

영남육괴 남서부 북내지역에 분포하는 아다카이트질 화강암체의 성인 및 지화학적 특성

위수민^{1,*} · 박재용²

¹한국교육원대학교 지구과학교육과, 363-791, 충북 청원군 강내면 다락리 산 7

²평창중학교, 232-808, 강원도 평창군 평창읍 중리 350

Geochemistry and Petrogenesis of Adakitic Granitoids from Bognae Area in the Southwestern Part of the Yeongnam Massif, Korea

SooMeen Wee^{1,*} and Jae-Yong Park²

¹Department of Earth Sciences, Korea National University of Education, Chungbuk 636791, Korea

²Pyeong Chang Middle School, Gangwon 232-808, Korea

Abstract: Cretaceous intrusive and extrusive rocks in the southwestern part of the Yeongnam Massif are possibly the result of intensive magmatism which occurred in response to subduction of the Pacific plate beneath the northeast portion of the Eurasian plate. Geochemical and petrological study on the granitic rocks were carried out in order to constrain the petrogenesis of the granitic magma and to establish the paleotectonic environment of the area. Whole rock chemical data of the granitic rocks from the study area indicate that all the rocks have characteristics of calc-alkaline series in the subalkaline field. The overall geochemical features show systematic variations in each granitic body, but the source materials of each granitic body are thought to have been different in their chemical composition. The granodiorites distributed around Donggyori in the Bognae area (DGd) are different from other granitic rocks within the study area in the contents and differentiation trends of Al_2O_3 and MgO as well as in the contents of the trace elements such as Ba, Sr, Pb, Ni, Cr and Y. DGd have geochemical features similar to slab-derived adakites such as high Al_2O_3 , Sr contents and high Sr/Y, La/Yb ratios, but low Y and Yb contents. The major and trace element contents of the DGd fall well within the adakitic field, whereas other Cretaceous granites in the study area are plotted in the island arc ADR area in Sr/Y vs. Y diagram. On the ANK vs. A/CNK and tectonic discrimination diagrams, parental magma type of the granites corresponds to I-type and volcanic arc granite (VAG). Interpretations of the chemical characteristics of the granitic rocks favor their emplacement in a compressional tectonic regime at continental margin during the subduction of Pacific plate. The geochemical and tectonic features reveal that adakite-like signatures of the DGd were generated by the interaction of mantle peridotite and subducted slab-derived adakitic melts (caused by the thermal effect of ridge subduction), and which slightly modified by crustal contamination during emplacement.

Keywords: Adakite, Cretaceous granite, slab-derived melt, ridge subduction

요약: 영남육괴 남서부에 분포하는 백악기 화성암들은 태평양(Pacific)판의 섭입에 의해서 야기된 활발했던 백악기 화성활동의 산물이다. 암석학적 및 지화학적 접근을 통하여 이 지역에 분포하는 화강암류의 성인과 지구조환경을 유추하여 보았다. 연구지역의 화강암류는 칼크-알칼리(calc-alkaline)계열로, 분화에 따른 주성분원소와 미량원소의 변화 경향은 전반적으로 다른 지역의 백악기 화강암류의 분화 경향과 유사하게 나타나지만, 각 암체의 분화경향이나 화학조성을 살펴볼때 각 암체의 마그마 근원물질은 서로 다른 것으로 사료된다. 북내지역 동교리 부근에 분포하는 화강섬록암(DGd)은 연구지역 내에 분포하는 다른 화강암류와 비교하여 Al_2O_3 , MgO의 함량 및 분화에 따른 변화 경향이 다르게 나타나며, Ba, Sr, Pb, Ni, Cr, Y 등 미량원소의 함량에서 뚜렷한 차이를 보인다. 동교리화강섬록암(DGd)의 지화학적 특징은

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

Tel: 82-43-230-3741

Fax: 82-43-232-7176

높은 Al_2O_3 , Sr 함량과 높은 Sr/Y, La/Yb비를 가지며, 낮은 Y과 Yb함량과 같은 슬랩용융(slab-melting)으로 생성된 아다카이트에서 흔히 관찰되는 지화학적 특성을 나타낸다. 주성분 및 미량원소의 함량을 살펴보면 동교리화강섬록암은 아다카이트의 판별도로 가장 널리 이용되는 Sr/Y vs. Y 관계도에서 호상열도형ADR(Island Arc Andesite, Dacite, Rhyolite)영역에 도시되는 다른 백악기 화강암류들과 명확히 구분되어 아다카이트 영역에 잘 도시된다. ANK vs. A/CNK과 지구조판별도에서 화강암류의 모마그마는 I-type의 화산호화강암의 특성을 나타내며, 태평양판의 섭입에 의한 압축장응력이 작용하는 대륙연변부에서 생성된 것으로 해석된다. 지화학적특성 및 지구조적 환경을 종합하면 동교리화강섬록암의 아다카이트한 특성은 섭입슬랩의 용융(해령 섭입에 의한 열로 생성)에 의하여 생성된 마그마와 맨틀 페리도타이트와의 상호작용 그리고 상승하는 동안 지각물질과의 동화작용 등 복합적인 과정을 겪었을 것으로 추정된다.

주요어: 아다카이트, 백악기화강암, 슬랩멜팅, 해령섭입

서론

한반도 남부와 일본의 서남내대는 태평양(Pacific) 판의 섭입과 밀접한 관련이 있는 화성활동의 영향으로 화강암류와 이들과 서로 성인적으로 밀접한 연관성을 가지고 있을 것으로 추정되는 안산암질 및 유문암질의 화산암류가 광범위하게 분포하고 있다(이상만 외, 1987; 위수민 외, 2006; Kagami et al., 1992; Nakajima, 1996; Cheong et al., 2002; Choi et al., 2005). 한반도에 분포하는 백악기에서 제3기초에 걸쳐 관입한 화강암류들은 경상분지 내에 주로 분포하며, 일부는 옥천대 및 남부 해안을 따라 소규모의 관입암체로 산재하여 나타난다. 영남육괴 내에서도 이 시기의 심성암류가 화산암류와 밀접한 시공간적 관계를 나타내며 암주상으로 분포되어 있으며, 암상은 반려암질암, 섬록암, 석영섬록암, 화강섬록암, 흑운모화강암 및 알칼리장석 화강암 등으로 나타난다(진명식 외, 2005).

본 연구지역은 영남육괴 지리산지구의 서남단에 위치한 복내, 벌교, 고흥지역이며 복내 지역에 대한 조사 과정에서 복내면 동교리 부근에 분포하는 화강섬록암(DGd)과 인근에 위치한 천마산 부근의 화강섬록암(CGd) 사이에 뚜렷한 지화학적 차이가 발견되었고, 동교리 부근에 분포하는 화강섬록암은 아다카이트(adakite)와 유사한 지화학적 특징을 나타내며 일본 서남부 화강암질암의 특징(Kiji et al., 2000; Kamei, 2004)과 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서는 복내 지역 백악기 화강섬록암류의 지화학적 특성을 규명하고 그 결과를 기 연구된 진동지역의 심성암류를 비롯하여 주변 지역의 심성암류 및 일본 서남부 큐슈(Kyushu) 지역의 시라시노(Shiraishino) 화강섬록암, 산요벨트(San'yo belt)의 탐바(Tamba) 화강암과 비교함으로써 영남육괴 남서부 지역의 심성암류를 형성시

킨 마그마의 특성과 성인의 차이 및 지구조적 환경을 고찰하고자 한다.

일반지질

본 연구지역은 영남육괴 지리산지구의 서남대와 경상계 퇴적분지가 접하는 최남단 지역으로, 선캠브리아기의 지리산편마암복합체에 속하는 화강암질편마암을 기저로 이를 부정합으로 덮는 경상계 퇴적암류와 화산암류 그리고 이들을 관입하는 백악기말의 심성암류로 구성되어 있다(김정빈과 박영석, 1996; 박영석 외, 1997)(Fig. 1). 복내면 동교리 부근의 화강섬록암은 주암호를 경계로 북동에서 남서방향으로 천마산 부근의 화강섬록암과 마주하며, 흑운모화강암에 의해 부분적으로 둘러싸여 있다. 흑운모화강암은 동교리 부근의 화강섬록암의 서쪽에 치우쳐 비교적 소규모로 나타나며 대부분 화강섬록암과 접하고 있다. 지리산편마암복합체는 주로 반상 변정질 편마암, 화강암질 편마암, 호상편마암과 미그마타이트질 편마암으로 구성된다(김정빈 외, 1990).

복내: 본 지역의 지질은 선캠브리아기의 편마암류 그리고 변성퇴적암류와 이를 부정합으로 피복하는 퇴적층 그리고 이들을 관입한 화성암류와 소규모의 용암류, 응회암 등으로 구성된다(이상만과 김형식, 1966). 용암류와 유문암 및 응회암은 복내지역의 서부에 치우쳐 비교적 소규모로 분포하고 있다. 화강섬록암은 본 지역의 중앙부인 천마산과 동교리 부근에 분포되어 있으며, 반상변정편마암 또는 반상변정능늑니석편마암을 관입하고 있다. 전체적으로 북동에서 남서 방향으로 길게 연장된 분포 형태를 보여주며, 그 주변을 따라 소규모의 관입암체도 존재한다. 암주상으로 분포하는 화강섬록암은 인공호인 주암호를 경계로 북동

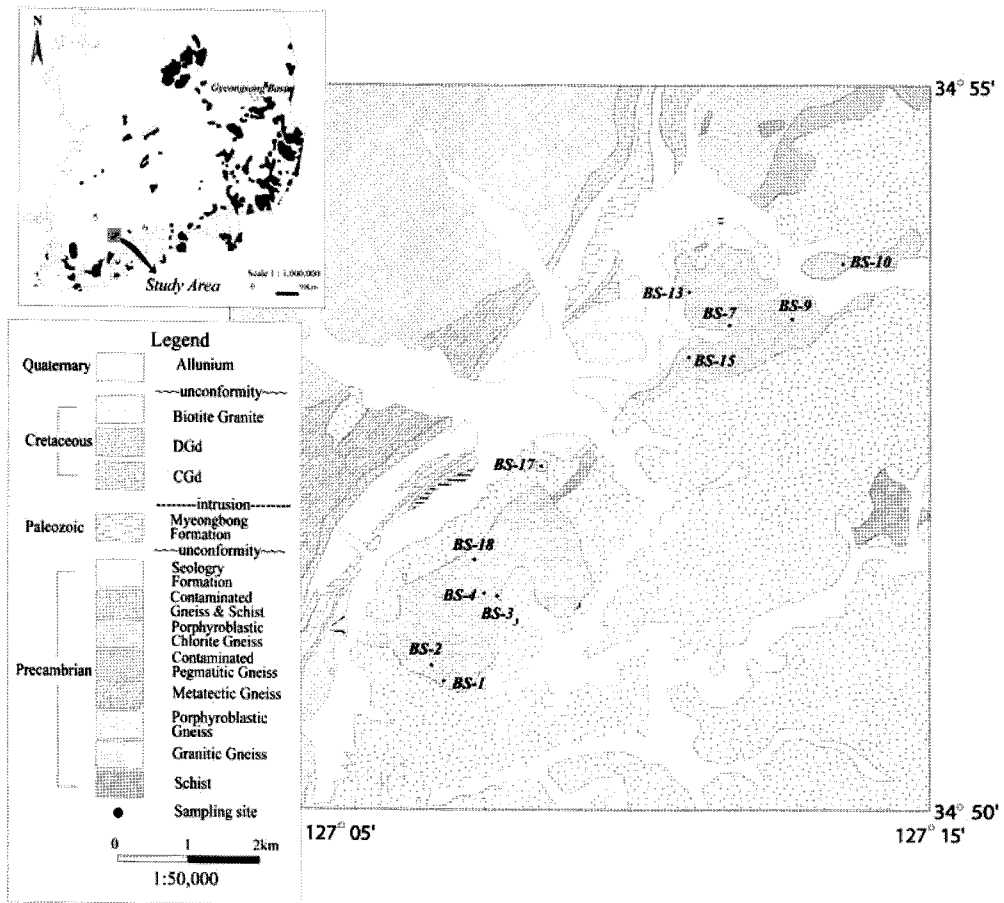


Fig. 1. Geological map of Bognae area (after Lee and Kim, 1966) and sampling locations. In the inset diagram shows the tectonic provinces of southern part of the Korean peninsula and distribution of the Cretaceous granites.

에서 남서 방향으로 마주하는 동교리화강섬록암체 (DGd)와 천마산화강섬록암체(CGd)로 구분하였다.

화강섬록암의 주구성광물은 사장석, 정장석, 석영, 흑운모, 각섬석 등이며, 부구성광물로 녹니석, 녹렴석, 인회석 및 불투명광물 등이 관찰된다. 사장석은 누대 구조가 관찰되며, 대부분의 사장석들이 견운모화 (sericitization)되어 나타난다. 일부 알칼리장석은 미분 상 조직을 보이며, 사장석, 각섬석, 흑운모가 포획된 포이킬리틱 조직을 보이기도 한다. 각섬석은 자형에서 타형까지 다양한 형태로 나타나며, 입자의 크기도 매우 불규칙하다.

별교: 본 지역의 지질은 지리산편마암복합체에 속하는 저반상의 반상변정질편마암을 기반으로 이를 관입하는 암주상의 반려암, 안산암, 흑운모화강암 그리고 이들 모두를 관입하는 맥상의 반화강암으로 구성

되어 있다(김정빈과 박영석, 1996). 흑운모화강암은 회정리와 언산리 일대에 남북으로 길게 관입, 분포하고 있으며, 흑운모화강암의 K-Ar 절대연령은 75.4 ± 1.5 Ma로 백악기 말기에 해당한다(Turek and Kim, 1996). 흑운모화강암은 미립 내지 중립으로서 현미경 하에서 주로 석영, 장석, 각섬석, 녹니석화된 흑운모 등이 관찰되며, 사장석보다 정장석의 함량이 많다. 사장석은 주로 알바이트, 알바이트-칼스바드 쌍정을 보이며 정장석은 퍼사이트 구조를 가지며, 부성분광물로는 각섬석, 스피넬, 인회석, 녹렴석, 불투명광물 등이 관찰된다.

고흥: 본 역의 지질은 선캠브리아기의 지리산편마암복합체에 속하는 화강암질편마암을 기반암으로 이를 부정합으로 덮은 유천층군에 대비될 것으로 사료되는 퇴적암류와 화산암류 그리고 이들을 관입하는

백악기말의 섬록암, 흑운모화강암과 그레노파이어로 구성된다(박영석 외, 1997). 섬록암은 장축 2 km 이내로 소규모의 암주상 또는 암맥상의 관입암체로 분포하며 안산암과 화강암질편마암을 관입하며, K-Ar 절대연대는 70.1 ± 1.9 Ma로 백악기 말기에 해당한다. 섬록암의 주구성광물은 사장석, 각섬석, 흑운모 및 석영이고, 부성분광물은 불투명광물, 저어콘과 인회석으로 구성된다(박영석 외, 1997). 흑운모화강암은 포두면과 점암면에 암주상의 관입체로 분포하며, 전암에 대한 K-Ar 절대연대는 67.0 ± 0.9 Ma이다(박영석 외, 1997). 흑운모화강암은 그레노파이어와 점이적이고 주구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 녹니석화된 각섬석과 흑운모이며, 부성분광물로는 녹렴석, 저어콘, 인회석과 불투명광물 등이 관찰된다.

암석화학

본 연구지역의 백악기 심성암류에 대한 암석화학적 특성을 밝히기 위하여 야외조사를 실시하였으며, 보다 정확한 화학성분 데이터를 얻기 위해서 가능한 변질 받지 않은 신선한 시료를 채취하였다. 복내 지역에서 11개의 시료에 대해 캐나다 소재 Activation Lab.에 화학분석을 의뢰하였다. 주성분원소와 일부 미량원소(Ba, Sr, Y, Sc, Zr, Be, V)는 X선 형광분석기(XRF)를, 나머지 미량원소 및 희토류원소는 유도 결합 질량분석기(ICP-MS)를 사용하여 분석하였다. 분석오차를 살펴보기 위해 국제 표준시료(JG-1a, JG-2, JR-2 및 JA-2)를 함께 분석한 결과, 주성분원소의 분석오차는 5% 미만, Tb, Tm, Lu은 10% 미만, 이들을 제외한 대부분의 미량원소와 희토류원소의 오차는 5% 미만으로 나타났다.

복내지역에 분포하는 백악기 심성암류와 지화학적 특성을 비교하기 위해 기 발표된 지화학적 자료들을 인용하였으며(고흥: 김정빈과 박영석, 1996; 벌교: 박영석 외, 1997; 복내: 위수민 외, 2005), 이들 자료에 기초하여 연구지역 내 심성암류의 지화학적 특성을 논의하였다.

주성분원소(Major elements)

연구지역에 분포하는 백악기 심성암류에 대한 CIPW 노움값을 석영-정장석-사장석의 삼각도에 도시해보면 동교리화강섬록암체(DGd)는 석영몬조니암과 석영몬조섬록암으로, 천마산화강섬록암체(CGd)는 화강암과

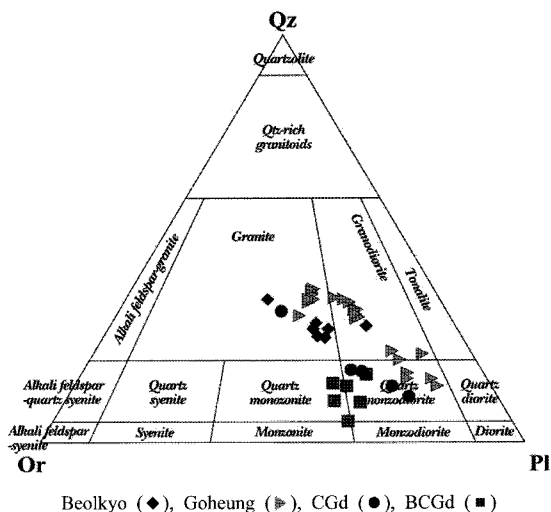


Fig. 2. Triangular diagram of normative Quartz-Orthoclase-Plagioclase of the Cretaceous plutonic rocks from the study area (after Streckeisen, 1976).

석영몬조섬록암으로, 벌교지역의 흑운모화강암은 화강암과 화강섬록암으로, 고흥지역의 섬록암은 화강섬록암과 석영몬조섬록암으로, 흑운모화강암은 화강섬록암으로 각각 분류된다(Fig. 2).

SiO₂ 함량은 복내지역의 천마산화강섬록암이 54.3-69.6 wt.%, 동교리화강섬록암이 56-61.5 wt.%, 벌교지역의 흑운모화강암이 66.8-73.7 wt.%, 고흥지역의 섬록암이 56.7-62.5 wt.%, 흑운모화강암이 71-72.4 wt.%의 범위를 보인다. SiO₂ 함량에 대한 각 산화물의 변화 경향을 하커(Harker)의 성분 변화도를 통해 살펴보면 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 TiO₂, FeO, MnO, MgO, CaO, P₂O₅는 감소하는 경향을 보이며, K₂O와 Na₂O는 전반적으로 증가하는 추세이나 지역별로 넓게 분산되어 있어 변화 경향이 뚜렷하지 않다(Fig. 3). 동교리화강섬록암의 경우 Al₂O₃ 함량 변화에서 연구지역 내 다른 백악기 심성암류와 차이를 보인다. 연구지역 내 심성암류의 분화에 따른 성분 변화 곡선의 기울기와 동일한 SiO₂ 함량 범위 내에서 나타나는 지역별 주성분원소의 함량 차이는 이들 심성암류가 동일 기원의 마그마로부터 생성된 것이 아닐 가능성을 시사한다.

미량원소(Trace elements)

연구지역에 분포하는 심성암류에 대한 미량원소의 화학분석 결과를 Jin(1988)에 의한 남한의 백악기-제

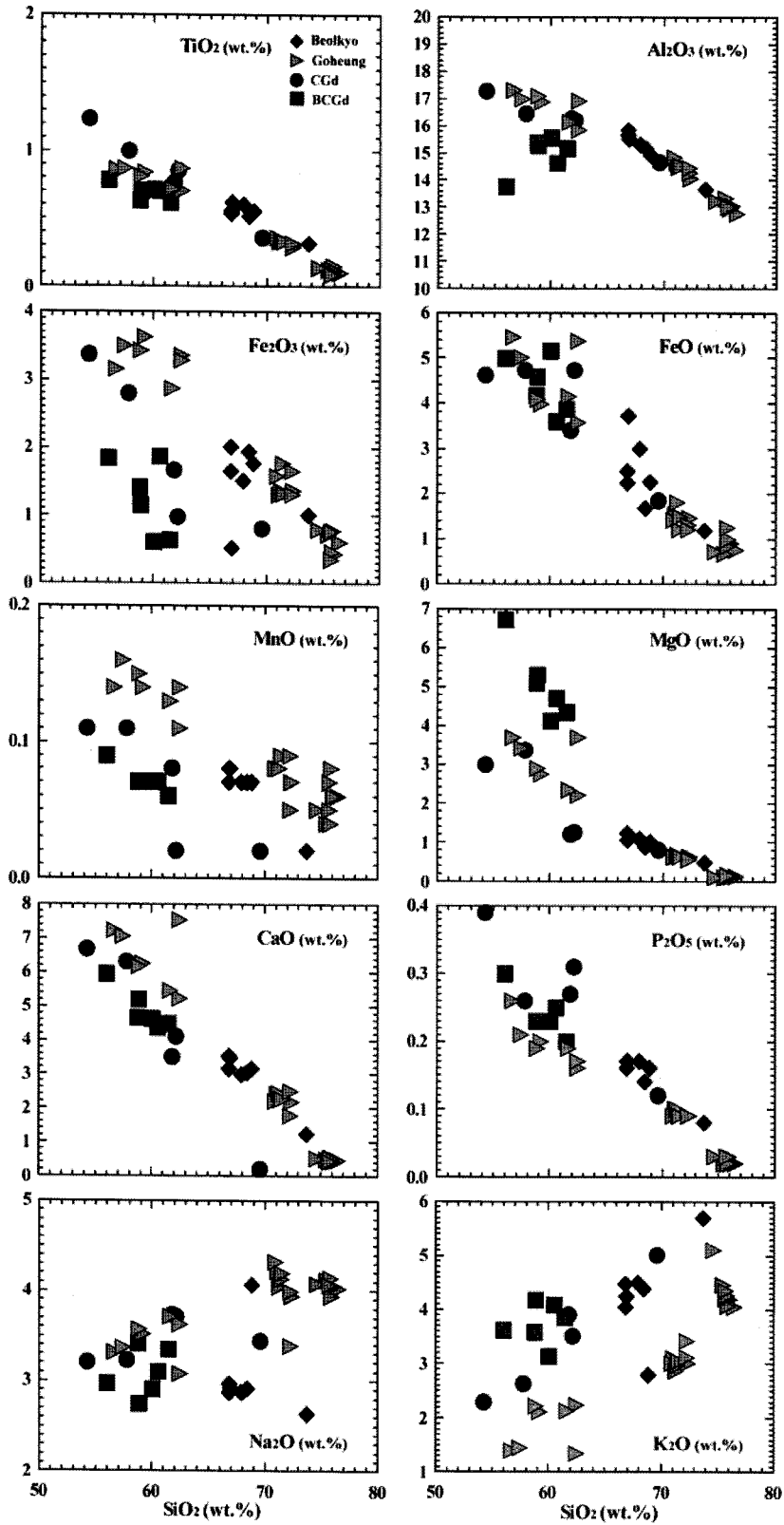


Fig. 3. Harker variation diagrams showing the major element variations of the plutonic rocks in the study area.

Table 1. The comparison of the average trace element contents between the plutonic rocks in the study area and the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in the southern Korea (unit in ppm). Data are compiled from Kim and Park (1996; Beolkyo), Park et al. (1997; Goheung) and Wee et al. (2005; CGd and BCGd)

Section	Element	KCT*	Beolkyo	Goheung	CGd	BCGd
Lithophile Element	Ba	587.56	815.29	646.48	841.60	1306.67
	Rb	124.12	-	106.13	138.20	141.67
	Sr	271.04	233.43	219.04	412.60	775.50
Chalcophile Element	Cu	15.41	17.86	593.48	13.00	45.00
	Zn	63.29	53.43	106.35	84.50	67.00
Ferro-magnesian Element	Co	6.39	12.00	14.57	11.20	20.00
	V	54.15	59.00	59.26	81.80	74.00
	Sc	8.29	9.57	10.39	13.00	13.83
High Field Strength Element	Ni	8.55	15.00	20.00	46.00	84.00
	Cr	17.52	12.86	13.61	31.50	247.00
	Nb	11.93	9.71	8.17	16.62	11.60
	Y	30.19	37.71	26.04	30.84	17.98
	Zr	160.23	25.71	46.13	256.80	232.67

KCT*: Average of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in the southern Korea (Jin, 1988)

3기 화강암류의 평균 함량과 비교하였다(Table 1). 분화에 따른 미량원소의 함량 변화는 주성분원소와 달리 별교와 고흥지역의 심성암류와 복내지역의 화강섬록암으로 뚜렷이 구분되며, 복내지역의 화강섬록암은 일부 원소들에서 동교리화강섬록암과 천마산화강섬록암 사이에 뚜렷한 차이를 보여준다(Fig. 4).

별교와 고흥지역의 심성암들은 마그마의 분화가 진행될수록 Ba, Rb, Zr의 함량이 증가하는 반면 Sr, Co, V, Sc, Ni, Cr의 함량은 감소하는 경향을 보여주며, 이들을 제외한 다른 원소들의 함량은 분산 정도가 심해 특별한 변화 경향을 나타내지 않는다. 동교리화강섬록암은 천마산화강섬록암보다 Ba, Sr, Cu, Co, Ni, Cr의 함량에서 훨씬 더 부화된 값을 보여주며, Y의 함량은 결핍되어 나타난다. 암석 내에 존재하는 미량원소의 함량을 초생맨틀(primitive mantle: Sun and McDonough, 1989)로 표준화한 거미그림(spider diagram)에서와 같이 함수유체(aqueous fluids)에서 유동성이 높은 원소들(Ba, Rb, Sr)은 부화되어 나타나는 반면, 유동성이 낮은 원소들(Nb, Zr, Y)은 결핍된 양상을 보여준다(Fig. 5b). 또한 대부분의 원소들에서 복내지역의 화강섬록암이 별교와 고흥지역의 심성암류에 비해 부화되어 나타나며, 복내지역의 동교리화강섬록암은 연구 지역 내 다른 백악기 심성암류와는 달리 음(-)의 Sr 이상을 보이지 않는다.

Sr의 평균 함량은 별교 233.4 ppm, 고흥 219 ppm, 천마산화강섬록암 412.6 ppm, 동교리화강섬록암 775.5

ppm으로, 특히 동교리화강섬록암은 남한의 백악기-제3기 화강암류의 평균 함량(271 ppm)보다 두 배 이상 부화된 값을 보인다. 연구지역 대부분 암석의 Y 평균 함량은 별교 37.7 ppm, 고흥 26.0 ppm, 천마산화강섬록암 30.8 ppm로 남한의 백악기-제3기 화강암류의 평균 함량(30.2 ppm)과 유사하나 동교리화강섬록암은 18 ppm으로 결핍된 값이 나타난다. 마그마의 분화에 따른 Y 함량의 변화는 불규칙한 거동을 보이며 동교리화강섬록암에서 Y의 함량의 범위는 14.5-22.4 ppm으로 연구지역 내 심성암류 중 가장 적은 값을 보인다.

희토류원소(Rare Earth Elements)

콘드라이트로 표준화하여(Sun and McDonough, 1989) 나타낸 희토류원소의 함량 패턴(Fig. 5a)은 연구지역의 심성암류 모두 경희토류원소(LREE)가 중희토류원소(HREE)에 비해 부화되어 나타나며($(La/Lu)_{CN} = 5.0-33.2$), 복내지역의 심성암류는 다른 지역의 심성암류에 비해 경희토류원소가 더 부화되어 나타나지만, 전반적으로 연구지역의 심성암류는 남한에 분포하는 백악기 화강암질암의 전형적인 패턴에 속한다. 동교리화강섬록암은 연구지역의 다른 심성암류와는 달리 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 $(La/Lu)_{CN}$ 의 비가 급격히 증가하는 모습을 보여 다른 지역의 심성암류와 뚜렷이 대비되며, 마그마의 분화와 함께 경희토류원소가 상당히 부화되었음을 알 수 있다.

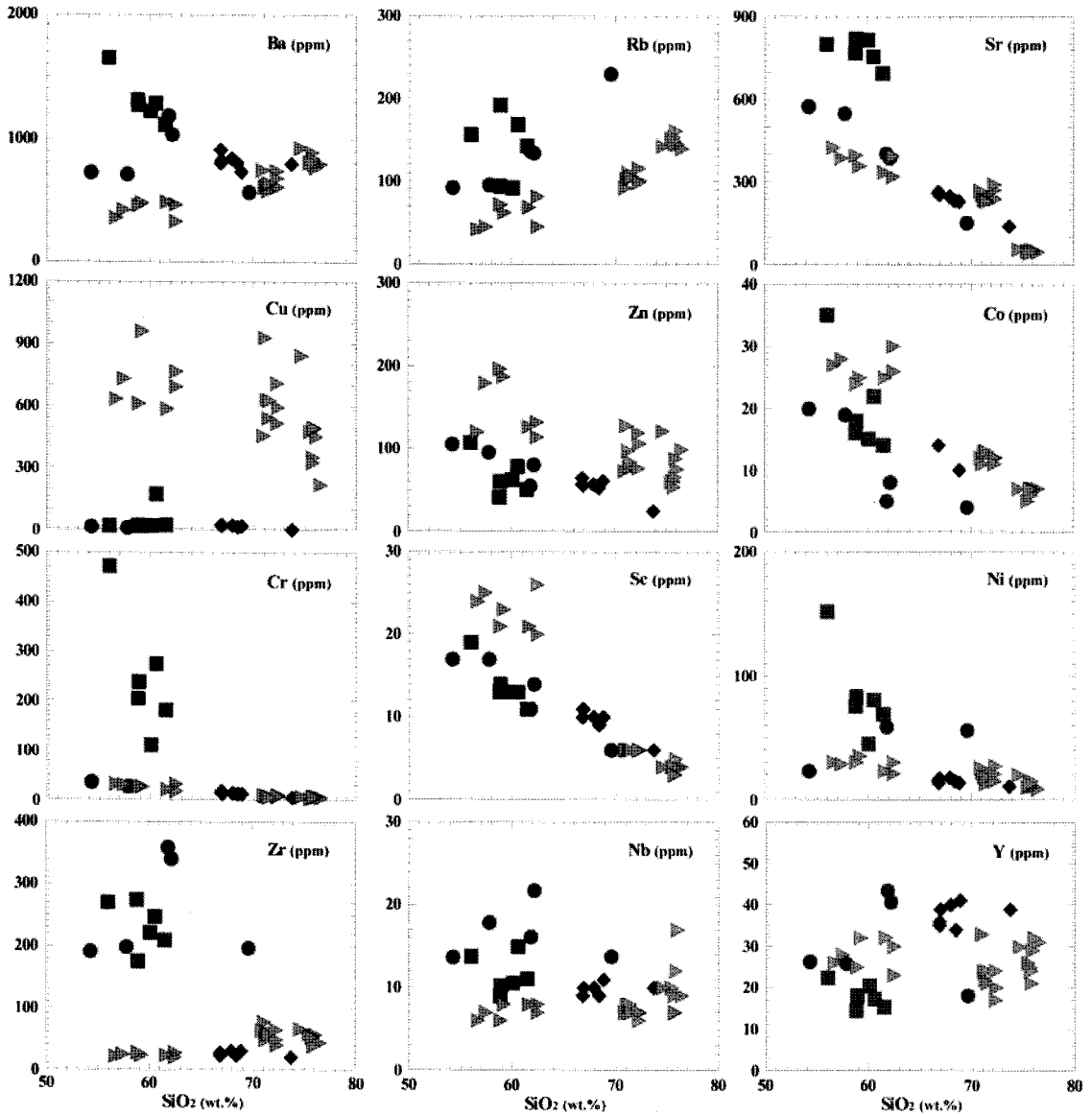


Fig. 4. Trace elements variation diagrams of the intrusive rocks. Symbols are the same as in Fig. 2.

동교리화강섬록암은 연구지역 내 다른 백악기 심성암류와는 달리 거미그림에서 음(-)의 Sr 이상이 나타나지 않고, 희토류원소의 함량 패턴에서도 음(-)의 Eu 이상($Eu/Sm=0.20-0.24$)이 아주 미약하거나 보이지 않는 것으로 미루어 사장석의 분별정출이 많지 않았음을 시사한다.

지화학적 특성

마그마의 유형 및 특성

연구지역의 심성암류를 형성시킨 마그마의 근원 물

질 및 특성을 알아보기 위해 A/NK vs. A/CNK (Maniar and Piccoli, 1989)에 도시한 결과, 대부분의 암체들은 A/CNK의 물값이 1.1보다 작은 I-type으로 나타나며 중알루미나(metaluminous)에서 고알루미나(peraluminous)의 마그마 특성을 나타낸다(Fig. 6). AFM도에 도시한 결과(본문에는 생략함) 고흡, 별교 및 천마산화강섬록암은 전반적으로 칼크-알칼리 마그마 분화의 특징을 나타내지만 동교리화강섬록암은 다른 심성암류의 분화 경로와 뚜렷한 차이를 보여 이들 심성암류를 형성시킨 마그마의 특성이 동일하지

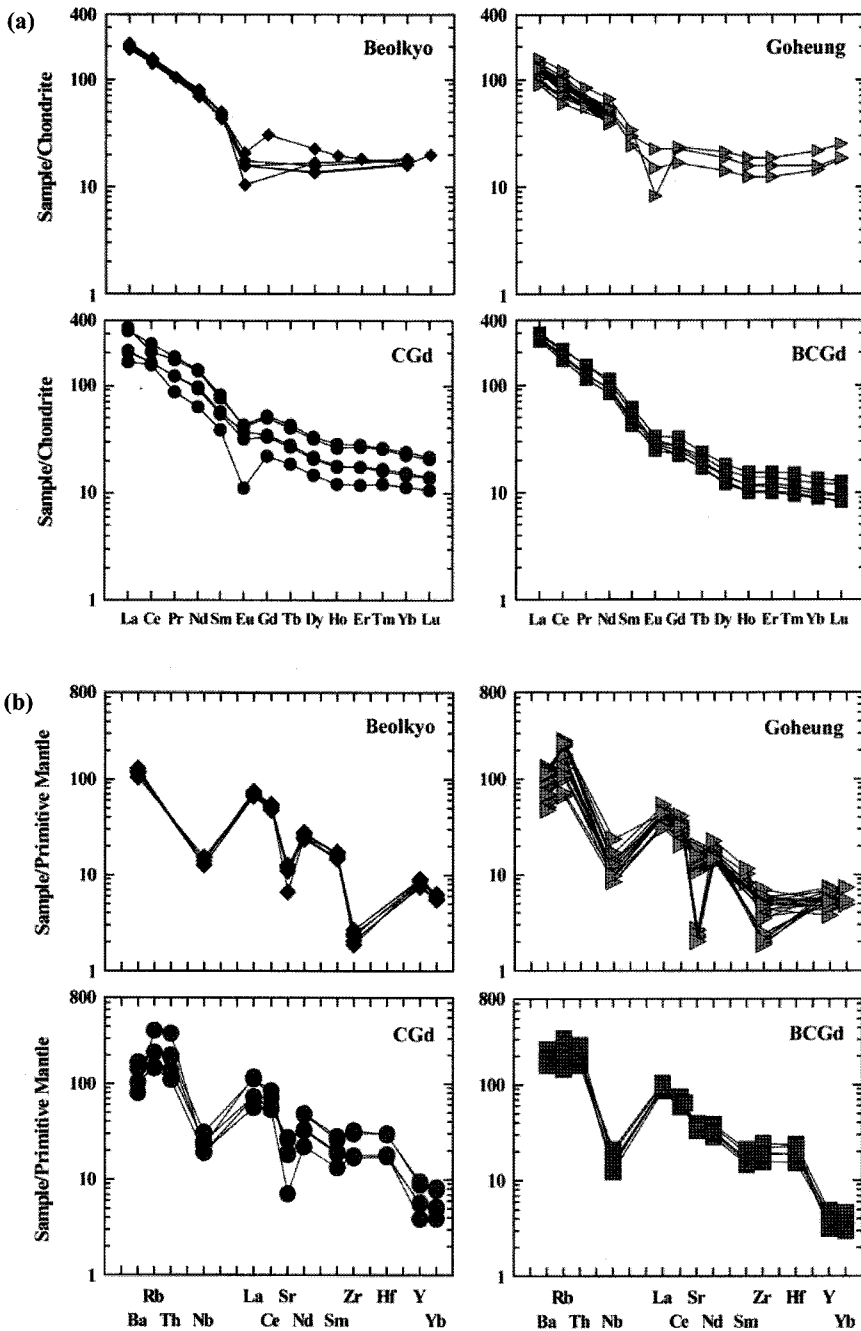


Fig. 5. (a) Chondrite-normalized REE patterns for whole rock samples from the plutonic rocks in the study area. Normalization factors after Sun and McDonough (1989). Symbols are the same as in Fig. 2. (b) Primitive mantle-normalized trace element concentration patterns for whole rock samples from the plutonic rocks in the study area. Normalization factors after Sun and McDonough (1989). Symbols are the same as in Fig. 2.

않았음을 시사한다. 연구지역 내 모든 심성암류에서 나타나는 Nb의 뚜렷한 음(-)의 이상(Fig. 5b)은 이들 심성암류들이 섭입과 관련된 마그마 활동에 의해 형

성되었음을 시사하며(McCulloch and Gamble, 1991), 희토류원소의 총합량과 $(La/Lu)_{CN}$ 으로 나타낸 경희토류원소에 대한 중희토류원소의 비의 범위는 각각

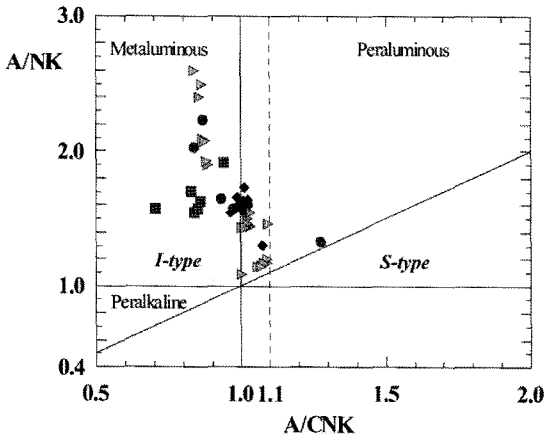


Fig. 6. Molar A/NK[Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)] vs. A/CNK[Al₂O₃/(Na₂O+K₂O+CaO)] variation diagram (after Maniar and Piccoli, 1989) of the plutonic rocks in the study area. Symbols are the same as in Fig. 2.

118.1-354.7 ppm, 5.9-30.5로 대부분의 암체들이 대륙 또는 대륙 연변부에서 형성된 심성암류에 해당된다 (Culler and Graf, 1984).

지구조적 환경

암석 내에 존재하는 Rb과 Sr의 함량 관계에 기초하여 지각 두께를 추정하는 Condie(1973)의 방법에 의한 연구지역의 고지각의 두께는 약 30 km 내외로, 북내지역의 동교리 부근에서 가장 두껍게 나타난다. 이는 남한의 백악기에서 제3기초의 화강암류를 이용하여 고지각의 두께를 추론한 진명식(1985)과 이상만

외(1987)의 결과와도 일치한다.

연구지역의 심성암류를 형성한 마그마의 생성 환경을 알아보기 위해 Rb vs. Y+Nb와 Y vs. Nb의 지구조 판별도(Fig. 7)에 도시한 결과 각각 화산호(VAG) 영역과 대륙의 동시 충돌형+화산호(syn-COLG+VAG) 영역에 나타난다. 미량원소에 의한 암석화학적 특성과 종합해 볼 때, 연구지역의 심성암류는 백악기 유라시아 대륙판 주변부에서의 태평양판의 섭입에 따른 마그마 활동과 관련되어 있음을 시사한다.

동교리화강섬록암(DGd)의 아다카이트 기능성에 대한 논의

아다카이트의 정의 및 여러 성인 모델들

아다카이트(adakite)란 섭입하는 해양지각의 부분용융에 의해 만들어진 독특한 지화학적 특성을 가진 안산암질, 석영안산암질, 유문암질 암석을 일컫는 말로, 알류산 호(Aleutian arc)의 아닥 섬(Adak island)에 분포하는 안산암질 암석들에 대한 연구에서 슬랩 멜팅(slab melting) 시나리오를 처음 생각했던 Kay (1978)의 용어를 따라 Defant and Drummond(1990)가 사용하였다. 현재 아다카이트는 그에 대한 여러 성인 모델들과 관련하여 용어 정의의 범위가 넓어지고 있으며, 전형적인 칼크-알칼리 화강암질암에 비하여 보다 높은 Sr 함량과 낮은 Y의 함량의 지화학적 특성을 가지고 있으며, 각섬석안산암에서 석영안산암과 유문암까지의 조성 범위를 갖는 중성에서 산성에

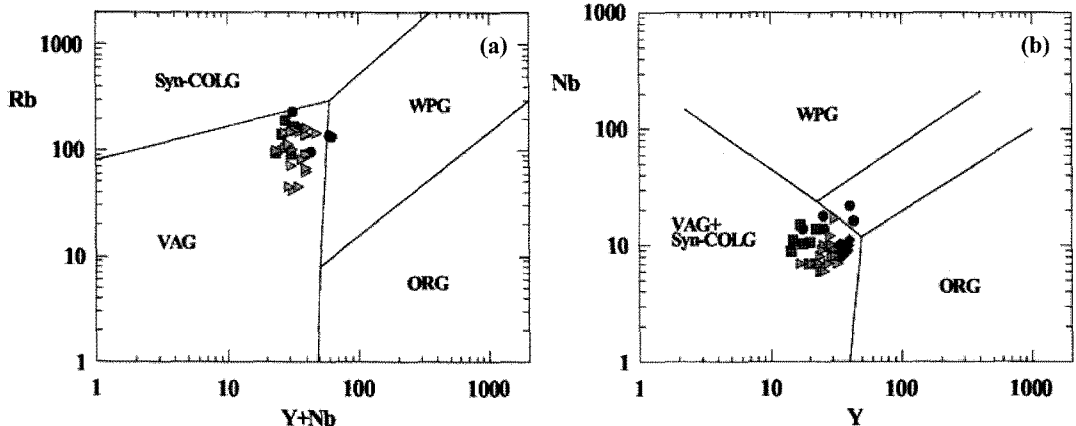


Fig. 7. (a) Rb vs. Y+Nb discrimination diagram (after Pearce et al., 1984; F'rster et al., 1997) of the plutonic rocks in the study area. Symbols are the same as in Fig. 2; Syn-Colg: Syn-Collision granites, VAG: Volcanic Arc Granites, WPG: Within Plate Granites, ORG: Ocean Ridge Granites. (b) Nb vs. Y discrimination diagram (after Pearce et al., 1984) of the plutonic rocks in the study area. Symbols are the same as in Fig. 2.

Table 2. Rare earth element (unit in ppm) data of the plutonic rocks in the study area. Data are compiled from Kim and Park (1996; Beolkyo), Park et al. (1997; Goheung) and Wee et al. (2005; CGd and BCGd)

Area		Beolkyo						Goheung							
Rock Type		Biotite granite						Granophyre							
Sample No.	B1	B2	B5	B6	B7	JS13	JS16	KC-1	KC-3	KC-5	KC-6	KC-7	KC-8	KC-9	KC-10
La	46.9	51	46	45	47	49	48	30	33	30	36.57	31	31	30	28
Ce	90.2	96	85	85	87	93	94	56	64	56	73.39	61	59	58	55
Pr	9.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.99	-	-	-	-
Nd	37.7	37	34	32	33	36	34	21	23	21	30.7	22	21	20	18
Sm	7.1	7.5	6.7	6.5	6.7	7.6	7.7	-	-	-	5.18	-	-	-	-
Eu	1.2	1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	-	-	-	0.48	-	-	-	-
Gd	6.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.79	-	-	-	-
Tb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dy	5.7	4	3.4	3.4	3.5	4.2	4.2	-	-	-	5.35	-	-	-	-
Ho	1.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.05	-	-	-	-
Er	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.09	-	-	-	-
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	2.8	3	2.7	2.7	2.8	3.1	3	-	-	-	3.63	-	-	-	-
Lu	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.64	-	-	-	-
(La/Lu) _{CN}	10.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.12	-	-	-	-
(La/Yb) _{CN}	12.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7.23	-	-	-	-
Eu/Sm	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.09	-	-	-	-
ΣREE	212.20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	172.86	-	-	-	-

Area		Goheung													
Rock Type		Biotite granite						Diorite							
Sample No.	KC-11	KC-12	KC-13	KC-14	KC-16	KC-18	KC-24	KC-26	KC-45	KC-46	KC-47	KC-48	KC-49	KC-50	KC-51
La	30	30	30.48	29	31	29	28	22	31	24	24	21.73	21	28	29
Ce	49	47	56.98	49	54	49	46	41	55	41	41	45.32	36	51	52
Pr	-	-	6.03	-	-	-	-	-	-	-	-	5.32	-	-	-
Nd	19	19	23.7	19	20	18	18	23	26	21	22	24	19	24	25
Sm	-	-	3.68	-	-	-	-	-	-	-	-	4.53	-	-	-
Eu	-	-	0.86	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3	-	-	-
Gd	-	-	3.41	-	-	-	-	-	-	-	-	4.59	-	-	-
Tb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dy	-	-	3.56	-	-	-	-	-	-	-	-	4.73	-	-	-
Ho	-	-	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.89	-	-	-
Er	-	-	2.03	-	-	-	-	-	-	-	-	2.59	-	-	-
Tm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yb	-	-	2.43	-	-	-	-	-	-	-	-	2.66	-	-	-
Lu	-	-	0.46	-	-	-	-	-	-	-	-	0.47	-	-	-
(La/Lu) _{CN}	-	-	7.10	-	-	-	-	-	-	-	-	4.96	-	-	-
(La/Yb) _{CN}	-	-	9.00	-	-	-	-	-	-	-	-	5.86	-	-	-
Eu/Sm	-	-	0.23	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	-	-	-
ΣREE	-	-	134.32	-	-	-	-	-	-	-	-	118.13	-	-	-

이르는 암체를 형성하며, 이들 암석에서 반정들은 주로 누대 사장석, 각섬석, 흑운모이고 사방휘석과 단사회석 반정들은 단지 염기성 안산암에서 나타난다고 보고되고 있다(Kay, 1978; Drummond et al., 1996; Martin, 1999; Calmus et al., 2003).

아다카이트 또는 아다카이틱한 암석들의 성인을 설명하기 위하여 지금까지 여러 성인 모델들이 제안되었으나 본 연구에서는 (1)섭입하는 해양 슬랩의 부분 용융(partial melting of a subducting oceanic slab), (2)현무암질 모마그마의 지각 동화 및 분별결정작용

Table 2. Continued

Area		Boseong									
Rock Type		CGd					BCGd				
Sample No.	BS1	BS2	BS3	BS4	BS18	BS7	BS9	BS10	BS13	BS15	BS17
La	50.2	38.9	77.1	80.9	48.8	71.6	65.1	62.6	62.9	67.9	59.7
Ce	100	95.6	149	126	99	131	116	113	111	128	104
Pr	11.7	8.18	17.7	16.4	11.7	14.3	11.8	11.6	11.7	14.5	10.6
Nd	43.3	29.6	65.4	63.5	44.8	49.6	42.2	43.4	43.5	52.1	39.1
Sm	8.3	5.89	12.4	11.7	8.76	8.4	6.82	7.48	7.36	9.38	6.45
Eu	1.86	0.64	2.38	2.49	2.13	1.66	1.43	1.76	1.62	1.94	1.58
Gd	6.77	4.49	10.2	10.7	7.18	5.44	4.6	5.45	5.06	6.66	4.57
Tb	0.99	0.7	1.5	1.62	1.05	0.73	0.62	0.8	0.7	0.88	0.62
Dy	5.27	3.7	8.03	8.44	5.45	3.67	3.18	4.09	3.56	4.6	3.07
Ho	0.98	0.68	1.49	1.6	1.01	0.66	0.58	0.78	0.65	0.87	0.56
Er	2.86	1.98	4.46	4.6	2.88	2	1.68	2.28	1.87	2.56	1.64
Tm	0.43	0.31	0.65	0.67	0.41	0.29	0.25	0.33	0.27	0.38	0.24
Yb	2.61	1.94	3.84	4.06	2.49	1.75	1.53	2.06	1.62	2.31	1.49
Lu	0.36	0.27	0.53	0.55	0.35	0.24	0.21	0.3	0.24	0.32	0.21
(La/Lu) _{CN}	14.94	15.44	15.59	15.76	14.94	31.97	33.22	22.36	28.09	22.74	30.47
(La/Yb) _{CN}	13.80	14.38	14.40	14.29	14.06	29.35	30.52	21.80	27.85	21.08	28.74
Eu/Sm	0.22	0.11	0.19	0.21	0.24	0.20	0.21	0.24	0.22	0.21	0.24
ΣREE	235.63	192.88	354.68	333.23	236.01	291.34	256.00	255.93	252.05	292.40	233.83

(crustal assimilation and fractional crystallization processes from parental basaltic magmas), (3) 두꺼워진 하부지각에서 염기성암석(mafic rock)들의 부분용융(partial melting of mafic rocks in the lower part of a thickened crust)의 3가지 성인 모델을 가지고 연구지역 암석의 성인을 알아보았다.

동교리화강섬록암의 아다카이트질 지화학적 특성
아다카이트의 주요 지화학적 특성을 연구지역 내

심성암류의 지화학적 특성과 비교한 결과, 주성분원소의 일부와 미량원소 및 희토류원소에서 동교리화강섬록암이 아다카이트질 암석일 가능성이 제기되었다 (Tables 2 and 3).

아다카이트의 지화학적 특성을 정의하는데 있어 Sr/Y vs. Y(Defant and Drummond, 1990; Castillo et al., 1999, Defant and Kepezhinskis, 2001)와 La/Yb vs. Yb(Castillo et al., 1999; Qu et al., 2004)의 두 판별도가 널리 이용된다(Martin et al., 2005). 두 판

Table 3. The comparison of the geochemical features of typical adakites and BCGd

Section	Adakite	BCGd
SiO ₂ (wt.%)	>56	Av=59.30 (56.04-61.47)
Al ₂ O ₃ (wt.%)	>15 (at SiO ₂ =70 wt.%)	Av=14.96 (13.78-15.57)
Na ₂ O (wt.%)	3.5=Na ₂ O=7.5	Av=3.08 (2.74-3.41)
K ₂ O/Na ₂ O	Av=0.42	Av=1.22 (1.05-1.52)
Fe ₂ O ₃ +MgO+MnO+TiO ₂ (wt.%)	Av=7 (moderately high)	Av=7.06 (5.51-9.42)
Mg-number	Av=0.51	Av=0.47 (0.38-0.51)
Ni (ppm)	Av=24	Av=84.00 (45-152)
Cr (ppm)	Av=36	Av=247.00 (111-471)
Sr (ppm)	>400 (-700 in most adakites)	Av=775.50 (694-819)
Y (ppm)	=18	Av Y=17.98 (14.5-22.4)
Yb (ppm)	=1.8	Av Yb=1.79 (1.49-2.31)
Sr/Y	>40	Av=43.88 (35.76-52.83)
La/Yb	>20 (Strongly fractionated)	Av=37.02 (29.39-42.55)

Adakite data are compiled from Kay (1978), Defant and Drummond (1990), Sajona et al. (1997) and Martin (1999, 2005).

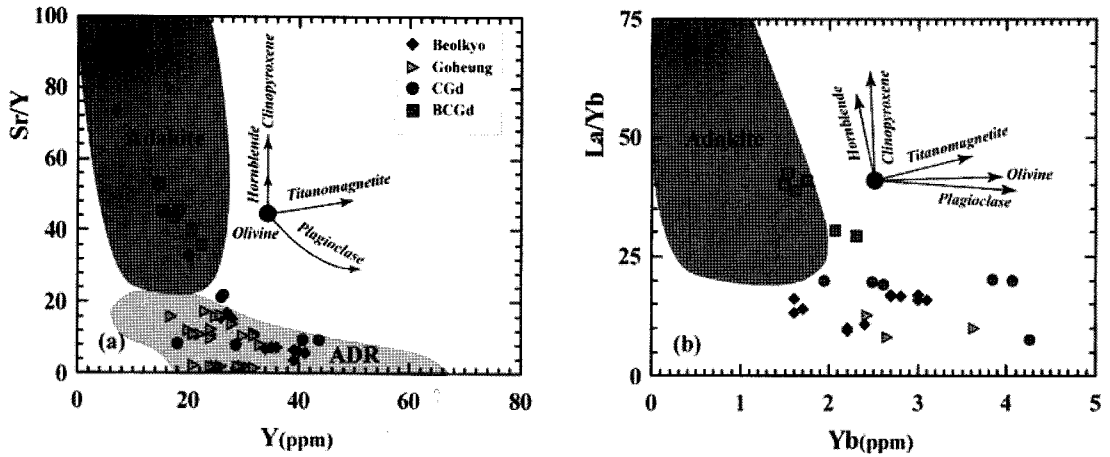


Fig. 8. Sr/Y vs. Y discrimination diagram (a) and La/Yb vs. Yb discrimination diagram (b) of the plutonic rocks in the study area. Adakite fields and fractional crystallization paths of the primary minerals that are indicated by arrows after Castillo et al., 1999. Shaded areas represent adakite range (dark gray) and island arc ADR range (light gray).

별도에서 대부분의 동교리화강섬록암은 연구지역 내 다른 심성암류가 일반적인 호상열도 화강암 영역에 도시되는 것과는 대조적으로 높은 Sr/Y, La/Yb 값을 가지고 아다카이트의 영역에 점시된다(Fig. 8).

동교리화강섬록암의 지화학적 특징을 가지고 성인을 고찰하기 위해 하커(Harker) 성분변화도에 서로 다른 성인을 가진 아다카이트의 영역을 도시하였다(Fig. 9). 또한 연구지역과 관입시기가 유사한 일본의 큐슈(Kyushu), 산요(San'yo)지역에 분포하는 아다카이트 들과 비교하였다. Kamei(2004)와 Kiji et al. (2000)은 일본 남서부의 큐슈 섬에 분포하는 시라시노(Shiraishino) 화강섬록암과 산요벨트 내에 분포하는 탐바(Tamba) 화강암류에 대한 연구 결과에서 이들 심성암류가 섭입하는 해양 슬랩의 부분용융에 의해 형성된 아다카이틱한 암석일 가능성을 제안하였다.

동교리화강섬록암은 대부분의 그림에서 섭입된 해양지각 기원의 아다카이트 영역에 치우쳐 나타난다(Fig. 9). 동교리화강섬록암은 두꺼운 하부 지각 기원의 아다카이틱한 암석들이나 순수한 슬랩멜트에 비해 상대적으로 Al_2O_3 (13.8-15.6 wt.%)의 함량과 FeO^T/MgO (0.96-1.25)의 비가 낮고 MgO (4.1-6.7wt.%), Cr(111-471 ppm), Ni(45-152 ppm), Yb(1.49-2.31 ppm)의 함량이 높으며, TiO_2 (0.62-0.78 wt.%), FeO^T/MgO (0.96-1.25)에서 섭입된 해양 지각 기원의 아다카이트 들(Defant and Drummond, 1990; Drummond and Defant, 1990; Drummond et al., 1996) 또는 얇은 조각으로 갈라진 하부 지각 기원의 아다카이틱한 암석

들(Xu et al., 2002; Wang et al., 2004)과 유사한 특성을 보여준다. 동교리화강섬록암에서 Sr의 함량(694-819 ppm)은 높은 값을 가지며 섭입된 해양지각 기원의 아다카이트 영역에 나타난다. 하부 지각 기원의 아다카이트를 판별하는데 유용한 지표 중 하나인 Th/Ce의 비(0.13-0.17)는 SiO_2 vs. Th/Ce의 상관도에서 섭입된 해양지각 기원의 아다카이트 영역과 얇은 조각으로 갈라진 하부지각 기원의 아다카이트 영역에 대부분 중복되어 나타난다.

동교리화강섬록암의 전반적인 회토류원소 패턴은 섭입된 해양지각 기원의 아다카이트와 얇은 조각으로 갈라진 하부지각 기원의 아다카이틱한 암석들의 패턴과 유사하며, 두꺼워진 하부지각의 부분용융이나 순수한 슬랩 벨트에서 직접 기원된 아다카이틱한 암석들의 패턴과 차이를 보인다(Fig. 10).

동교리화강섬록암의 성인

기존에 제시된 아다카이트에 대한 여러 가지 성인 모델 중, 동교리화강섬록암은 현무암질 모마그마의 지각동화 및 분별결정작용, 두꺼워진 하부지각에서 염기성암석(mafic rock)의 부분용융에 의해 만들어진 아다카이틱한 암석들과 비교하여 더 높은 MgO (또는 Mg-number), Ni, Cr, Yb의 함량과 더 낮은 Al_2O_3 의 함량과 FeO^T/MgO 의 비를 가지고 있다. 이와 같은 동교리화강섬록암의 지화학적 특성은 앞서 기술한 성인들의 독자적인 작용에 의한 생성 가능성을 제한한다.

동교리화강섬록암의 낮은 Mg-number(0.38-0.51)는

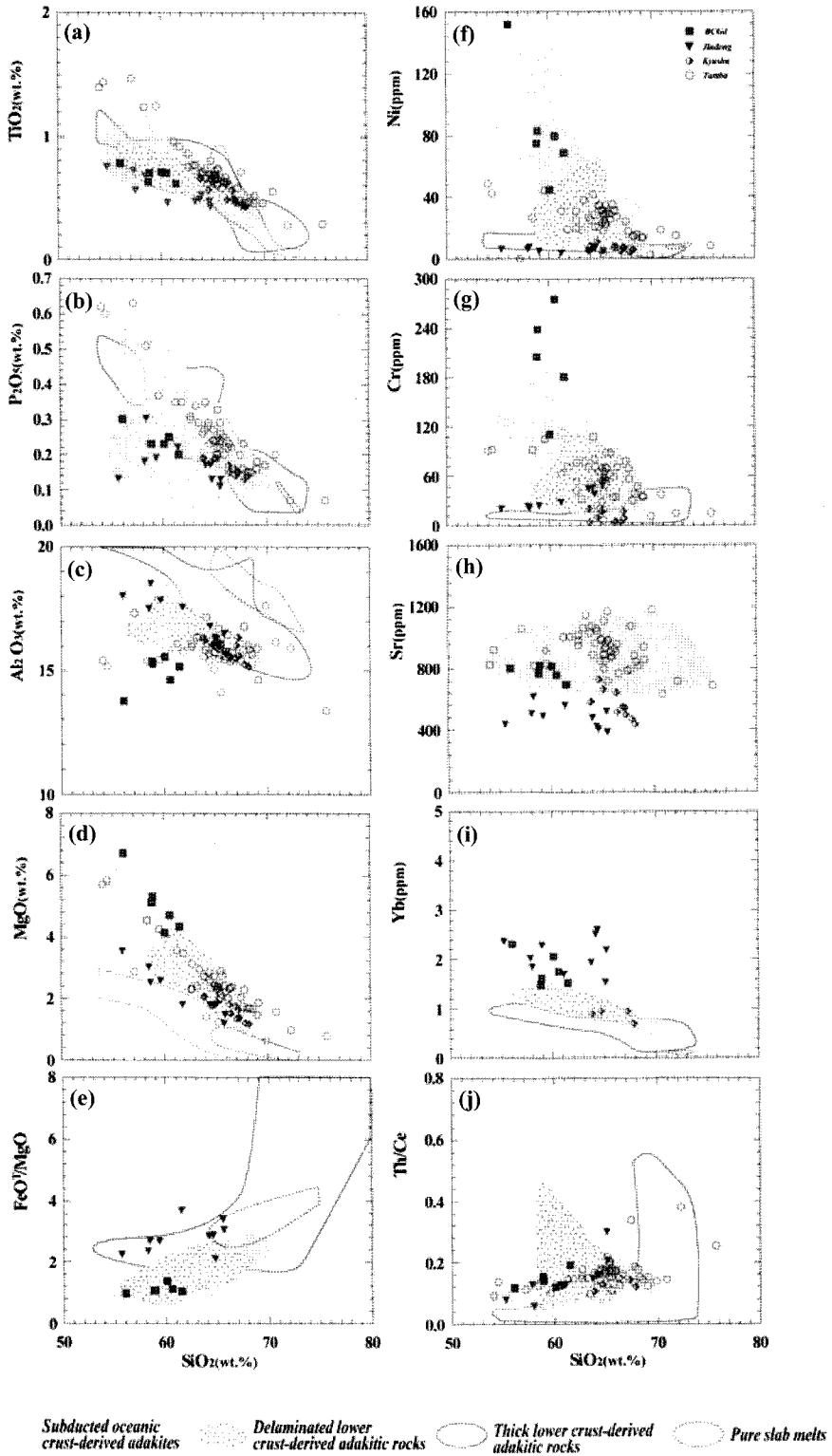


Fig. 9. Harker variation diagrams showing the major and trace variations of the BCGD, Jindong, Kyushu and Tamba. Adakitic fields after Wang et al. (2006). Data are compiled from Wang et al. (2006); Guo et al. (2006); Kiji et al. (2000); Kamei (2004) and Wee et al. (2006).

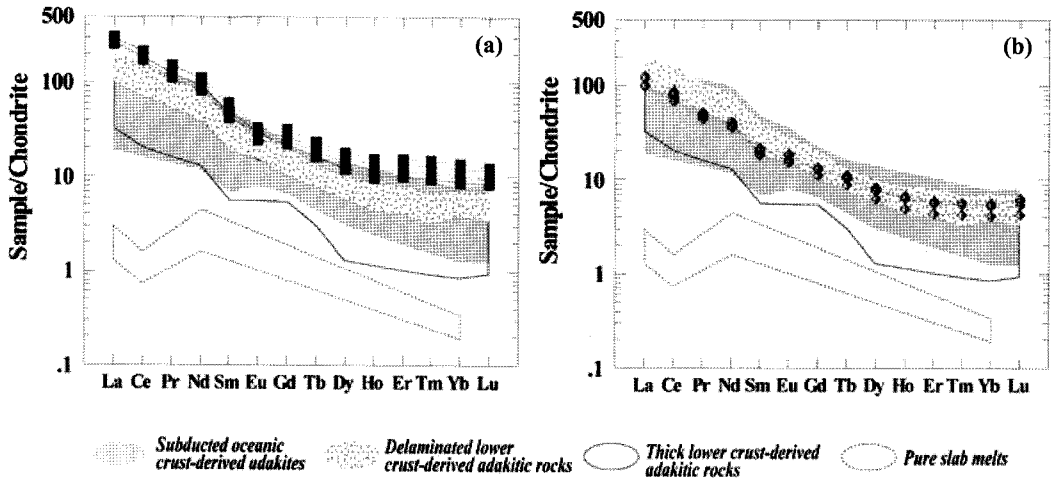


Fig. 10. Chondrite-normalized REE patterns of the BCGd (a) and Jindong granitoids (b). Normalization factors after Sun and McDonough (1989). Adakite fields after Wang et al. (2006). Symbols are the same as in Fig. 9.

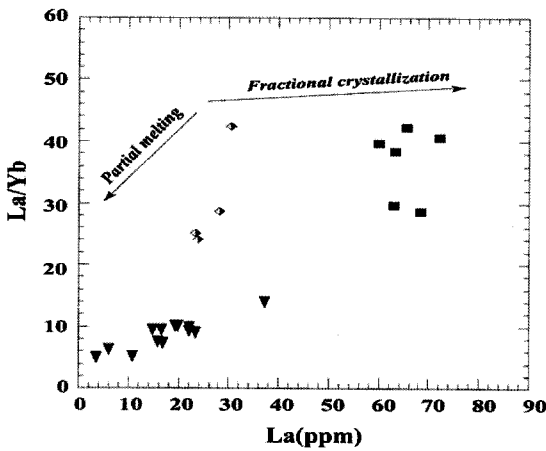


Fig. 11. La/Yb vs. La diagram of the BCGd and Jindong granitoids. Symbols are the same as in Fig. 9.

동고리화강섬록암이 만일 현무암질 모마그마로부터 생성되었다고 가정하면 많은 분별정출작용을 경험했음을 시사한다. 그러나 동고리화강섬록암의 지화학적 특성은 사장석, 각섬석, 휘석 등과 같은 광물 조합의 분별작용만으로는 잘 설명되지 않는다. 또한 La/Yb vs. La의 상관도(Fig. 11)에서 동고리화강섬록암의 전반적인 변화 경향은 분별정출작용이 아니라 근원물질의 부분용융이 더 효과적이었음을 시사함으로써, 현무암질 모마그마의 지각동화 및 분별정출작용에 의한 동고리화강섬록암의 성인 가능성은 적절치 않다.

아다카이트한 마그마들은 석류석 및/또는 각섬석을 안정화시키는 상태 하에서 두꺼워진 하부지각의 부분

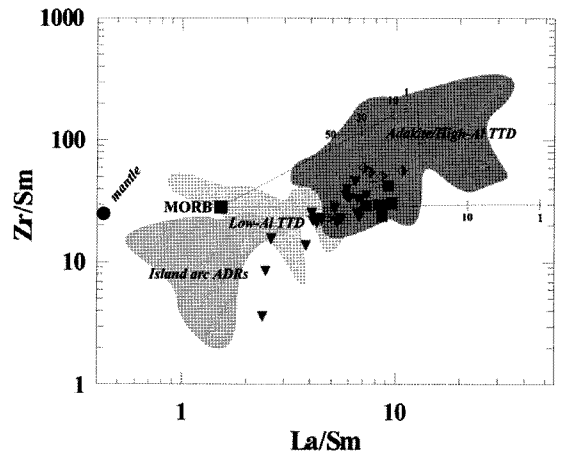


Fig. 12. Zr/Sr vs. La/Sm diagram (after Drummond et al., 1996) of the BCGd and Jindong granitoids. Lines represent partial melting trends of MORB (closed square) leaving either a 10% garnet amphibolite (upper line) or eclogite (lower line) restite. Percentage partial melt values are shown with a short line and represent 1, 10, 30 and 50% melt with decreasing La/Sm. Symbols are the same as in Fig. 9.

용융으로부터 만들어질 수 있지만(Atherton and Petford, 1993; Xiong et al., 2003; Gao et al., 2004), 이와 같은 용융은 일반적으로 약 48km 이상에서 발생한다(Kamei, 2004). Condie(1973)의 방법으로 추론한 동고리 부근의 지각 두께는 약 30-35 km 정도로 나타나며, 백악기 초 이후 한반도의 구조조 진화(이상만 외, 1987; 민경덕과 이윤수, 2006)에 비추어 지각의 두께가 오늘날보다 크게 두꺼웠을 것 같지는

않다는 점을 고려하면 동교리화강섬록암을 생성한 아다카이트질 마그마는 두꺼워진 하부지각의 부분용융으로 생성되었을 가능성은 배제된다.

동교리화강섬록암의 높은 MgO, Ni, Cr 함량과 낮은 Al_2O_3 의 함량은 상승하는 슬랩 맨틀과 맨틀 페리도타이트 사이의 상호작용을 반영하는 것으로 해석되며(Drummond et al., 1996; Smithies, 2000; Martin and Moyen, 2002), Rapp et al.(1999)에 의한 실험 결과는 슬랩 맨틀과 맨틀 페리도타이트 사이의 반응이 Al_2O_3 , 감람석의 소모와 함께 석류석과 사방휘석을 결정화시키고, 그 결과 혼성된 맨틀 내에서 MgO 함량의 증가와 함께 Al_2O_3 의 함량이 감소함을 보여준다. 이러한 결과들에 비추어 동교리화강섬록암이 여러 성인 모델에 관계없이 용융된 물질이 상승하는 동안 맨틀 페리도타이트와의 충분한 상호작용을 거쳤을 가능성을 배제할 수 없으며, 동교리화강섬록암을 형성시킨 마그마가 상부지각에 관입하는 동안 지각 물질과의 동화 및 분별결정작용은 아다카이트질 마그마의 조성 변화에 기여했을 것이다.

생성 당시의 지구조 환경에 대한 고려와 함께 동교리화강섬록암의 아다카이트질 지화학적 특성을 종합해 볼 때, 동교리화강섬록암은 백악기 말 태평양관의 섭입과 관련된 해양 슬랩 물질의 부분용융에 의해 형성되었을 가능성이 크다. 차거운 해양지각의 용융은 해령의 섭입(ridge subduction)에 따라 공급되는 뜨거운 열에 의해 발생했을 것으로 추정된다. Drummond et al.(1996)의 Zr/Sm vs. La/Sm 상관도(Fig. 12)에 도시한 결과를 보면 동교리화강섬록암이 석류석 각섬암 또는 에클로자이트 잔류물이 함유된 중앙해령현무암이 약 30-40% 정도 부분용융된 물질로부터 형성되었을 것을 시사하며, 앞서 언급한 주성분원소 및 미량원소의 함량 특성은 슬랩 맨틀과 맨틀 페리도타이트와의 상호작용, 상승하는 동안 지각 물질과의 동화작용 등 복합적인 과정을 거쳤음을 보여준다.

결 론

연구지역에 분포하는 백악기 화강암류에 대한 암석학적 특징과 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소의 분석결과로부터 유추한 마그마의 특성과 성인 및 지구조적 환경에 대한 논의는 다음과 같다.

1. 연구지역의 중생대 백악기 화강암류는 비알칼리

암 중 칼크-알칼리 계열의 I-type 화강암류로, 마그마의 특성이 대부분 중앙루피나 영역에 해당된다. 주성분원소와 미량원소의 변화 경향을 살펴보면 동교리화강섬록암은 연구지역 내 다른 화강암류와 차이를 나타내며, 미량원소의 함량과 희토류원소의 특징에서 뚜렷한 차이를 보인다. 이는 서로 다른 근원물질로부터 기원되었음을 시사한다.

2. 연구지역의 화강암류를 지구조 관별도에 도시하면 대륙의 동시충돌형과 화산호 영역에 나타난다. 이를 다른 지화학적 자료들과 종합해 볼 때, 연구지역의 화강암류는 백악기 유라시아 대륙판 주변부에서의 태평양관의 섭입에 따른 압축장 환경에서의 마그마 활동에 의해 생성되었음을 알 수 있다.

3. 동교리화강섬록암은 연구지역의 다른 심성암류에 비해 Sr/Y, La/Yb, Sr의 함량이 높고 Y, Yb의 함량이 낮게 나타나는 등 아다카이트질 지화학적 특성을 보인다. 이러한 특징은 관입시기가 비슷한 일본의 큐슈(Kyushu), 산요(San'yo)지역에 분포하는 아다카이트들과 유사하다.

4. 동교리화강섬록암을 형성한 마그마의 성인은 태평양관의 섭입과 관련된 해양 슬랩 물질의 부분용융과 맨틀 페리도타이트와의 상호작용에 의하여 생성되었을 가능성이 있으며, 이들이 상승하는 동안 지각 물질과의 동화작용 등 복합적인 과정을 겪었을 것으로 추정된다.

사 사

본 논문은 과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-10553-0)의 부분적인 지원과 한국고원대학교 2009 KNUE 학술연구비에 의해 연구되었으며, 이에 깊은 감사를 드린다. 또한 논문을 심사해주신 한국기초과학지원연구원 김정민 박사님과 익명의 심사위원께 감사드린다.

참고문헌

- 김정민, 김용준, 홍세선, 1990, 담양-진안 사이에 분포하는 엽리상 화강암류에 대한 암석화학적 연구. 대한광상지질학회, 23, 87-104.
- 김정민, 박영석, 1996, 벌교지역에 분포하는 심성암류의 암석화학과 지질시대에 관한 연구. 한국지구과학회지, 17, 227-240.
- 민경덕, 이윤수, 2006, 한반도의 지구조 변화. 대한자연지질

- 학회지, 39, 353-368.
- 박영석, 김정빈, 윤정환, 안건상, 1997, 고흥지역에 분포하는 백악기 심성암류의 지질시대와 암석화학적 연구. 한국지구과학회지, 18, 70-83.
- 이상만, 김형식, 1966, 한국지질도(1:50,000) 복내도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 위수민, 박세미, 최선규, 유인창, 2005, 한반도 남서부지역에 분포하는 백악기 화강암류에 대한 지화학적 연구. 자원환경지질학회지, 38, 113-127.
- 위수민, 최선규, 유인창, 신흥자, 2006, 경상분지 서남부에 분포하는 백악기 진동화강암의 지화학적 특성: 아다카이틱(adakitic)한 특성을 중심으로. 자원환경지질학회지, 39, 555-566.
- 진명식, 1985, 남한에 분포되어 있는 백악기 화강암류의 화학조성과 조구조적 환경에 대하여. 대한지질학회지, 21, 67-73.
- 진명식, 신흥자, 권석기, 2005, 한반도의 화성활동과 화성암. 한국지질자원연구원, 대전, 310 p.
- Atherton, M.P. and Petford, N., 1993, Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362, 144-146.
- Calmus, T., Aguilin-Robles, A., Maury, R.C., Bellon, H., Benoit, M., Cotten, J., Bourgois, J., and Michaud, F., 2003, Spatial and temporal evolution of basalts and magnesian andesites ("bajaites") from Baja California, Mexico: the role of slab melts. *Lithos*, 66, 77-105.
- 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*, 134, 33-51.
- 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 Gueongsang basin, Korea: Implications for the young basement in the East Asian continental margin. *The Island Arc*, 11, 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*, 26, 115-135.
- Condie, K.C., 1973, Archean magmatism and crustal thickening. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 2981-2992.
- Cullers, R.L. and Graf, J.L., 1984, Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: Intermediate and Silicic rocks-ore petrogenesis. In Henderson, P. (ed), Rare earth elements geochemistry. Elsevier Science Publishing Company, NY, USA, 275-316.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, 662-665.
- Defant, M.J. and Kepezhinskas, P.K., 2001, Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS (Transactions, American Geophysical Union)*, 82, 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*, 95, 21503-21521.
- Drummond, M.S., Defant, M.J., and Kepezhinskas, P.K., 1996, Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas. *Transactions of the Royal Society Edinburgh: Earth Sciences*, 87, 205-215.
- Förster, H.J., Tischendorf, G., and Trumbull, R.B., 1997, An evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40, 261-293.
- Gao, S., Rudnick, R., Yuan H.L., Liu, X.M., Liu, Y.S., Xu, W.L., Ling, W.L., Ayers, J., Wang, X.C., and Wang, Q.H., 2004, Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432, 892-897.
- 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*, 143, 1-13.
- Jin, M.S., 1988, Geochemistry of the Cretaceous to Early Tertiary Granitic Rocks in Southern Korea Pt. II. Trace Elements Geochemistry. *The Journal of Geological Society Korea*, 24, 168-188.
- Kamei, A., 2004, An adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24, 43-58.
- Kay, R.W., 1978, Aleutian magnesian andesites; melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4, 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*, 29, 136-149.
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635-643.
- Martin, H., 1999, Adakitic magmas: Modern analogues of Archean granitoids. *Lithos*, 46, 411-429.
- Martin, H. and Moyen, J.F., 2002, Secular changes in TTG composition as markers of the progressive cooling of the Earth. *Geology*, 30, 319-322.
- 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*, 79, 1-24.
- McCulloch, M.T. and Gamble, J.A., 1991, Geochemical

- and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102, 358-374.
- 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*, 25, 956-983.
- Qu, X.M., Hou, Z.Q., and Li, Y.G., 2004, Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau. *Lithos*, 74, 131-148.
- Rapp, R.P., Shimizu, N., Norman, M.D., and Applegate, G.S., 1999, Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8GPa. *Chemical Geology*, 160, 335-356.
- Sajona, F.G., Bellon, H., Maury, R.C., Pubellier, M., Quebral, R.D., Cotten, J., Bayon, F.E., Pagado, E., and Pamatian, P., 1997, Tertiary and Quaternary magmatism in Mindanao and Leyte (Philippines): Geochronology, geochemistry and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15, 121-153.
- Smithies, R.H., 2000, The Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182, 115-125.
- Streckeisen, A., 1976, To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, 12, 1-33.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D. (ed), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society Special Publication, 42, Geological Society, London, UK, 313-345.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1996, Advances in U-Pb zircon geochronology of Mesozoic plutonism in the southwestern part of Ryengnam Massif. *Geochemical Journal*, 30, 323-338.
- Wang, Q., Xu, J.F., Jian, P., Zhao, Z.H., Bao, Z.W., Xu, W., and Xiong, X.L., 2004, Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal*, 38, 417-434.
- 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*, 47, 119-144.
- Xiong, X.L., Li, X.H., Xu, J.F., Li, W.X., Zhao, Z.H., Wang, Q., and Chen, X.M., 2003, Extremely high-Na adakite-like magmas derived from alkali-rich basaltic underplate: The Late Cretaceous Zhantang andesites in the Huichang Basin, SE China. *Geochemical Journal*, 37, 233-252.
- Xu, J.F., Shinjo, R., Defant, M.J., Wang, Q., and Rapp, R.P., 2002, Origin of Mesozoic adakitic rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geological Society of America*, 30, 1111-1114.

2009년 4월 27일 접수
2009년 6월 25일 수정원고 접수
2009년 8월 6일 채택