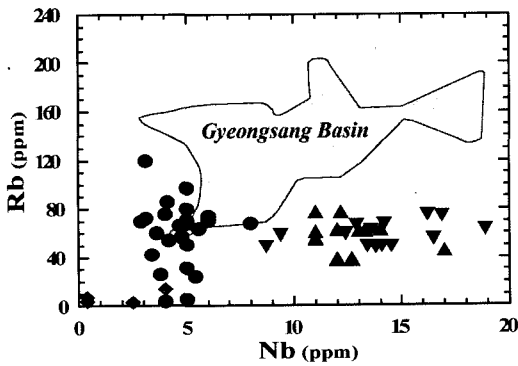


Fig. 6. Rb vs. Nb diagram of Jindong granitoids. The shaded area represents the composition of other Cretaceous granites in Gyeongsang Basin(Hong, 1987; Lee, 1997). Data from Kyushu adakite(Kamei, 2004) and San'yo belt adakite(Kiji *et al.*, 2000) are plotted for comparison. Symbols are the same as in Fig. 2.

에서 VAG 영역으로, Nb vs. Y 관계도에서 VAG 및 syn-COLG 영역으로 구분되며(Fig. 7), 이러한 결과로부터 진동화강암체를 형성한 마그마의 관입은 중생대 백악기 이자나기판의 섭입과 관련된 대륙 주변 환경에서 일어났음을 시사한다.

3.3. Rb-Sr 동위원소

진동화강암체의 8개 시료에서 측정한 Rb-Sr 동위원소 분석 결과로부터 계산한 진동화강암의 Rb-Sr 전암 연대는 $114.6 \pm 9.1\text{Ma}$ 로, 진동화강암체의 관입 시기는 경상분지 내에 분포하는 백악기 화강암류 중에서 가장 오래된 백악기 초기로 볼 수 있다(Wee *et al.*, 2006). 본 연구에서 비교 해석된 일본 서남내대 큐슈 아다카이트의 Rb-Sr 전암연대는 $121 \pm 14\text{Ma}$ 이고 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생값은 0.70493 ± 7 이며(Kamei, 2004), 산요벨트 아

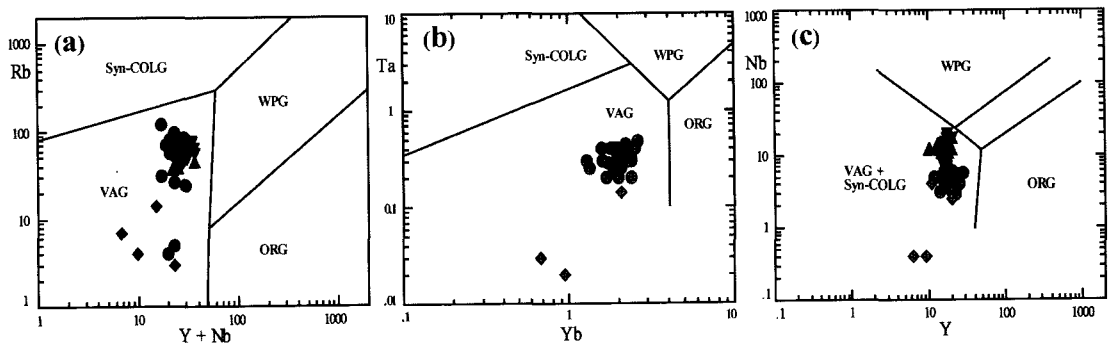


Fig. 7. Trace element (in ppm) discrimination diagrams of Jindong granitoids. (a) Rb vs. Y+Nb, (b) Ta vs. Yb, (c) Nb vs. Y (Pearce *et al.*, 1984); ORG(Oceanic Ridge Granite), VAG(Volcanic Arc Granite), WPG(Within Plate Granite), syn-COLG(syn-Collision Granite).

다카이트의 각섬석 혹은도 K-Ar 연대는 101~107Ma (Kiji *et al.*, 2000)로 진동화강암체의 관입 시기와 유사하다. 진동화강암의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생값은 $0.70457 \pm 6(2s)$ 로 나타났는데, 이는 남한에 분포하는 백악기 화강암류의 초생값 범위(0.704~0.7070; Jin, 1980)와 잘 부합되며 진동화강암체를 형성한 근원물질이 상부맨틀과 밀접한 연관이 있음을 지시한다.

4. 논 의

4.1. 아다카이틱한 지화학적 특징

아다카이트는 Kay(1978)가 알류산열도의 아다(Adak) 섬에서 섭입판의 용융에 기인한 독특한 조성의 화산암을 발견한 이후, Defant와 Drummond(1990)가 섭입하는 슬랩의 용융과 관련하여 호 환경에서 생성된 암석으로 정의하였다. Defant와 Kepezhinskas(2001)은 아다카이트의 화학적 특징을 $\text{SiO}_2 (>56 \text{ wt}\%)$, $\text{Al}_2\text{O}_3 (>15 \text{ wt}\%)$, $\text{Na}_2\text{O} (>3.5 \text{ wt}\%)$, $\text{Sr} (>400 \text{ ppm})$, $\text{Y} (<18 \text{ ppm})$, $\text{Sr}/\text{Y} (>40)$, $\text{Yb} (<1.9 \text{ ppm})$, $\text{La}/\text{Yb} (>20)$ 로 정의

하였고, Rollinson and Martin(2005)은 아다카이트를 TTG 및 Sanukitoid와 구분하고자 $\text{SiO}_2 (>56 \text{ wt}\%)$, MgO 평균(0.51 wt%), Ni 평균(24 ppm), Cr 평균 (36 ppm), $\text{Sr} (>400 \text{ ppm})$, $\text{Sr}/\text{Y} (>40)$, 희토류원소의 강한 부화 및 $(\text{La}/\text{Yb})_n (>40)$, $\text{Y} (<18 \text{ ppm})$, $\text{Yb} (<1.9 \text{ ppm})$ 를 특징으로 정리하였다. 일반 화산호의 암석과 구별되는 아다카이트의 화학적 특성(Castillo, 2006)을 진동화강암체의 분석 값과 비교한 결과, 진동화강암은 아다카이틱한 지화학적 특징을 나타내는 것으로 판단된다(Table 2).

아다카이트의 판별도로 가장 널리 사용되는 Sr/Y vs. Y 관계도(Defant and Drummond, 1990)에서 아다카이트는 Sr 함량이 높고 Y 함량이 낮은 화학적 특성으로 인하여 그래프의 왼쪽 상단에 분포하게 되는데, 경상분지 내의 백악기 화강암류인 마산, 김해, 부산, 남해 화강암류(Lee, 1991; Kim and Park, 1995)가 일반적인

Table 2. Geochemical characteristics of adakite and Jindong granitoids.

Adakite	Jindong granitoids (average)
high $\text{SiO}_2 (>56 \text{ wt}\%)$	$\text{SiO}_2=44.26\sim68.05 (60.00)$
high $\text{Al}_2\text{O}_3 (>15 \text{ wt}\%)$	$\text{Al}_2\text{O}_3=14.93\sim21.72 (17.30)$
low MgO ($<3 \text{ wt}\%$)	$\text{MgO}=1.13\sim6.73 (2.65)$
high Sr ($>300 \text{ ppm}$)	$\text{Sr}=320\sim674 (483)$
low Y ($<15 \text{ ppm}$)	$\text{Y}=6.3\sim28.5 (18.2)$
high Sr/Y (>20)	$\text{Sr}/\text{Y}=14.60\sim91.75 (29.90)$
no Eu anomaly	no Eu anomaly
low HFSE's: Nb, Ta	low HFSE's: Nb, Ta, Ti, Y
low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} (<0.704)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704545\sim0.705949$

Adakite data from Castillo(2006)

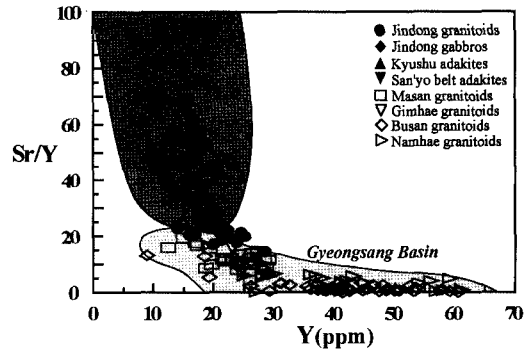


Fig. 8. Sr/Y vs. Y discrimination diagram for the adakite (Castillo, 2006). Shaded areas represent adakite range (dark gray) and composition of other Cretaceous granites (light gray) in the Gyeongsang Basin(Lee, 1991; Lee, 1991, 1997; Kim and Park, 1995; Jwa, 1996).

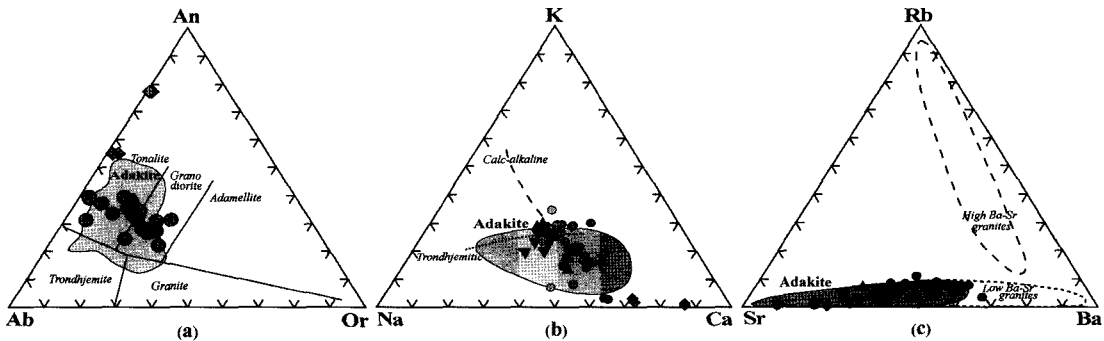


Fig. 9. CIPW normative (a) Ab-An-Or granitic rock classification diagram, (b) Na-K-Ca triangular diagram, (c) Sr-Rb-Ba triangular diagram of Jindong granitoids. Dark gray shaded areas are the adakitic field (Xiong, 2006; Qian, 2003).

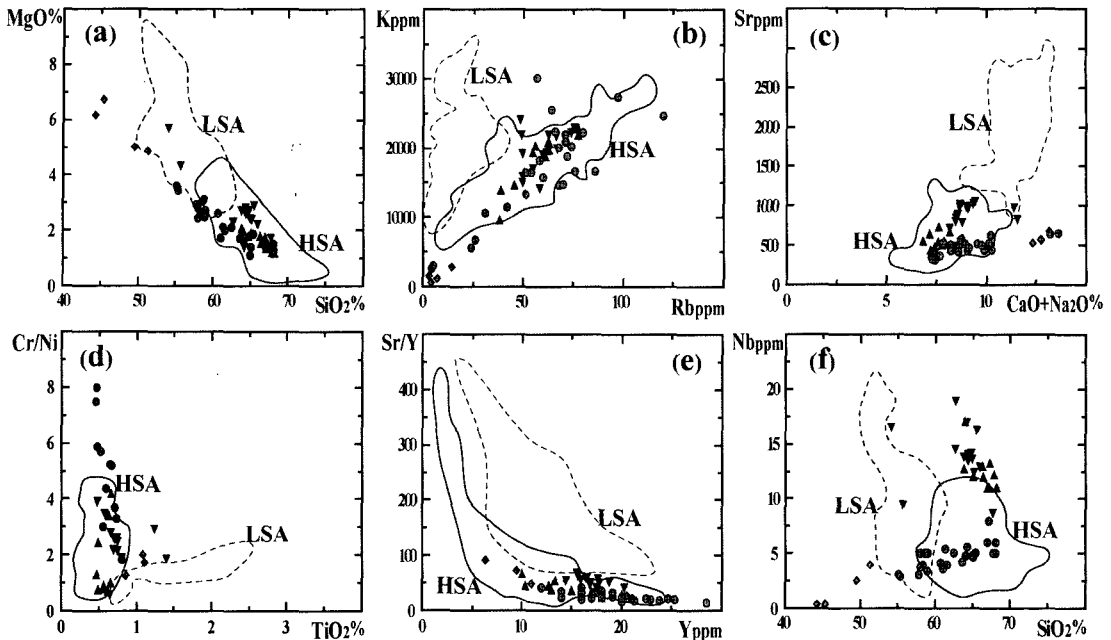


Fig. 10. (a) MgO vs. SiO₂, (b) K vs. Rb, (c) Sr vs. (CaO+Na₂O), (d) (Cr/Ni) vs. TiO₂, (e) (Sr/Y) vs. Y, (f) Nb vs. SiO₂ diagrams of Jindong granitoids comparing high-SiO₂ adakites (HSA) and low-SiO₂ adakites (LSA).

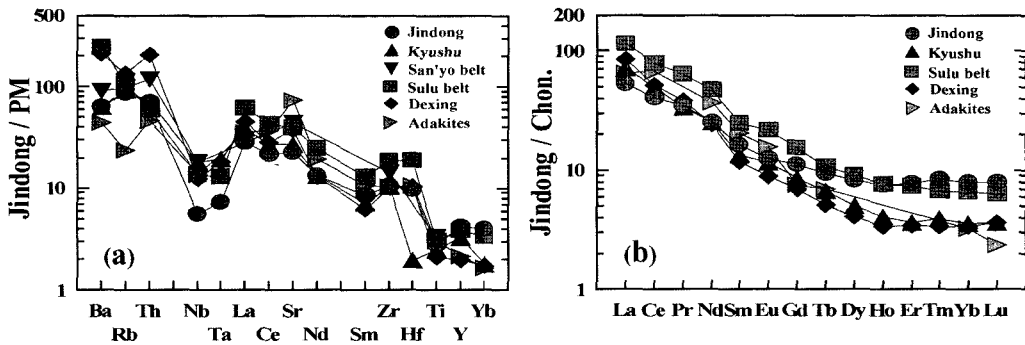


Fig. 11. (a) Primitive mantle-normalized average trace element plots, (b) chondrite-normalized average REE plots for the Jindong (●), Kyushu (▲), San'yo belt (▼), Sulu belt (■), Dexing (◆), average adakite (▶). Data from Kyushu adakite(Kamei, 2004), San'yo belt adakite(Kiji *et al.*, 2000), Sulu belt and Dexing(Guo *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2006).

화산호 암석 영역에 도시되는 것과 명확히 구분되어 진동화강암은 일본 서남내대의 큐슈 및 산요벨트 아다카이트(Kamei, 2004; Kiji *et al.*, 2000)와 더불어 아다카이트 범주와 그 경계부에 점시된다(Fig. 8). Xiong (2006)은 CIPW 노름 방법을 적용하여 Ca사장석-Na사장석-K장석 삼각도에서 아다카이트 영역을 구분하였는데, 일부 반려암을 제외한 진동화강암류는 아다카이트 범주에 해당하고, 주성원소를 및 미량원소를 이용한 아다카이트의 구분(Qian, 2003)에서 역시 진동화강암은 아다카이트 영역에 대체로 일치한다(Fig. 9). 아다카이

트는 일반적으로 고실리카 함량의 특징을 나타내는 것으로 연구되었으나, Martin 등(2005)은 생성 환경의 차이에서 기인하여 실리카 함량이 낮은 아다카이트에 대해 제안하고 HSA(High Silika Adakite)와 LSA(Low Silika Adakite)로 구분하였는데, 진동화강암류는 HSA 영역에 해당하는 것으로 나타났다(Fig. 10).

진동화강암의 미량원소 평균값을 일본 서남내대의 큐슈 및 산요벨트의 아다카이트(Kamei, 2004; Kiji *et al.*, 2000), 중국 동부의 수루(Sulu)벨트와 남부 텍싱(Dexing)의 아다카이트(Guo *et al.*, 2006; Wang *et*

al., 2006), 그리고 Condie(2005)가 정리한 아다카이트 평균값과 함께 원시맨틀값에 표준화한 거미그림에서 진동화강암은 발표된 아다카이트들과 미량원소의 함량 및 경향이 유사하게 나타나며, Nb의 두드러진 결핍과 같은 특징을 보인다(Fig. 11a). 또한 일본 큐슈의 아다카이트, 중국 수루벨트와 텍싱의 아다카이트 및 Condie가 정리한 아다카이트 평균값과 함께 콘드라이트값에 표준화한 희토류원소 패턴은 전형적인 아다카이트에 비해 중희토류원소가 약간 부화되어 중국 수루벨트의 아다카이트와 유사한 특징을 나타낸다(Fig. 11b).

4.2. 아다카이틱한 화강암류의 성인

아다카이틱한 암석을 생성하는 기원에 대한 연구는 섭입대에서의 슬랩 용융과 슬랩 용융 이외의 작용으로 구분된다. 아다카이트에 대해 최초로 정의한 Defant와 Drummond(1990)는 25Ma 이하의 젊고 열을 많이 포함한 해양지각이 섭입되는 근세의 수렴 경계에서 아다카이트가 생성된다고 제안하였으며, 이후 대안적인 기원 모델로 슬랩으로부터 파생되어 발생한 용융(Yogodzinski et al., 1995)이 포함되었고, 그 외에 25Ma 이상 오래된 해양 지각의 섭입 도입부의 용융(Sajona et al., 1993), 섭입으로 인한 충돌(Sajona et al., 2000), 섭입 모서리 천부(Gutscher et al., 2000)의 용융, 암류권 창의 입구에서 슬랩의 파열(Yogodzinski et al., 2001)을 추가하였다. 슬랩 용융 이외의 아다카이트 기원에 대한 연구는 두꺼운 하부지각 물질이 맨틀 쪽으로 파생되어 페리도타이트와 상호작용하여 발생한 부분 용융(Atherton and Petford, 1993), 현무암질 모 마그마로

부터 파생되어 맨틀 웨지에서의 변성교대(Castillo et al., 1999), 석류석이 안정한 잔여 상으로 존재하는 높은 압력에서 현무암의 용융 결과와 일치하는 염기성 하부지각으로부터의 용융(Xu et al., 2002), 맨틀 웨지에서 변성교대되어 파생된 순수 호의 현무암질이 하부지각에 정치된 후 높은 압력에 의한 분별 정출(Macpherson et al., 2006)로 아다카이틱한 암석의 기원을 설명하고 있다(Castillo, 2006).

아다카이틱한 진동화강암의 지화학적 분석 결과를 앞에서 언급한 선행연구들에 적용하여 생성 기원에 대해 고찰한 결과, 진동화강암체는 섭입 환경에서 젊은 해양지각을 포함한 슬랩의 용융과 연관된 것으로 사료된다. Drummond와 Defant(1990)는 아다카이트의 판별도로 사용되는 Sr/Y vs. Y 관계에서 근원 물질과 용융 성분을 달리하여 적용하였는데, 진동화강암은 중앙해령현무암(MORB)을 근원으로 에클로자이트나 석류석-각섬석 성분의 용융이 성인적으로 연관된 것으로 보이며(Fig. 12a), Zr/Sm vs. La/Sm 관계도(Drummond et al., 1996)에 진동화강암을 적용하면 에클로자이트 및 석류석-각섬석 용융이 약 30~50% 이루어진 마그마로부터 기원하였을 것으로 판단된다(Fig. 12b). 또한 아다카이트의 생성에 기여하는 일차적인 슬랩 용융은 맨틀 웨지에서 변화를 겪는 동안 지속되기 어려우므로 슬랩 용융 이후 맨틀 웨지에서의 변성교대 작용 또는 마그마 혼화 작용의 가능성에 대한 논의가 추가적으로 이루어져야 하는데, Sr 초생값과 Nb 결핍 등으로 표출되는 진동화강암의 미량원소 경향은 맨틀 웨지에서 상부 맨틀과의 작용을 시사하고 있다.

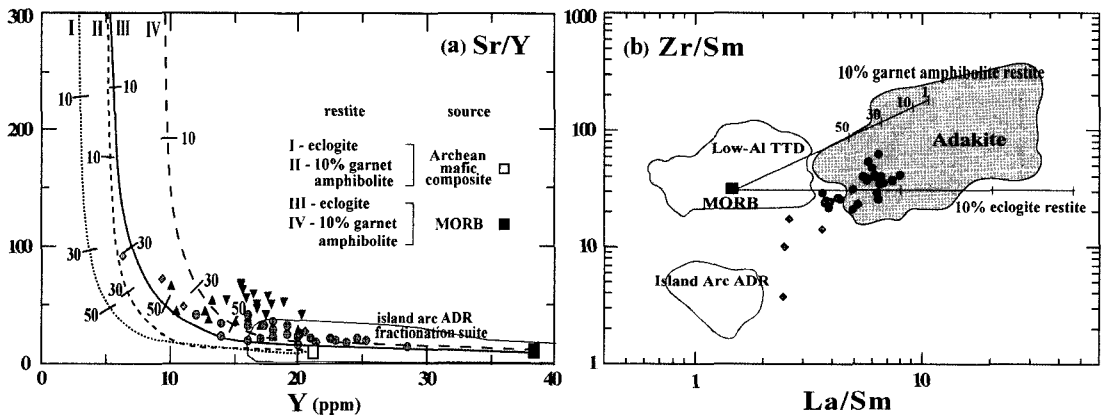


Fig. 12. (a) Sr/Y vs. Y diagram for the adakite relative to partial melt curves of MORB and Archean mafic composite sources leaving either eclogite (curves I and III) or 10% garnet amphibolite (curves II and IV) restite, (b) Zr/Sm vs. La/Sm diagram for the adakite, Island arc ADR and low-al TTD relative to partial melt curves of MORB leaving either a 10% garnet amphibolite (upper curve) or eclogite (lower curve) restite.

5. 결 론

진동화강암체에 대한 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소, Rb-Sr 동위원소 분석 결과로부터 유추한 진동화강암의 지화학적 특징 및 논의는 다음과 같다.

1. 진동화강암류는 비알칼리 영역 중 칼크-일칼리 계열에 속하고, 반려암에서 화강섬록암에 이르는 마그마 분화 단계를 보이며, 중알루미나 영역에 해당하는 I-형의 화강암류로 분류된다.

2. 지구조 판별도에 도시한 결과, 화산호 화강암(VAG) 및 동시충돌성 화강암(syn-COLG) 영역으로 구분되어 진동화강암체를 형성한 마그마의 관입은 중생대 백악기 이자나기판의 섭입과 관련된 대륙 주변 환경에서 일어났음을 보여준다.

3. 진동화강암의 Rb-Sr 전암연대는 114.6 ± 9.1 Ma로 진동화강암체의 관입 시기는 백악기 초기에 해당하며, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생값은 $0.70457 \pm 6(2s)$ 로 진동화강암체를 형성한 근원물질이 상부맨틀과 밀접한 연관이 있음을 지시한다.

4. 진동화강암류의 주성분원소 및 미량원소 함량 범위는 일본 서남내대에 분포하는 백악기 아다카이트질 화강암의 범주에 포함되고, 경상분지 내의 다른 백악기 화강암류와 구별되는 아다카이틱한 특징을 나타내며, 진동화강암체는 섭입 환경에서 젊은 해양지각을 포함한 슬랩의 용융과 연관하여 기원된 것으로 사료된다.

사 사

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

참고문헌

- Atherton, M. P. and Petford, N. (1993) Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, v. 362, p. 144-146.
- Castillo, P. R., Janney, P. E. and Solidum, R. U. (1999) Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 134, p. 33-51.
- Castillo, P. R. (2006) An overview of adakite petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, v. 51, p. 257-268.
- Cheong, C. S., Kwon, S. T., Kim, J. M. and Jang, B. W. (1998) Isotopic and geochemical compositions of Onjeongri granites in the northern Gyeongsang Basin. *Journal of Petrological Society of Korea*, v. 7, p. 77-97.
- Cheong, C. S., Kwon, S. T. and Sagong, H. (2002) Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic investigation of Triassic granitoids and basement rocks in the northern Gyeongsang basin, Korea: Implications for the young basement in the East Asian continental margin. *The Island Arc*, v. 11, p. 25-44.
- 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 Geology Reviews*, v. 26, p. 115-135.
- Choi, S. W. (1986) Genesis of copper deposits in Haman district. Ph. D. Thesis. Seoul National University. 116p.
- Condie, K. C. (1989) Plate tectonics and crustal evolution (3rd ed.). Pergamon Press, New York, 476p.
- 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 Kepezhinskis, P. K. (2001) Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS Transactions*, v. 82, p. 65-69.
- Drummond, M. S. and Defant, M. J. (1990) A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 21503-21521.
- Drummond, M. S., Defant, M. J. and Kepezhinskis, P. K. (1996) Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society Edinburgh: Earth Sciences*, v. 87, p. 205-215.
- Gutscher, M. A., Maury, R., Eissen, J. P. and Bourdon, E. (2000) Can slab melting be caused by flat subduction?. *Geological Society of America*, v. 28, p. 535-538.
- 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. *Geological Magazine*, v. 143, p. 1-13.
- Heo, C. H., Yun, S. T., Choi, S. H., Choi, S. G. and So, C. S. (2003) Copper mineralization in the Hana-Gunbuk area, Gyeongsangnamdo province: Fluid inclusion and stable isotope study. *Economic and Environmental Geology*, v. 36, p. 75-87.
- Hong, Y. K. (1987) Geochemical characteristics of Precambrian, Jurassic and Cretaceous granites in Korea. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 20, p. 35-60.
- Jin, M. S. (1980) Geology and Isotopic Contrasts of the Jurassic and the Cretaceous Granites in South Korea. *The Journal of the Geological Society of Korea*, v. 16, p. 205-215.
- Jwa, Y. J. and Park, J. M. (1996) Petrology of the igneous rocks in the Goseng area, Gyeongsang basin. Major element geochemistry and K-Ar radiometric age. *Economic and Environmental Geology*, v. 29, p. 561-573.
- Kagami, H., Iijumi, S., Tainosho, Y. and Owada, M. (1992)

- Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-Paleogene granitoid rocks, southwest Japan arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 112, p. 165-177.
- Kamei, A. (2004) An adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 24, p. 43-58.
- Kay, R. W. (1978) Aleutian magnesian andesites; melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 4, p. 117-132.
- Kiji, M., Ozawa, H. and Murata, M. (2000) Cretaceous adakitic Tamba granitoids in northern Kyoto, San'yo belt, southwest Japan. *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 29, p. 136-149.
- Kim, H. N. and Park, C. Y. (1995) Lithogeochemical and mineral chemistry features of granitoids and their relation to mineralization in the Namhae area. *Journal of Korean Earth Science Society*, v. 16, p. 522-535.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A. and Zanettin, B. A. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkaline-silica diagram. *Journal of Petrology*, v. 27, p. 745-750.
- Lee, J. D. (1987) Contact metamorphism on granitoids in the Chindong-Masan area, Gyeongsangnam-do. Ph. D. Thesis. Seoul National University. 115p.
- Lee, J. D. (1991) Petrological study on granitoids in Chindong-Masan area, Gyeongsangnam-do. *Journal of Korean Earth Science Society*, v. 12, p. 230-247.
- Lee, J. I. (1991) Petrology, Mineralogy and Isotopic Study of the Shallow-depth Emplaced Granitic Rocks, Southern Part of the Kyeongsang Basin, Korea -Origin of Micrographic Granite-. The Tokyo University, 231p.
- Lee, J. I. (1997) Trace and rare earth element geochemistry of granitic rocks, southern part of the Kyongsang Basin, Korea. *Geoscience Journal*, v. 1, p. 167-178.
- Lee, J. K. and Lee, J. Y. (1994) Trace element geochemistry and copper mineralization of Jindong granitic rocks. *The Journal of the Geological Society of Korea*, v. 30, p. 455-466.
- Lee, S. M., Kim, S. W. and Jin, M. S. (1987) Igneous activities of the Cretaceous to the Early Tertiary and their tectonic implications in south Korea. *Geology*, v. 23, p. 338-359.
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T. and Thirlwall, M. F. (2006) Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 243, p. 581-593.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D. (2005) An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, v. 79, p. 1-24.
- Nakajima, T. (1996) Cretaceous granitoids in SW Japan and their bearing on the crust-forming process in the eastern Eurasian margin. *Geological Society of America Special Papers*, v. 315, p. 183-191.
- Oh, C. W. (2006) A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories of the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Research: International Geoscience Journal*, v. 9, p. 47-61.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1984) Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 70, p. 373-382.
- Otofuji, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985) Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan arc. *Nature*, v. 317, p. 603-604.
- Park, H. I., Choi, S. W., Chang, H. W. and Chae, D. H. (1985) Copper mineralization of the Hamman-Gunbuk mining district, Kyeongnam area. *Journal of Korean Institute of Mining Geology*, v. 18, p. 107-124.
- Park, N. Y. and Chi, J. M. (1963) Explanatory text of the geological map of Chindongri-sheet. (1: 50,000). Geological Survey of Korea
- Park, S. K. (2004) Geochemistry of Gindong granites in Haman-Gunbuk district. Korea National University of Education, 41p.
- 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.
- Qian, Q., Chung, S. Lin., Lee, T. Y. and Wen, D. J. (2003) Mesozoic high-Ba-Sr granitoids from North China: geochemical characteristics and Geology implications. *Terra nova*, v. 15, p. 272-278.
- Rollinson, H. and Martin, H. (2005) Geodynamic controls on adakite, TTG and sanukitoid genesis: implications for models of crust formation-Introduction to the Special Issue. *Lithos*, v. 79, p. 9-12.
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Bellon, H. and Cotten, J. (1993) Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, v. 21, p. 1007-1010.
- Sajona, F. G., Maury, R. C., Pubellier, M., Leterrier, J., Bellon, H. and Cotten, J. (2000) Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, v. 54, p. 173-206.
- 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*. Geological Society Special Publication, v. 42, p. 313-345.
- 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. *Journal of Petrology*, v. 47, p. 119-144.
- Wee, S. M., Choi, S. G., Ryu, I. C., and Shin, H. J. (2006) Geochemical characteristics of the Cretaceous Jindong granites in the southwestern part of the Gyeongsang basin, Korea : Focussed on Adakitic signatures, Korea Society of Economic and Environmental Geology, v. 39, p. 555-566.
- Wilson, M. (1989) *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Xiong, X. L., Xia, B., Xu, J. F., Niu, H. C. and Xiao, W. S. (2006) Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle. *Chemical Geology*, v. 229, p. 273-292.
- Xu, J. -F., Shinjo, R., Defant, M. J., Wang, Q. and Rapp, R.

- P. (2002) Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust?. *Geological Society of America*, v. 30, p. 1111-1114.
- Yogodzinski, G. M., Kay, R. W., Volynets, O. N., Koloskov, A. V. and Kay, S. M. (1995) Magnesium andesite in the western Aleutian Komandorsky region. Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. *Geological Society of America Bulletin*, v. 107, p. 505-519.
- Yogodzinski, G. M., Lees, J. M., Churikova, T. G., Dorendorf, F., Wöerner, G. and Volynets, O. N. (2001) Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature*, v. 409, p. 500-504.

2006년 11월 3일 원고접수, 2007년 3월 14일 게재승인.