

경상분지 백악기 화산암류에 대한 암석화학적 고찰: 이원성 마그마의 가능성

성종규* · 김진섭* · 이준동*

Petrochemical Study on the Cretaceous Volcanic Rocks in Kyeongsang Basin, Korea: Possibility of Magma Heterogeneity

Jong Gyu Sung*, Jin Seop Kim* and Joon Dong Lee*

ABSTRACT : The Cretaceous volcanic rocks distributed in the southeastern part (Kyeongsang basin) of Korea peninsula are composed of basalt, basaltic andesite, andesite, dacite and rhyolite. The variation of major elements show that contents of MgO, CaO, FeO^T, Al₂O₃, TiO₂ and P₂O₅ decrease with increasing of SiO₂, but K₂O contents are increased slightly, Na₂O widely dispersed. We can show slightly inflection point and low frequency of dacites in range between 63~65 wt.% SiO₂, while continuous trend exist in variation diagram. Variation trends in Harker diagrams for the major, minor, trace and REEs suggest that the BAV (basaltic to andesitic volcanics) and DRV (dacitic to rhyolitic volcanics) are not related to a simple crystal fractionation process. In the regime of under 65 wt.% in silica content, fractionation of olivine and clinopyroxene is predominant, while that of plagioclase happens strongly higher than 65 wt.% (e.g., SiO₂ vs. Eu and Sr, MgO vs. Al₂O₃ and CaO). The latter means low-pressure fractional crystallization for DRV. On the discriminant diagram, DRV are located in more mature environment than BAV. The (Ce/Sm)_N vs. CeN diagram shows that these two classes cannot be related to crystal fractionation. If they had been produced by fractionation, although they plotted in a slightly elongate cluster along the same horizontal trend, DRV should lie to the right of these primitive compositions. These diagrams clearly rule out a simple fractionation throughout from BAV to DRV. BAV had been influenced greatly subducting slab as shown by K/Yb vs. Ta/Yb. We suggest that BAV primitive magma generated higher degree of partial melting than DRV primitive magma. LILE (K, Ba, Rb±Th) enriched characteristics as shown in BAV are inherited from subducting slab fluids and/or higher degree of partial melting of mantle material. However, lower degree of partial melting of mantle relative to BAV and contamination at high-level magma reservoir caused LILE enrichment to DRV.

서 론

한반도의 남동부 경상분지에는 백악기 후기에서 고제 3기 초에 걸친 화성암류가 널리 분포되어 있다 (Fig. 1). 이에 대한 암석학적, 암석화학적 연구도 활발히 진행되어 기원 마그마의 특성 및 분화양상에 대한 많은 사실들이 알려지게 되었고, 특히 1980년대 이후로 화산암류에 대해서도 다양한 지구화학적인 자료가 구해지게 되었다. 이들로부터 경상분지내의 화성암류를 생성시킨 마그마의 분화 경로와, 화성활동에 관련된 판구조운동에 대한 많은 논의가

이루어졌다 (김상욱, 1982, 1986; 민경덕 등, 1982, 1988; 이상만 등, 1987; 황상구, 1991; Hwang, Kim, 1994a, 1994b; Kim, Lee, 1981; Kim *et al.*, 1991; Kim, 1990; Kim, Sung, 1996; Park, 1990; Yun *et al.*, 1994).

현무암에서 안산암, 유문암의 성분영역에 이르는 비교적 넓은 성분 변화를 보이는 본연의 화산암류는 칼크알칼리암계열의 동일 기원의 마그마 (이상만 등, 1987; 김규한, 이진수, 1993)로부터의 분별결정작용과 밀접히 연관되며 (이상만 등, 1987; 황상구, 1991, 1996; Kim, 1990; Yun *et al.*, 1994), 지각흔염이 수반되어 산성의 마그마로 전화하였다 고 보고되었다 (Hwang, Kim, 1994b). 조구적 위치는 조산대에서의 화산호, 그 중에서도 high-K suite에 속하며, 지판이 침강 섭입하는 지판계계부에서 생성된 마그마로부터

* 부산대학교 지질학과 (Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

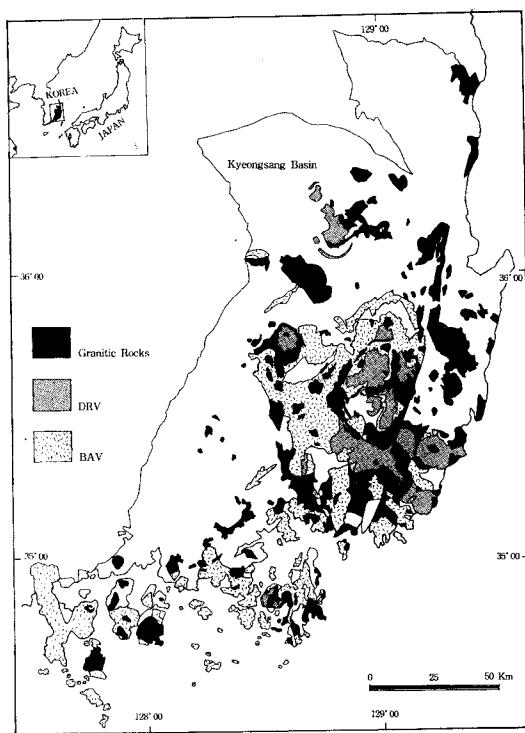


Fig. 1. Geologic map of the Kyongsang basin. Modified from Cha (1985), Kim, Sung (1996), Hwang, Kim (1994a, b), Yun (1988, 1993) and Yun *et al.* (1994).

유래한 화산암류로 (Hwang, Kim, 1994a, 1994b; Kim, Sung, 1996; Yun *et al.*, 1994) 침강된 대양판이 베니오프 대에서 부분용융받아 생성되었거나 (이상만 등, 1987) 혹은 쪘기 모양의 상부 맨틀 (맨틀웨지; mantle wedge)이 다

양한 정도로 부분용융하여 생긴 마그마 기원 (Hwang, Kim, 1994b; Yun *et al.*, 1994)으로 알려졌다.

지역에 따라 이원성 (bimodal) 마그마 및 서로 다른 모마 그마의 존재를 최근의 연구들은 인식하고 있다 (황상구, 1996; Jwa, Park, 1996; Yun, 1993). 이는 경상분지의 화산 암이 동원마그마로부터의 분별결정작용으로 생성되었다는 기준의 연구들과는 다른 결과이다. 만일 경상분지의 화산암류가 서로 다른 마그마로부터 생성되었다면 동원마그마로부터의 분별결정작용 만으로 설명한 기준의 연구들은 다음과 같은 요인에 의해 재고찰이 필요할 것이다. 첫째, 넓은 영역에 걸친 임의 표표의 선택을 통한 연구는 동일한 조구적 환경에서의 마그마작용을 효과적으로 구별할 수 없다는 것과, 둘째, 암석화학적 연구에서 주성분원소의 거동이 일정한 연속성을 벗어난 경우 대부분 혼염의 효과에 의한 것으로 해석하였으나, 혼염 이외에도 모체 마그마와 상승 과정에 겪는 마그마작용의 상이성이 존재한다는 것이다.

이와 같은 이유로 경상분지 화산암의 암석화학적 자료를 재고할 필요가 있으며, 본 연구에서는 기발표된 경상분지의 화산암류에 대한 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소를 종합하여 그 경향성과 거동을 알아보고, 암석조구조적 위치 및 성인을 검토하여 볼 것이다. 전체 381 개의 자료 중 화강암질암 및 암맥을 제외하였고, 화산암류 중에서도 백악기말~고제3기에 분출된 것이라고 여겨지지 않는 자료는 제외한 331 개의 자료를 이용하였다.

암석화학적 특징

본역의 북부, 금성산 화산암의 층서는 현무암, 유문암

Table 1. Phenocryst assemblages and silica ranges of BAV and DRV. abbreviate; q: quartz, k-fd: K-feldspar, pl: plagioclase, bt: biotite, am: amphibole, px: pyroxene, cpx: clinopyroxene, opx: orthopyroxene, ol: olivine.

Locality	BAV		DRV		References
	Phenocryst assemblage	Silica range	Phenocryst assemblage	Silica range	
Yucheon	-	59.81~57.15	-	66.73~72.24	Kim, Lee (1981)
Hwasan	-	-	q,k-fd,pl,bt	66.79~73.76	Yun (1988)
Pusan	pl,cpx,mt,ol	48.72~58.98	k-fd,pl,q	66.41~76.14	Kim (1990)
Yucheon	pl,px	50.31~63.08	pl,q	70.32~75.07	Kim <i>et al.</i> (1991)
Yangsan	-	-	pl,q,k-fd,bt,am	-	Hwang (1992)
Daegu-sain	ol,px,pl	49.22~65.65	-	-	Kim <i>et al.</i> (1993)
Kyeongsang Basin	pl,am	54.42~61.99	q,pl,k-fd	64.68~74.97	Kim, Lee (1993)
Pusan	pl,px,ol	50.09~64.33	q,k-fd,pl,am	65.92~71.33	Kim, Yun (1993), Yun <i>et al.</i> (1994)
Euisung	pl,cpx	47.06~53.87	pl,q,bt	71.62~75.74	Lee <i>et al.</i> (1993)
Euisung	pl,ol,opx,cpx	47.06~51.50	pl,k-fd,q,bt,mt	67.70~75.74	Yun <i>et al.</i> (1993)
Milyang	px	57.44~63.32	pl	64.50~76.42	Hwang, Kim (1994a,b)
Gosung	pl,cpx	51.97~58.54	pl,q	65.58~69.99	Jwa, Park (1996)
Chunsungsan	-	-	pl,k-fd,q	67.35~74.53	Kim, Sung (1996)

및 관입유문암, 그리고 염기성 암맥이다 (Lee *et al.*, 1993; Yun, 1993). 서남부 고성 지역의 화산암은 안산암질화산력옹회암이 최하부를 이루며 그 상위에 유문데사이트, 유문암이 분포한다 (Jwa, Park, 1996). Chang (1995)은 백악기 유천층이 하부의 주사산중성화산암류와 상부 운문사산성화산암류로 나누어진다고 하였다. 본역에 분포하는 주사산중성화산암류의 K-Ar연대는 79~62 Ma, 운문사산성화산암류는 71~58 Ma로 보고되어 있다 (민경덕 등, 1982; 신성천, 진명식, 1995; 윤성효, 상기남, 1994; Jwa, Park, 1996; Lee *et al.*, 1993).

이들 자료를 종합하면 백악기 말에 염기성 내지 중성화산암의 분출이 광범위하게 있었고, 백악기 말 내지 고제3기초에 산성화산암의 분출이 있었다고 정리된다. 주사산중성화산암류에서 발견되는 반정은 주로 단사휘석, 사장석이며 감람석과 드물게 각섬석의 반정이 발견된다 (Table 1). 운문사산성화산암류의 주반정광물은 사장석이며, 석영, K-장석, 흑운모 등의 반정도 발견된다. SiO_2 의 함량은 주사산중성화산암이 47.06~65.65 wt.%, 운문사산성화산암이 64.50~76.42 wt.%의 범위이다 (Table 1). SiO_2 의 함량 증가에 따라 염기성~중성 영역에서 MgO 함량이 급격히 감소하고 (Fig. 3a), 산성 화산암의 영역에서는 Al_2O_3 가 급격히 감소한다 (Fig. 3c). MgO 의 급격한 감소는 감람석 또는 단사휘석이 초기에 급격히 제거되었다는 것을 반영하며 (Graham, Hackett, 1987), Al_2O_3 는 사장석의 분별정출작용과 밀접히 관련된다. 또한 CaO , Al_2O_3 및 MgO 함량 관계도에서도 이와 같은 특징이 발견되며 (Fig. 3f), 이는 주사산중성화산암류와 운문사산성화산암류의 반정 조합과 일치하는 결과이다 (Table 2). 본 연구에서는 현무암질~안산암질 영역의 화산암과 데사이트질~유문암질 영역의 화산암의 지화학적 특성이 구분됨을 인식하고 각각 BA (Basalte-Andesite) 화산암과 DR (Diorite-Rhyolite)화산암으로 나누어서 암석화학적 고찰을 하였다 (Fig. 8; Kim *et al.*, 1997).

본역 화산암을 Winchester, Floyd (1977)의 분류표를 적용하여 본 결과, 현무암, 현무암질안산암, 안산암, 데사이트 및 유문암의 전 영역에 걸쳐 도시된다 (Fig. 2a). Irvine, Baragar (1971)의 SiO_2 에 대한 알칼리의 성분도에서 비알칼리암 계열에 해당되며, $\text{FeO}^*-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{MgO}$ 의 성분도 (Fig. 2b)에서는 칼크알칼리암의 영역에 해당된다. SiO_2 에 대한 K_2O 의 성분도에서 본역의 화산암류는 넓은 영역에 걸쳐 분산되나 대부분 high-K 영역에 속한다 (Fig. 3).

Harker 성분 변화도에서 각 산화물은 SiO_2 성분이 증가함에 따라 Na_2O 와 K_2O 성분을 제외한 모든 성분은 급

격하게 또는 완만하게 그 함량이 감소하는 경향이 있다 (Fig. 3). SiO_2 성분에 대한 주성분원소 산화물들, 미량원소 및 희토류원소의 변화 경향은 연속적이며 (Fig. 4), 이와 같은 결과는 본역의 화산암들이 현무암에서 유문암까지 동원마그마의 분별결정작용에 의해 분화되었다는 근거가 되었다 (김상육, 1986; 황상구, 1991, 1996; Hwang, Kim, 1994b; Kim, Lee, 1981; Kim *et al.*, 1993; Kim, Sung, 1996).

미량 성분을 N-type MORB의 평균값 (Pearce, 1982)으로 규정화하여 도시해 보면 Fig. 6a와 같다. Cs, Rb, Ba, Th, U, La, Ce 등이 부화되어 있으며, Nb, Sr, Zr, Hf 등이 결핍되어 있는 특징을 나타낸다. BA화산암과 DR화산암을 나누어 도시한 결과, 전반적으로 비슷하나

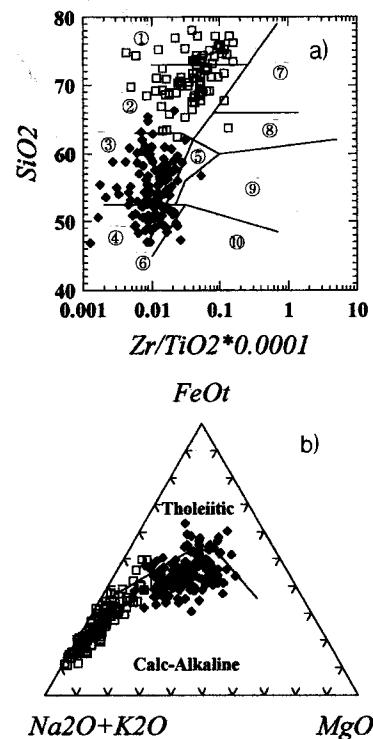


Fig. 2. a) SiO_2 vs. Zr/TiO_2 diagram of the volcanic rocks in Kyeongsang Basin (after Winchester and Floyd, 1977) ①; Rhyolite, ②; Rhyolite/Dacite, ③; Andesite, ④; Sub-alkali basalt, ⑤; Trachyandesite, ⑥; Alkali basalt, ⑦; Comendite/Pantellerite, ⑧; Trachyte, ⑨; Phonolite, ⑩; Basanite/Trachyte/Nephelinite. b) AFM diagram of the volcanic rocks in Kyeongsang basin. Solid diamond: basaltic to andesitic volcanics (BAV), open square: dacitic to rhyolitic volcanics (DRV). Data sources: Kim, Lee (1981, 1993), Kim *et al.* (1991), Kim (1990), Kim, Yun (1993), Kim, Sung (1996), Yun (1988, 1993), Yun *et al.* (1994, 1996), Lee *et al.* (1993), Jwa, Park (1996), Hwang (1992), Hwang, Kim (1994a, 1994b).

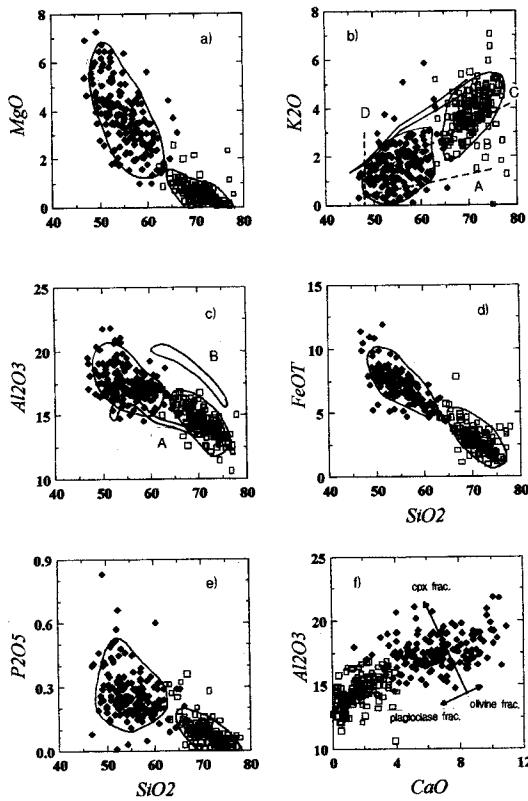


Fig. 3. Harker variation diagram of BAV and DRV (major vs. major elements). Enclosing data are >90% of the values. Symbols are same as Fig. 2. a) MgO vs. SiO₂ (wt.%) diagram. b) K₂O vs. silica diagram. The broken lines are as Le Maitre *et al.* (1989). BAV plotted medium-K and high-K, while DRV plotted high-K calc-alkaline series mostly. A; Low-K (tholeiitic) series, B; Medium-K (calc-alkaline) series, C; High-K (calc-alkaline) series, D; Shoshonite series. c) Experimental data on basalt fractionation-partial melting illustrated on a SiO₂ vs. Al₂O₃ diagram. BAV and DRV lie subparallel to the basalt data carried out at 1 kbar and low water pressure of P_{H2O}=0.67 (A; Spulber and Rutherford, 1983). Basalt experiments carried out at higher water content (water-saturated amphibolite melting, B; Helz, 1976) fall at higher Al₂O₃ contents of DRV than lower water pressure basalt may affected by crustal contamination and assimilation. d)~e) Other major elements vs. SiO₂ diagrams. f) CaO vs. Al₂O₃ diagram. BAV are fractionated by olivine and clinopyroxene, while DRV show strong plagioclase fractionation. All these Harker variation diagrams represent low frequency of andesites in range between 63~65 wt.% of SiO₂, while continuous trend exist.

BA화산암에서 부화한 Sr이 DR화산암에서 결핍되며, BA화산암에 비해 DR화산암의 Eu이 더욱 결핍되어 있다.

본역 화산암은 칼크알칼리 화산대와 비교하여 K와 Rb 함량이 높고 K/Rb 비는 BA화산암이 10.3~136.7, DR화산암이 17.0~105.3으로 낮다. LILE (large-ion-lithophile

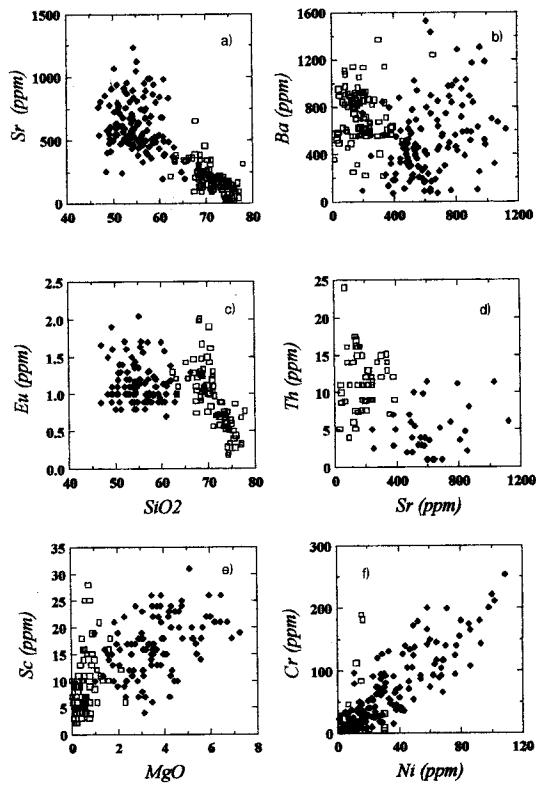


Fig. 4. Harker variation diagram of the volcanics in Kyongsang Basin (major, minor, trace and REEs). Symbols are same as Fig. 2. a) Sr (ppm) vs. SiO₂ diagram. b) Ba vs. Sr diagram. c) Eu vs. SiO₂ diagram. Decreasing in Eu with increasing of SiO₂ are suggest that DRV are affected by feldspar crystal fractionation. d) Th vs. Sr diagram e)~f) Diagrams of Sc vs. MgO and Cr vs. Ni.

elements)인 K 및 Rb는 HFSE (high field strength elements)인 Zr, Nb, Hf, Y 등에 비하여 중앙 해령에서보다 조산대의 화산호에서 부화하는 것이 일반적이다. 본역 화산암의 K/Rb 비는 10.3~136.7의 범위로서 high-K 칼크 알칼리 화산호의 값과 일치된다. Ba/La 비는 BA화산암이 2.9~65.0, DR화산암이 4.6~72.9의 범위에 있다. 이는 Gill (1981)에 의한 Ba/La=15~80의 조산대, 즉 화산호의 범위에 일치하며, high-K암 계열에 속한다 (Fig. 7a). Zr/Nb 비는 BA화산암이 8.3~38, DR화산암이 1~27.7로 도호 (island arc) 및 대륙호 (continental arc)에서의 Zr/Nb 비가 10~20 범위에 집중되는 것 (Gill, 1981)에 비해 그 범위가 약간 분산되지만 대체로 일치하고 있다. 그리고 Gill (1981)은 La/Th 비, 즉 Th의 증가에 따른 La의 증가율로서 중앙 해령 화산암류와 조산대 화산암류를 구분한 바 있는데 중앙 해령에서 La/Th=7~25, 조산대에서 La/Th=2~7에 이르는 변화를 보인다고 했다. 이 기준에 의하면 BA화

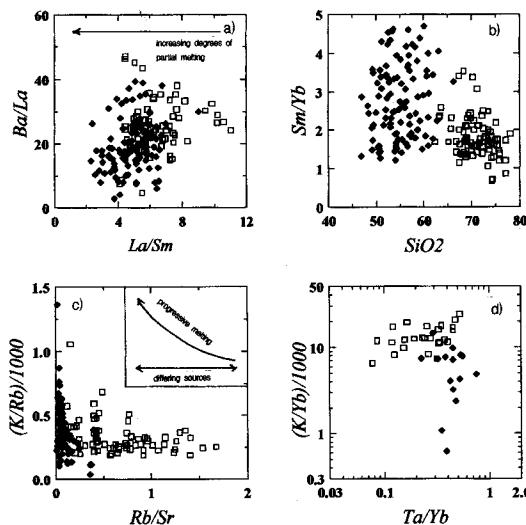


Fig. 5. Diagrams of Ba/La vs. La/Sm (a), SiO₂ vs. Sm/Yb (b), (K/Rb)/1000 vs. Rb/Sr (c) and (K/Yb)/1000 vs. Ta/Yb (d). Symbols are the same as those in Fig. 2.

산암의 La/Th 비는 2.5~11.6, DR화산암은 1.5~9.9로 조산대에 속함을 볼 수 있다. 본역의 화산암은 다른 화산호들에 비해 Sr 함량이 BA화산암이 243~1234, DR화산암이 18~653 ppm 범위이고, Rb 함량은 BA화산암이 7~187, DR화산암이 23~218 ppm 범위로 높은 편이며, Th 함량은 BA화산암이 1~11.5, DR화산암이 4~24 ppm 범위로 높은 편으로 대륙호 범주에 속한다. 또한, Nb, Hf 등의 HFSE가 낮고, Co, Sc 등의 호정성 원소가 고갈되며, K, Rb, La 등의 불호정성 원소가 놓집되고 경희토류원소 (LREE)에 비하여 일칼리가 놓집되어 있는 것이 큰 특징이다.

회토류 원소의 패턴을 살펴보면 LREE/HREE 분별이 심하며 DR화산암의 분별의 폭은 BA화산암에 비해 좁은 편이다 (BA화산암; 1.1~24.6, DR화산암; 2.7~18.5). HREE는 LREE에 비해 덜 분별되어 거의 평행하며 (Fig. 6b), 이는 환태평양 대륙연변부에서 나타나는 high-K 칼크알칼리 계열 화산호 지대와 일치되고 있다. BA화산암에서 미약하게 나타나는 Eu의 부 (-)의 이상은 DR화산암에서 현저히 나타난다.

조구조적 환경

N-type MORB로 규정화한 불호정성 회유원소 도표에서 본역 화산암은 HFSE인 Nb, Ta, Zr, Hf가 유사한 불호정도를 갖는 원소들에 상대해서 부 (-)의 이상을 보인다 (Fig. 6a). 또한 Th 등은 높은데, 초기 LILE 부화가 상당했던 것으로 해석된다. 이와 같이 섭입에 관련된 마그

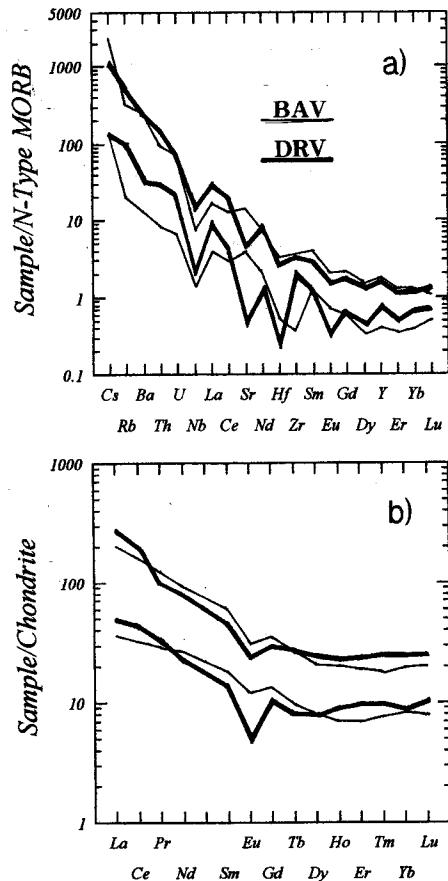


Fig. 6. a) Spider diagram of trace element concentration in BAV and DRV normalized to N-type MORB (Pearce, 1982). b) Chondrite (Sun, McDonough, 1989) normalized REE patterns in BAV and DRV.

마들은 LREE에 비하여 HFSE가 결핍되고, 강한 LILE 부화를 보이는 특징이 있다 (Bacon, 1990; Ewart, 1982; Hawkesworth, Ellam, 1989; McCulloch, Gamble, 1991; Skinner, Cooper, 1995; Pearce, 1982; Saunders *et al.*, 1991; McDermott *et al.*, 1993).

본역 화산암류는 조산대에서 화산호의 판별비와 일치하는 미량 및 회유원소 특성을 지니며, 지판이 침강섬입하는 지판경계부에서 생성된 마그마로부터 유래한 조구적 위치 영역이다 (황상구, 1991; Kim, Sung, 1996; Park, 1990; Yun *et al.*, 1994). Sr/Y에 대한 함량 관계도 (Fig. 7b)에서 DR화산암은 전형적인 도호의 영역에 점시되며 BA화산암은 슬랩용융체 영역에 도시된다 (Defant, Drummond, 1993; Feeley, Harker, 1995).

Ba/La, La/Th와 La/Nb 등에 의한 판별비에서 high-K 조산대에 집중됨은 본역의 화산암이 대륙지각을 통과하여

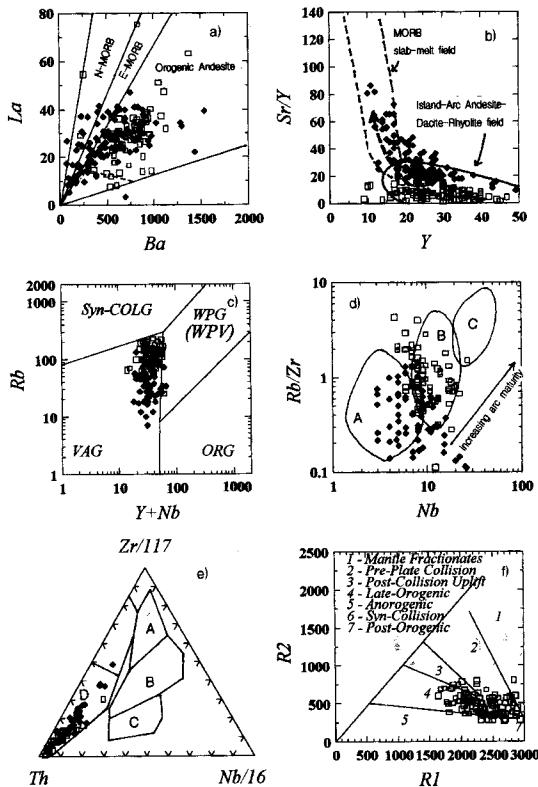


Fig. 7. a) Ba vs. La diagram (Gill, 1981). b) Sr/Y vs. Y diagram. 1; MORB slab-melt and island-arc field from Defant Drumond (1990, 1993). Thick curve is trend for partial melting of amphibolite-eclogite source. c) Plot of Rb vs. (Y+Nb); field VAG; volcanic arc granite; Syn-COLG; syn-collision granite; WPG; within-plate granite; and ORG; oceanic ridge granite, are after Pearce *et al.* (1984). d) Rb/Zr vs. Nb diagram (after Brown *et al.*, 1984). e) Zr-Th-Nb diagram. A; N-MORB, B; P-MORB, C; Within plate volcanics, and D; destructive plate margin volcanics. f) R1[4Si-11 (Na+K)-2(Fe+Ti)] vs. R2[6Ca+2Mg+Al] diagram showing that DRV are mostly late-orogenic (fields are after Batcheler, Bowden, 1985). Symbols are same as Fig. 2.

분출된 화산암류라는 것을 지시한다. Pearce *et al.* (1984)의 판별도 (Fig. 7c)에서 화산호 영역에 속하며, Rb은 95~193 ppm 범위로서 증가폭이 넓으면서도 윗쪽에, 반면에 Y+Nb는 32~55 ppm 범위로서 거의 일정하면서도 WPV (지판내부 화산암)의 경계 부근에 투시된다. 이는 Rb과 Y+Nb가 동시에 증가하는 곳, 즉 지판내에 가까운 대륙연변부에 해당하는 곳임을 암시한다. DR화산암은 BA화산암에 비해 WPV에 더욱 가까운 곳에 도시된다. 이는 DR화산암이 더욱 성숙도가 진행된 호에서 생성되었음을 시사한다. Fig. 7d (Brown *et al.*, 1984)의 판별도에서 정상적인 대륙호에 해당되는 영역에 해당되는데, DR화산암이

BA화산암에 비하여 더욱 성숙도가 진행된 조구적 영역에 도시된다. Fig. 7e (Wood, 1980)에서 지판이 침강 섭입하는 지판경계부에서 생성된 마그마로부터 유래한 조구적 위치 영역에 도시되며, Fig. 7f (Batcheler, Bowden, 1985)에서 DR화산암은 조산대 후기에 도시된다.

고준위 마그마류 (high-level magma reservoirs)

Gill (1981)은 안산암질 혹은 테사이트질의 역사적인 분출이 수반된 화산 아래에 천처 마그마 챔버 (깊이 < 20 km)가 존재했었다고 제안하였다. 초생 마그마에서 감람석, 휘석 등의 고철질 광물의 분별정출로 더욱 산성화된 마그마가 20~30 km보다 더 얕은 깊이에서 정치될 수 있고, 심지어는 표면에서 수 백 미터의 깊이에도 존재할 수 있다 (Iyer, 1984). 화산호에서의 분별결정작용은 30 km 이내의 고준위 마그마류에서 현저하며 (Gill, 1981; Iyer, 1984; Gamble *et al.*, 1990), 지각의 두께가 20~25 km에 다달았을 때 초생 마그마는 고준위 마그마챔버에 고이고, 뒤이은 저압 결정분별작용은 저밀도의 안산암질 마그마를 발생시킨다 (Wilson, 1989). 고준위 저류 시스템은 매우 얕은 호에서는 나타나지 않으며, 한 때 어떤 지각 두께 이상에 이른 호에서만 나타나는 특징이다. Jin (1985)은 백악기~제3기초의 경상분지 지각의 두께는 약 30 km 얕아 있었을 것이라고 추리한 바 있고, 최광선 등 (1993)은 중력자료해석에 의하여 현재의 지각의 두께를 33 km로 밝힌 바 있다.

도호의 지각과 상부 맨틀 내에서 고준위 마그마류 시스템의 존재를 지시하는 근거가 있다. 이들은 저압 결정 분별작용에 대한 암석기재학적 근거, 천처 화산 진동, 지표면 변형, 칼데라 형성, S 파의 현저한 감쇠 등이다 (Wilson, 1989). 이들 중 DR화산암에서 현저한 사장석의 분별 정출작용 (Hwang, Kim, 1992; Jwa, Park, 1996; Kim, Sung, 1996; Kim, Yun, 1993), DR화산암과 연관되는 칼데라 및 응회암류의 분출 (윤성효, 상기남, 1994; 장난심, 1983; 차문성, 윤성효, 1982; 차문성 등, 1984, 1985; 황상구, 김상욱, 1995; 황상구, 1991, 1996; Cha, 1985; Hwang, Kim, 1992; Kim, Sung, 1996; Park, 1990; Reedman *et al.*, 1989; Yun, 1988, 1993) 등이 DR화산암에 나타나는 고준위 마그마류의 훌륭한 지시자라 할 수 있다.

DR화산암에 반정으로 흔히 나타나는 사장석의 분별은 Figs. 3, 4에서 잘 나타난다. 또한 Sr은 분별결정작용중 사장석과 K-장석과 같은 광물에 허용 또는 포획되어 초기

에 소모됨으로 잔류마그마에는 상대적으로 그 함량이 감소되는 경향이 있다 (Arth, Reston, 1976; Hanson, 1978). DR화산암에서 분화의 정도에 따라 Sr의 결핍 정도가 더 커짐 (Fig. 4a)은 Eu의 감소 (Fig. 4c)와 더불어 사장석의 분별을 지시한다 (Johnson *et al.*, 1996; Mason *et al.*, 1995, 1996). 사장석은 더 깊은 깊이의 염기성 용융체로부터 차츰 결정화한 것이 아니며, 사장석의 존재는 결정화 깊이를 30 km 이내로 제한한다 (Powell, 1978). 경상분지 화산암의 생성 초기의 비성숙한 호 단계에서 고준위 마그마류 단계를 거치지 않은 BA화산암이 분출되었고, 성숙된 호로 발전하는 단계인 DR화산암은 고준위 마그마류의 과정을 거쳤다고 볼 수 있다.

논 의

동원마그마로부터의 분별결정작용

경상분지의 중성~산성화산암류 및 관련 심성암은 칼크알칼리암계열의 현무암질안산암에서 안산암, 테사이트 및 유문암의 성분영역에 이르는 비교적 넓은 성분변화를 보인다. SiO_2 및 MgO 의 함량에 따른 주성분원소산화물의 변화 경향은 연속적이며 (Figs. 3, 4), MgO 의 함량이 변곡을 일으키는 SiO_2 함량 52 wt.%, 66 wt.% 위치는 각각 감람석 및 단사휘석, 사장석의 분별정출작용과 밀접하며 (Wilson, 1989), BA 및 DR화산암의 반정 조합과 일치되는 결과이다. 감람석과 단사휘석의 분별정출작용은 불호정성 원소를 부화시킨다 (Nakamura *et al.*, 1989). BA화산암의 분별정출작용으로부터 DR화산암이 형성되었다면 DR화산암의 스파이더 (spider) 도표는 BA화산암에 비해 불호정성 원소가 더욱 부화한 양상을 나타낼 것이나 그런 양상을 보기 어렵다 (Fig. 6). 분별정출작용의 관점에서 BA화산암의 불호정성원소의 현저한 부화는 감람석과 단사휘석 등의 고철질 광물의 분별이 현저했던 영향이다. 관찰되는 반정조합과 100 ppm 이하의 상대적으로 적은 Ni 함량으로부터 감람석, 단사휘석, 사장석, 자철석이 BA화산암의 분별결정작용을 제어한 것으로 설명될 수 있다. 68~75의 Mg수를 갖는 초생 마그마가 400 ppm 이상의 Ni을 갖는 것 (Hart, Davis, 1978)에 비교해서 낮은 Ni의 함량은 BA화산암이 상당한 감람석 및 단사휘석의 분별작용을 받았다는 시사한다 (Münker, Cooper, 1995). 감람석의 제거는 Al_2O_3 에 대한 CaO 함량의 변화도에서도 나타나며 (Fig. 3f), 단사휘석의 분별정출작용에 의해 그 분포가 분산되어 있다. 변질과정중에 CaO 의 유동이 가능하기 때문에 단사휘석의 분별정출작용은 MgO 에 대한

Sc의 함량, Cr에 대한 Ni의 함량 변화를 고려하여야 한다 (Figs. 4d, 4e). BA화산암에서 Cr과 Sc은 넓은 함량범위를 보이며, 이는 모두 단사휘석에 높은 분배계수를 가진다 (각각 3.8과 1.4; Hart, Dunn, 1993). BA화산암의 Cr 값이 높고, 단사휘석이 반정으로 흔히 발견됨은 단사휘석이 농집된 결과로 해석된다. 모드의 반정 조합에서 감람석은 단사휘석에 비해 적게 나타난다. 감람석이 대량 제거됨에 따라 CaO 가 줄어들수록 Al_2O_3 함량이 적어졌으며, 단사휘석은 감람석에 비해 효과적으로 제거되지 않았으므로 반정으로도 많이 발견되고, Fig. 3f에서 단사휘석의 분별정출경향선 방향으로 감람석의 분별정출경향선을 분산시키는 효과를 냈다. BA 및 DR화산암은 모두 HREE가 상대적으로 편평한 양상을 나타내며 (Fig. 6d) 이는 본역 화산암의 근원 마그마에 모드에서 나타나지 않는 석류석의 분별작용은 중요하지 않다는 것을 이야기한다 (Smith *et al.*, 1996). BA화산암에서 SiO_2 의 함량에 따라 Al_2O_3 및 Eu이 거의 변화하지 않으며 DR화산암에서는 그 감소가 현저하다 (Figs. 3c, 4c). 이는 DR화산암의 모드로서 현저한 사장석의 분별정출작용과 밀접히 연관된다 (Table 1; Johnson *et al.*, 1996; Feeley, Davidson, 1994).

주성분원소산화물의 성분 변화가 연속적이며, 콘드라이트 또는 MORB로 규정화한 스파이더 도표와 희토류 원소의 패턴이 거의 나란하며 분화 정도에 따라 일정한 경향성을 갖는다. 미량 및 희토류 원소등에 의한 조구적 위치가 일치하는 경향 등은 동일 기원의 마그마로부터의 분별정출작용이거나 동일한 과정을 거쳤다는 이전 연구자들의 결과는 더욱 지지한다.

그러나, 이와 같이 지역을 고려하지 않은 채 여러 도표에 도시하여 동일 기원의 마그마로부터의 동일한 과정 분별결정작용이라는 결과는 문제가 있다. 분별결정작용, 지각물질의 혼염, 마그마의 혼합 등의 과정이 복합적으로 작용하여 유사한 암석화학적 자료가 만들어질 수 있다. 특히 주성분원소산화물들에 대한 경향은 이들 과정을 효과적으로 분리하기 어렵기 때문에 미량 및 희토류원소, 동위원소 등에 대한 지화학적 자료를 함께 검토해 보아야 한다. 또한 화산암은 화산체에 따른 지역성을 가지기 때문에 화산암을 형성시킨 마그마의 기원에 관한 논의는 각 화산체에 따른 충서적 연구와 충서를 고려한 암석 지화학적 논의가 병행되어야 한다. 특히 칼크-알칼리 마그마는 비교적 좁은 영역의 작은 화산체를 만드는 특징을 가진다 (e.g., Miller *et al.*, 1992). 칼크-알칼리 마그마의 밀도는 분화 정도에 따라 감소하고, 잔류 액체는 부력적으로 상승하고 대류하여 중력적으로 혹은 성분적으로 누대된 마

그마 챔버를 만들 수 있다 (Sparks *et al.*, 1984). 황상구 (1996)는 이와 같은 기구로 형성된 본역 중앙부의 양산칼데라가 하부층으로부터 상부로 가면서 SiO_2 가 감소하는 텔 분화된 양상을 보고하였다. 산성 화산암에 나타나는 이와 같은 경향은 화산체를 충서적으로 논의해야 한다는 점을 더욱 강조하고 있다.

서로 다른 모체 마그마의 인식

최근 화산암에 대한 연구에서 충서에 따라 암석 성인을 달리 해석하는 경향이 보인다 (황상구, 1996; Hwang, Kim, 1992; Kim, Yun, 1993; Yun, 1993). 양산 칼데라에 대한 Hwang, Kim (1992)의 연구에 따르면 다양으로 분출된 초기의 회류응회암, 칼데라 내 화산활동에 의한 화쇄류, 잔류 마그마로부터의 화산활동을 분리하고 있다. Kim, Yun (1993)은 부산 지역의 화산암이 충서에 따라 연속적인 SiO_2 함량을 보이지 않는 것은 잔류마그마와 새로 공급된 마그마와의 마그마 혼합에 의한 영향으로 보았다. Jwa, Park (1996)은 고성 지역의 화성암에 대한 연구에서 SiO_2 에 대한 산화물들의 함량 변화가 체계적이지 않은 점을 이유로 초생 마그마의 상이성을 주장하였다.

본역의 화산암을 연구 지역에 따라 각 연구자들의 결과를 도시하여 보았다. Fig. 8에서 테사이트 영역의 화산암이 현저히 결여된 특징을 보이며, 이는 지역마다 나타나는 공통된 결과이다. BA화산암과 DR화산암은 주성분 원소의 변화 경향 뿐 아니라 미량 및 희토류 원소의 변화 경향에서도 뚜렷한 차이를 보인다 (Figs. 3, 4, 5). 특히 Ba에 대한 Sr 및 Th의 도표 (Figs. 4b, 4d)에서 DA화산암은 사장석의 분별정출작용에 따라 BA화산암과 완전히 구분되어 나타난다. 만일 BA화산암과 DR화산암이 일련의

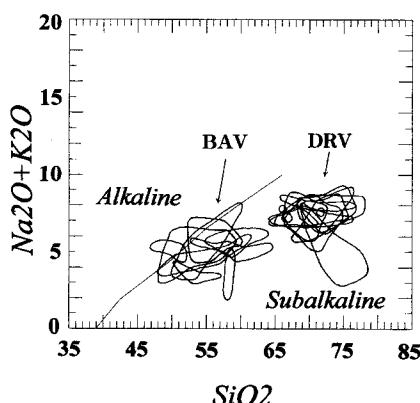


Fig. 8. Result in each authors which show different plotting range from BAV and DRV.

분화산물이라면 이와 같이 구분되는 이유가 설명되어야 할 것이다. 주성분 산화물의 원소의 K/Rb에 대한 Rb/Sr의 도표 (Fig. 5c)에서 BA화산암과 DR화산암의 균원 성분이 명백히 다름을 나타낸다 (Strong, Hanmer, 1981).

Ce_N/Sm_N 대 Ce_N 도표 (Fig. 9b)에서 BA화산암과 DR화산암 각각은 독립된 결정분별작용의 경향을 따른다. DR화산암이 BA화산암의 분별정출작용의 산물이라면 DR화산암의 초기 성분이 BA화산암의 오른쪽에 도시되어야 한다 (Myers *et al.*, 1986). 그러나 BA 및 DR화산암은 넓은 부분에서 중첩되어 있다. 이는 DR화산암이 BA화산암의 분별정출작용으로 생성되었다는 연구와 부합되지 않는다. Ce_N/Yb_N 대 Ce_N 도표 (Fig. 9a)에서도 이와 같은 특징이 역시 나타난다. DR화산암의 부분 용융의 경로는 BA화산암에 비해 비교적 아래에 놓이며 집중된다. 이는 DR화산암과 BA화산암의 균원마그마가 서로 다른 성분의 부분용융으로 형성되었음을 직접적으로 암시하고, BA화산암의 부분용융의 정도가 DR화산암에 비하여 훨씬 다양했음을

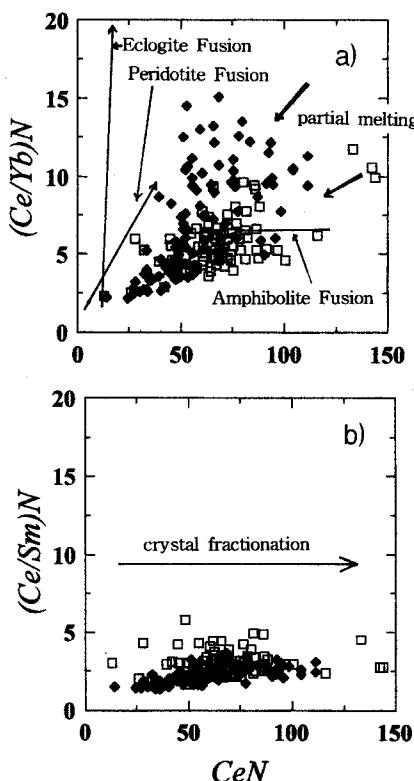


Fig. 9. Trace element process identification diagram. Although BAV and DRV are colinear for $(\text{Ce}/\text{Sm})_N$ - Ce_N (b), their relative locations are inconsistent with a fractionation relationship. A similar conclusion is evident for $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ - Ce_N (a). Symbols are same as Fig. 2.

이야기한다. Fig. 9a에서 혼염의 정도에 따라 이와 같은 틀린 도시 영역을 만들었다고 할 수도 있겠지만, Fig. 9b와 연관지어 고찰하면 근원마그마는 서로 다른 성분의 부분용융으로 형성된 것임을 알 수 있다.

입하는 해양 암권의 탈수작용으로 빠져나온 물은 화산 전면부에서 위에 놓인 상부맨틀의 부분용융을 일으킨다 (Gill, 1981; Wyllie, 1982; Thompson, 1992). DR화산암은 BA화산암보다 더욱 성숙된 호에서 생성되었으며 (Figs. 7c, 7d) BA화산암은 호가 성숙되기 전 단계에서 섭입하는 슬랩에서 유래되었을 가능성이 있다. Ce은 해양 지각 퇴적물에 적게 농집되고 (Rollinson, 1993; Hildreth, Moorbat, 1988), 이러한 특징은 BA화산암이 DR화산암보다 Ce의 양이 적은 것으로 대변된다. 만일 부분용융된 성분이 둘 모두 상부맨틀 폐리도타이트라고 한다면 BA화산암과 DR화산암의 서로 다른 부분용융의 정도가 희토류 원소의 농집을 틀리게 만들었다고 볼 수 있다. 그렇지만 이와 같은 성인은 Ce 뿐 아니라 Yb도 같은 비율로 증가 또는 감소시키기 때문에 Fig. 9a에서 같은 방향의 벡터를 나타낼 것이기 때문에 지지될 수 없다. K/Yb에 대한 Ta/Yb의 도표는 맨틀 용융체 내부에 관련된 것과 슬랩으로 유래된 유체 (혹은 '입 성분'의 부가)를 판단하는 데 사용되었다 (Pearce, 1983). Fig. 5d에서 슬랩에서 유래된 유체는 K/Yb가 증가할 때 Ta/Yb가 상대적으로 변화를 하지 않는다. 이 결과에 의하면 BA화산암은 섭입 슬랩이 다양한 정도의 부분용융으로 형성된 것이다.

에 비하여 DR화산암은 섭입 슬랩의 유체에 의한 미량 원소 특성을 거의 보이지 않는다. Ni과 Cr의 함량은 BA화산암에 비해 DR화산암은 현저히 적다 (Fig. 4f). 이는 DR화산암이 초기 맨틀 용융체로부터 분별되었음을 지시한다 (Feeley, Davidson, 1994; Graham, hackett, 1987; Francalanci *et al.*, 1993). 일반적으로 Ni과 Cr은 호정적으로 작용하여 감람석과 휘석의 분별작용으로 초기 단계에서 소모된다 (Mason *et al.*, 1996). DR화산암의 근원마그마는 현저한 감람석, 휘석의 분별작용으로부터 진화하여 하부지각에 안산암질 모마그마로 정치하였을 것이다.

역 화산암의 생성 지역에 따라 살펴보면 BA화산암은 주분출 시기가 DR화산암에 앞선다. 민경덕 등 (1982)은 판구조론적 관점에서 본역 화산암을 고찰하였고 북서쪽에서 남동쪽으로 암석 연령이 감소함을 지적하였다. 이는 해구가 남동쪽으로 점점 이동함에 따른 현상으로 화산암의 분출에 뒤이은 심성암체의 관입도 같은 양상을 나타낸다고 하였다. 그러나 이들 자료들은 BA화산암에 한정된 연구이며 DR화산암에 대한 고찰은 결여되어 있다. DR화산암의 생성은 주로 BA화산암의 이후이지만 지역에 따라

서는 DR화산암의 주분출시기에 현무암 및 안산암 성분의 화산암이 나타나기도 한다 (Yun, 1993). BA화산암의 분출 이후 잔류마그마로부터 분별결정작용이 이루어져 더욱 진화한 마그마가 되고, 이로부터 DR화산암이 분출하였다면 본역 전체에서 BA화산암과 DR화산암의 연령 차이는 유사한 패턴을 이를 것이나 이와 같은 특징은 나타나지 않는다. 따라서 BA화산암과 DR화산암이 동일마그마로부터의 분별결정작용으로 생성되었다는 것은 연령자료를 잘 설명해 주지 못한다.

BA화산암과 DR화산암의 연령자료는 서로 다른 모체 마그마를 인식한다면 그 해석이 가능하다. 일반적으로 BA화산암의 분출이 선행되지만 BA화산암이 분출한 시기에 DR화산암의 분출도 있었다고 볼 수 있다. 해구가 남동쪽으로 이동하면서 BA화산암의 분출장소도 함께 이동했으며, DR화산암은 BA화산암에 비해 해구에서 먼 장소에서 BA화산암이 이미 분출되어 고결된 곳에서 일어났다고 볼 수 있다. 남동쪽으로 향함에 따라 나타나는 BA화산암의 암석연령이 일정한 경향성에 비추어 DR화산암의 암석연령 자료는 BA화산암에 비해 그 경향성이 일정치 않다. 해구에 가까운 곳에서 인장력이 작용하였다면 BA화산암의 분출은 쉽고 빠른 통로를 따라 상승하였으므로 해구의 이동과 직접 연관될 수 있었을 것이다. 그러나 DR화산암은 지각이 마그마의 상승을 저지하는 밀도 필터로 작용하였으므로 마그마가 정치되어 머무르는 시간과 깊이의 차이가 생길 수 있다. 또한 Cha (1985)는 경상분지를 화산 구조성합물지로 인식하고 대구에서 부산에 이르는 거대한 환상의 약대를 보고하였다. 본역에서 DR화산암은 중앙심성암체 및 약대를 따라 발달한 콜드론 (cauldron)을 따라 분포되어 있다 (Cha, 1985; Fig. 1). DR화산암의 분출은 지각의 두께에 비추어 상대적으로 약한 이와 같은 구조와 관련된 분출이었으므로 암석연령 경향성이 BA화산암에 비해 일정치 않다고 볼 수 있다.

암석 성인

Kim *et al.* (1993)은 대구-자인 지역에 분포하는 안산암질암류가 동곡배사축의 동측과 서측이 암질 및 성분상의 차이가 있음을 인식하였고, 이는 비록 동일 기원의 마그마였지만 혼염 정도가 서로 다르다고 하였다. 이와 같이 경상분지 화산암으로 연구한 많은 결과는 동일 기원의 마그마가 서로 다른 혼염의 정도에 의하여 성분상 차이가 난다고 하였다 (Yun *et al.*, 1994). 그러나 본 연구에서는 경상분지 화산암이 BA화산암 및 DR화산암으로 구분될 수 있다는 가능성을 제시하였고, 최근 연구 (황상구,

1996; Jwa, Park, 1996; Koh, Chang, 1996)들에서 서로 다른 화산 활동을 이야기하고 있다.

설입에 관련된 화산 작용에 대해 삼성분 모델이 가정된다 (Ellam, Hawkesworth, 1988; Stern, Kilian, 1996; Weaver, Tarney, 1984). 그들은 현무암질 해양지각과 설입되는 육성 퇴적물, 맨틀 지의 물질이다. 맨틀 웃지의 물질은 중앙해령현무암 (MORB)의 기원물질과 성분원소 및 동위원소 성분이 유사하게 가정된다. 설입과 관련된 화산체에서 관찰되는 동위원소 및 화유원소 변화는 이들 성분들의 혼합을 반영한다. 또한, 상승하는 마그마의 성분은 분별결정작용과 MASH (Hildreth, Moorbat, 1988) 와 AFC 과정 (DePaolo, 1981)을 통한 대륙 지각의 혼염으로 수정된다. 화산암을 형성시킨 마그마의 성인 고찰은 균원 성분, 상승 과정에 겪는 혼염의 과정 등이 시간적 · 공간적 관계와 함께 토의되어야 한다.

김규한, 이진수 (1993)는 경상분지 전체의 화산암을 표집 분석하여 상부맨틀의 부분용융으로 안산암질 마그마를 형성하였다고 하였으며, Hwang, Kim (1994b)은 밀양-양산지역의 백악기 화산암류의 성인을 상부맨틀의 부분용융으로 들었다. Yun *et al.* (1994)은 부산의 화산암류가 상부맨틀의 페리도타이트가 약 20~30% 부분용융하여 생성된, 보다 염기성의 초생마그마가 어느 정도 분별결정작용이 진행된 후, 안산암질 모마그마가 형성되었고, 이 모마그마로부터 계속적인 분별결정작용이 진행되고 지각 물질과 동화작용을 겪으면서 마그마가 혼염되면서 진화하여 형성되었다고 하였다.

Green, Ringwood (1968)는 설입된 해양저 현무암이 예클로사이트로 전환하면서 직접적인 부분 용융에 의하여 여러 호 지역에서 나타나는 칼크-알칼리 화산암을 형성한다고 하였다. 그러나, Gill (1981)의 지화학적 연구는 대부분의 칼크-알칼리 화산암들이 설입된 중앙해령현무암 (MORB)의 직접적인 부분용융에 의한 것이 아닐 것 같다고 하였다. 또한, Kay (1980)는 호의 마그마는 결핍된 페리도타이트의 단순한 용융체로서는 될 수 없다고 하였다. 그렇지만, 설입대 마그마작용에 관한 Defant, Drummond (1990)의 연구는 칼크-알칼리 안산암과 데사이트의 생성에 슬랩 용융의 중요한 역할을 다시 고려하였다. Kay (1980)는 설입 슬랩의 퇴적물과 설입층 2의 변질된 부분은 Ba, Sr (그리고 Pb)의 부화를 일으키는 논리적 원천이라 하였다. BA화산암에 부화한 이들 원소는 암석 성인에서 설입 슬랩의 영향이 중요함을 시사한다.

Fig. 5d에서 DR화산암은 BA화산암에 비하여 거의 일정한 K/Yb 값을 가진다. 맨틀 용융 중에 이들 성분들은 유사한 불호정도를 가지기 때문에 K/Yb 비는 부분용융으

로 분별되지 않는다. K₂O의 넓은 범위를 설명하기 위하여 설입 슬랩 성분을 고려한다면 상당한 양의 LILE가 나타나야 한다 (McDermott *et al.*, 1993). LILE와 LREE는 유체의 의해 매우 쉽게 이동되며 (Kogiso *et al.*, 1997) 이는 BA화산암에서 부화되어 있다. 또한 호 마그마에서 흔히 균원 지역에서의 슬랩 유래 유체와의 상호 작용에 의한 수정으로 LILE에 상대하여 HFSE이 결핍된다고 하였다 (Cribb, Barton, 1997; Nicholls, Ringwood, 1973; McCulloch, Perfit, 1981; Gill, 1984). Tatsumi *et al.* (1986)은 설입 해양 암전의 탈수가 합수성 유체를 만들고 이는 균원 지역에 LILE를 쉽게 전달시킨다는 실험적 근거를 제공하였다. 또한 이런 유체 내의 HFSE의 상대적인 낮은 용해성이 유체로 수정된 균원 지역의 특징적으로 큰 LILE/HFSE 비를 만든다고 하였다. HFSE의 결핍은 BA화산암과 DA화산암에 모두 나타나는 호 마그마의 특징이지만, BA화산암에 나타나는 결핍의 정도는 DR화산암에 비해 유체의 영향을 더욱 많이 받았음을 시사한다.

Ta/Yb 비는 균원마그마 내의 석류석을 고려하지 않는다면 부분용융이나 분별 작용의 정도에 영향을 입지 않기 때문에 모체 지화학의 지시자로 유용하며 (Garland *et al.*, 1996), 전술한 바와 같이 본역 화산암을 생성시킨 마그마에서 석류석의 분별결출작용은 중요하지 않다. Fig. 5d에서 BA화산암은 Ta/Yb 비가 일정할 때 K/Yb 비는 분산되어 나타나고, 이는 BA화산암에 균원에 설입 슬랩 유체가 다양한 정도로 관여했다는 것을 지시한다 (e.g., McCulloch, Gamble, 1991). SiO₂ 함량에 따른 Al₂O₃의 관계도에 본역의 화산암을 물에 불포화된 현무암과 물에 포화된 현무암의 용융체를 함께 나타내었는데 (Fig. 3c; Helz, 1976; Spulber, Rutherford, 1983), BA화산암은 낮은 물함량을 지니는 현무암의 부분용융과 일치하지만 대부분이 Al₂O₃의 함량이 많은 영역에 도시된다 (Fig. 3c; A). 이는 BA화산암을 형성시킨 균원마그마에 슬랩의 유체가 중요하다는 것을 시사한다 (Thy *et al.*, 1990). 맨틀 내에서 설입 슬랩에서 빠져나온 유체의 양이 많으면 부분용융의 정도를 크게 한다 (Francaranci *et al.*, 1993; Vukadinovic, 1995). La는 Sm에 비하여 단사휘석에 대한 분배 계수가 낮기 때문에 La/Sm 비는 부분용융의 정도를 나타낼 수 있다 (Fig. 5a). 이에 따르면 BA화산암은 DR화산암에 비하여 더욱 많은 정도의 부분용융으로 형성되었다. 이와 같은 BA화산암의 부분용융의 정도가 커서 물에 포화된 현무암 (Fig. 3c; B)보다 SiO₂의 함량이 낮아진 것으로 사료된다. Fig. 10에서 DR화산암은 좁은 범위의 부분용융율을 보이고 BA화산암은 넓은 범위의 부분용융율을 보인다. BA화산암의 반정조합에서 감람석, 단사

휘석, 사방휘석, 사장석이 모두 관찰되는데 이는 20~25%의 부분용융을 지시한다 (e.g., Mysen, Kushiro, 1977; Jaques, Green, 1980). BA화산암이 DR화산암에 비하여 다양한 정도의 부분용융으로 형성되었음을 Fig. 9a에서도 살펴볼 수 있다.

해양 현무암은 섭입이 진행되면서 열과 압력의 영향으로 각섬암, 에클로자이트로 변성되며 탈수 현상이 일어나고, 탈수되어 빠져나온 유체성분은 맨틀엣지의 부분용융을 일으키게 된다. Gill (1981)의 상관도 (Fig. 9a)에서 BA화산암은 DR화산암에 비하여 분산되어 나타나며 이는 BA화산암의 근원마그마가 다양한 정도의 부분용융율과 성분을 가졌다는 것을 나타낸다. 부분용융의 양은 불호정성원소 즉 K, Rb, Ba±Th의 양을 변화시킬 수 있다 (Miller *et al.*, 1992). 해구에 가깝고 신장력이 작용하는 환경에서 해양 지각의 열개 부분에 충만한 유체 성분은 부분용융의 정도를 크게 할 수 있고, 상대적으로 해구에서 면 압축력이 작용하는 환경에서 적은 유체 성분이 부분용융의 정도를 적게 만든다 (Kay *et al.*, 1982). 부분용융이 적게 진행되면 낮은 이온포텐셜을 갖는 불호정성원소 Sr, K, Rb, Ba±Th의 양이 N-type MORB에 비해 부화된다 (Basaltic Volcanism Study Project, 1981; Pearce, 1982; Morris, Hart, 1983; Smith *et al.*, 1996). 호정성원소 대 불호정성 원소의 관계도는 부분용융과 분별정출작용의 효과를 구분할 수 있고 (Gill, 1981; Pearce, 1982; Martin, 1987) 부분용융과 분별정출작용에 의해 생성된 마그마는 아주 다른 경향을 갖는다 (Cocherrie, 1986). Fig. 10에 호정성을 갖는 Ni (Fig. 10a)과 Co (Fig. 10b), 불호정성을 갖는 Ba (Fig. 10c)를 함께 나타내었다. BA화산암은 $\log(\text{Ni})=f(\log(\text{Ba}))$ (Fig. 10d) 및 $\log(\text{Co})=f(\log(\text{Ba}))$ (Fig. 10e) 도표에서 다양한 정도의 부분용융에 의해 형성된 것이며, DR화산암은 부분용융의 정도는 제한되나 주로 분별정출작용에 의해 형성된 화산암임을 나타낸다.

전술한 바와 같이 DR화산암은 장석의 현저한 분별결정작용을 겪었다 (Table 1; Figs. 3f, 4a, 4c, 6b). 안산암질 마그마에서 단사휘석이나 각섬석의 분별은 SiO_2 함량이 증가함에 따라 Sm/Yb 비를 변화시키지 않지만 ($D_{\text{Sm}}=D_{\text{Yb}}$; Hanson, 1978; Green, Pearson, 1985a, b) 사장석의 분별은 Sm/Yb 비를 증가시킨다 ($D_{\text{Sm}}>D_{\text{Yb}}$; Rollinson, 1993). DR화산암의 Sm/Yb 비는 분화가 된 암석일수록 더 낮은 것을 볼 수 있는데 (Fig. 4f) 이는 사장석의 분별정출작용만으로는 설명할 수 없고, DR화산암에 HREE가 높게 농집된 부성분광물의 영향 혹은 낮은 HREE 함량을 지닌 지각 용융체의 동화작용을 고려할 수 있다

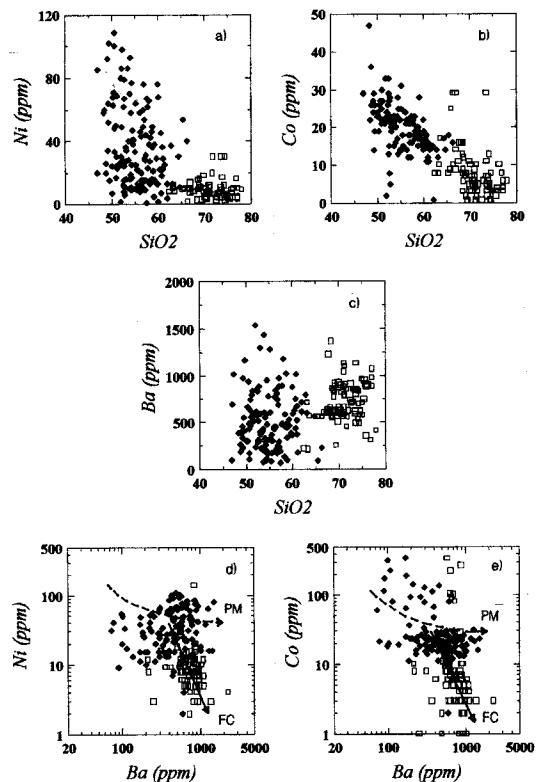


Fig. 10. Diagrams showing the compatible behaviour of Ni (a) and Co (b) and the incompatible nature of Ba (c) in the BAV and DRV. The $\log(\text{Ni})=f(\log(\text{Ba}))$ (d) and $\log(\text{Co})=f(\log(\text{Ba}))$ (e) diagrams clearly show that the BAV were generated by partial melting (PM) mechanisms and DRV were differentiated by fractional crystallization (FC) processes. Symbols as in Fig. 2.

(Feeley, Davidson, 1994).

LILE은 혼염에 의해서도 부화된다. Ce_N/Sm_N 비에 대한 Ce_N 의 상관도 (Fig. 9b)에서 분별정출작용이 진행됨에 따라 BA화산암에 비해 DR화산암에 혼염의 효과가 더욱 잘 나타남을 볼 수 있고 (e.g., Francis *et al.*, 1980; Thirlwall, Graham, 1984), DR화산암에 나타난 지각물질의 혼염 및 동화작용은 Al_2O_3 의 함량을 상대적으로 높인 것으로 사료된다 (Fig. 3c). 황상구 (1996)는 Sr동위원소 자료를 이용하여 양산 지역의 고규질유문암질암의 지각 혼염의 가능성을 보고하였다. BA화산암에 비해 상승하기 어려웠던 DR화산암의 근원마그마는 고준위 마그마류를 만들었던 그렇지 않았던 지각에 머무른 기간이 길었고, 이 과정에서 지각물질의 혼염으로 유동성이 강한 원소의 변화가 있었을 가능성이 크다. 앞에서 논의한 바와 같이 DR화산암은 초기 맨틀 용융체로부터 분별되었으나 그 모체마그마는 맨틀 페리도타이트와 평형을 이룬 상태가 아

니었다. 페리도타이트와 평형 상태는 다음과 같다 (Perfit *et al.*, 1980): (1) Mg-수가 67보다 훨씬 크다. (2) Ni 함량이 100 ppm 이상 (3) 높은 H_2O 와 CO_2 의 함량 (4) 낮은 LILE 농집. 이들 기준들은 단지 5% 이하의 도호 안산암에 적용될 뿐으로 본역의 DR화산암이 맨틀 페리도타이트로부터 형성되었다고 한다면 마그마 혼합 또는 지각 혼염의 영향이 고려되어야만 한다 (Graham, Hackett, 1987). 이와 같이 DR화산암에서 나타나는 알칼리와 LREE 함량은 지각 혼염을 영향이 커던 것으로 해석된다 (Ewart, Stipp, 1968; Cole, 1982).

만일 균원마그마가 같으나 부분용융의 정도와 혼염의 효과에 의해 LILE가 부화되었다면 BA화산암에 비해 DR화산암은 부화 정도는 더욱 클 것이다. 그러나 BA화산암과 DR화산암의 스파이더 도표가 나타내는 유사한 경향 (Fig. 6a)은 BA화산암의 부분용융에 작용한 물의 영향을 고려하여야 설명이 가능하다. 이들 부화원소들은 이온 전위가 낮고 P_{H_2O} 에 의한 유동성이 크다. 이들의 부화는 섭입되는 대양지각으로부터 알칼리와 알칼리토류 원소를 갖고 있는 유체, 즉 물이 맨틀로부터 농집됨으로서 초래된다고 하였다 (Best, 1975). Romick *et al.* (1990)은 동부 알류산 아쿠탄 (Akutan) 화산암의 시간적인 광물 및 광물화학의 연구에서 짚은 암석일수록 점차 비함수성으로 변하거나 지각 내의 얇은 깊이에서 결정화되는 것 모두가 가능했다고 보고하였다. 이는 BA화산암의 생성에 유체가 많은 역할을 하였고, DR화산암은 고준위 마그마류로 정치하여 얕은 깊이에서의 저압 분별결정작용을 일으켰다는 고찰과 일치하는 결과이다.

BA화산암은 상부맨틀 페리도타이트가 약 20~25%의 부분용융으로 생겼다고 가정할 때 (Mysen, Kushiro, 1977; Jaques, Green, 1980; Yun *et al.*, 1994) 초생마그마는 70 km 깊이에서 생성될 수 있다 (Wilson, 1989; Fig. 3. 25). Liu *et al.* (1996)의 실험 연구에 의하면 짚은 해양 암권이 섭입하였을 때, 호 마그마는 70 km보다 더 얕은 깊이에서도 섭입 해양 지각의 부분용융이 가능하며, 열적으로 성숙된 해양 지각은 100 km보다 얕은 깊이에서 부분용융을 할 수 있다고 하였다. 70 km 깊이에서 섭입슬랩으로부터 빠져나온 유체는 수평적으로 맨틀엣지로 이동하고 (e.g., Furukawa, 1993; Turner, Hawkesworth, 1997) 고상온도에 이르렀을 때 부분용융이 개시되었고 초생마그마를 만들었을 것이다. 이와 같은 기구로 만들어진 초생마그마가 부력적으로 곧바로 상승하였다면 섭입 슬랩으로부터 100~150 km의 위에 화산전면부 (volcanic front)가 놓인다는 것과 (Gill, 1981; Hasegawa *et al.*, 1991) 조화적이다. BA화산암의 초생마그마는 비교적 쉬운 통로를 따라

상승하여 혼염의 영향을 적게 입었으며, 감람석, 단시휘석 등이 현저한 분별결정작용을 겪고 현무암질에서 안산암질의 BA화산암을 분출시켰다.

탈수반응에 의해 빠져 나온 물은 도호의 마그마 성인에 중요한 역할을 하고, 물을 0.4% 함유한 페리도타이트의 고상선은 80~125 Km 깊이에서 맨틀 엣지의 지온보다 (Anderson *et al.*, 1980) 더 낮은 온도를 나타낸다 (Wyllie, 1982). 이 깊이에서 페리도타이트의 부분용융이 일어나며, 페리도타이트의 직접적인 부분용융으로 DR화산암의 초생마그마가 생성되었을 것이다. 이 마그마는 두꺼워진 지각의 영향으로 맨틀과 지각의 경계 부근 혹은 지각에 정치되어 고준위 마그마류를 형성하였으며, 사장석의 현저한 분별작용과 지각 물질과의 혼염 및 동화작용 등을 겪은 더욱 산성의 데사이트에서 유문암질의 DR화산암을 분출시켰다.

결 론

경상분지의 백악기 화산암류는 생성 시기와 성분 및 암석조구조적 환경을 달리 하는 BA화산암과 DR화산암으로 구분된다. 주성분 산화물의 관계도, 주성분 및 미량원소, 희토류원소 (REE)의 함량 관계도에서 BA화산암과 DR화산암의 분포 영역이 뚜렷이 차이난다. Ce_N/Sm_N 대 Ce_N 도표에 의하면 DR화산암은 BA화산암의 직접적인 분별정출작용의 결과와는 거리가 멀고, 이에 DR화산암과 BA화산암을 생성시킨 모마그마가 상이함을 제안한다. BA 및 DR화산암은 모두 조산대 화산암에 속하며, 지구조 판별도에서 지판이 수렴하는 화산호 및 대륙연변호에 속한다. DR화산암이 BA화산암에 비해 더욱 진화된 조구적 영역 즉, 지판 내부에 가까운 영역에서 생성된 것이다.

반정조합 및 지화학적 자료는 BA화산암이 감람석과 단사휘석의 분별 정출작용, DR화산암은 장석의 분별 정출작용이 현저했음을 나타낸다. 또한 BA화산암은 섭입 슬랩 유체의 영향을 많이 입고 있으며, 슬랩 유체는 위에 놓인 상부 맨틀의 부분 용융의 정도를 크게 만들었다. BA화산암의 LILE의 부화는 슬랩 유체의 영향으로 사료된다. DR화산암에 비하여 얕은 깊이 (70~100 km)에서 섭입 슬랩 및 상부 맨틀 페리도타이트의 부분 용융으로 만들어진 초생마그마는 비교적 쉽게 상승하였다. DR화산암은 BA화산암에 비하여 깊은 깊이 (80~120 km)에서 상부 맨틀 페리도타이트의 부분 용융에 의하여 생성된 마그마가 지각에 고준위 마그마류로 정치되어 사장석의 현저한 분별작용을 겪어 진화된 마그마로부터 생성되었으며, LILE의 부화는 BA화산암보다 적은 정도의 부분 용융의

영향과 지각에 정치하는 동안의 혼염 및 동화작용의 영향으로 해석된다.

사 사

본 연구는 전략광물자원 연구센터 (CMR)와 부산대학교 97년도 학술연구조성비(기성회)에 의해 지원되었으며, 이에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 김규한, 이진수 (1993) 경상퇴적분지 내에 분포하는 백악기 화산암류의 암석지구화학적 연구. *지질학회지*, 29권, p. 84-96.
- 김상욱 (1982) 북부 유천분지 내에 분포하는 후기 백악기 화산암류의 암석학적 연구. *서울대학교대학원 박사학위논문*, 133p.
- 김상욱 (1986) 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. *이상만 교수 송수기념논문집*, p. 167-194.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 김규한 (1988) 한국남부의 백악기 말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구 (II). *지질학회지*, 24권 특별호, p. 11-40.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1992) 한국남부의 백악기 말 이후의 화성활동과 광화작용에 관한 판구조론의 적용성 연구 (I). *광산지질*, 15권, p. 123-154.
- 신성천, 진명식 (1995) 한국 화산암 동위원소연대 지도 (1: 1,000,000)
- 윤성효, 상기남 (1994) 경상분지 남부의 백악기 화산암복합체의 콜드론구조 및 지질년대. *한국지구과학회지*, 5권, p. 376-391.
- 이상만, 김상욱, 진명식 (1987) 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의의. *지질학회지*, 23권, p. 338-359.
- 장난심 (1983) 경상분지 김해 진례환상지형구조에 관한 연구. *부산대학교교육대학원 석사학위논문*, 32p.
- 차문성, 윤성효 (1982) 부산시 일원의 백악기 화산활동, -특히 장산칼데라 잔존구조에 관하여. *부산대학교 자연과학논문집*, 34권, p. 377-390.
- 차문성, 윤성효, 안경건 (1985) 경상분지 동남부의 환상구조-채약산안암에 대하여. *부산대학교 자연과학논문집*, 40권, p. 337-346.
- 차문성, 윤성효, 황인호 (1984) 양산군 대운산합물체. *부산대학교 사대논문집*, 8권, p. 265-284.
- 최광선, 공영세, 이화경 (1993) 중력자료 해석에 의한 한반도 일원의 지각구조. *한국지구과학회지*, 14권, p. 225-230.
- 황상구 (1991) 유천소분지 중앙부의 백악기 화산암류의 암석학적 연구. *경북대학교대학원 박사학위논문*, 199p.
- 황상구 (1996) 양산칼데라에 관련된 화산암류의 암석학적 진화. *지질학회지*, 32권, p. 208-221.
- 황상구, 김상욱 (1995) 금성산 칼데라내 관입용결응회암의 유상구조 *지질학회지*, 31권, p. 456-466.
- Anderson, R.N., Delong, S.E. and Schwarz, W.M. (1980) Dehydration, asthenospheric convection and seismicity in subduction zones. *J. Geol.*, v. 88, p. 445-451.
- Arth, J.G. and Reston, Va. (1976) Behavior of trace element during magmatic processes -A summary of theoretical models and their applications. *Jour. Res. U.S. Geol. Survey*, v. 4, p. 41-47.
- Bacon, C.R. (1990) Calc-alkaline, shoshonitic, and primitive tholeiitic lavas from monogenetic volcanoes near Crater Lake, Oregon. *Jour. Petrol.*, v. 31, p. 135-166.
- Basaltic Volcanism Study Project (1981) Basaltic volcanism on the terrestrial planets. Pergamon Press, New York, 1286p.
- Batchelor, R.A. and Bowden, P. (1985) Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chem. Geol.*, v. 48, p. 43-55.
- Best, M.G. (1975) Amphibole-bearing cumulate inclusions, Grand Canyon, Arizona, and their bearing on silica-undersaturated hydrous magmas in the upper mantle. *Jour. Petrol.*, v. 16, p. 212-236.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C. (1984) The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arc and comments on magma sources. *Jour. Geol. Soc. London*, v. 141, p. 413-426.
- Cha, M.S. (1985) Ring structures in the south-eastern Kyeongsang basin (I). *The Journal, College of Education, Pusan National University*, v. 11, p. 369-386 (in Korean)
- Chang, K.H. (1995) Aspects of geologic history of Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 31, p. 72-90.
- Cocherie, A. (1986) Systematic use of trace element distribution patterns in log-log diagrams for plutonic suites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 50, p. 2517-2522.
- Cole, J.W. (1982) Tonga-Kermadec-New Zealand. In Thorpe, R.S. (ed.) Andesites: Orogenic andesites and related rocks. Chichester, New York, Wiley, p. 245-258.
- Cribb, J.W. and Barton, M. (1997) Significance of crustal and source region processes on the evolution of compositionally similar calc-alkaline lavas, Mt. Hood, Oregon. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 76, p. 229-249.
- DePaolo, D.J. (1981) Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 53, p. 189-202.
- 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 Drummond, M.S. (1993) Mount St. Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, v. 21, p. 547-550.
- Ellam, R.M., and Hawkesworth, C.J. (1988) Elemental and isotopic variations in subduction related basalt: evidence for a three component model. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 98, p. 72-80.
- Ewart, A. (1982) The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic-basaltic compositional range, in Thorpe, R.S. (ed.) Andesites: Orogenic andesites and related rocks. Chichester, New York, Wiley, p. 26-87.
- Ewart, A. and Stipp, J.J. (1968) Petrogenesis of the volcanic rocks of the Central North Island, New Zealand, as indicated by a study of Sr^{87}/Sr^{86} ratios, and Sr, Rb, K, U, and Th abundances. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 32, p. 699-736.
- Feeley, T.C. and Davidson, J.P. (1994) Petrology of calc-alkaline lavas at Volcán Ollagüe and the origin of compositional diversity at central Andean stratovolcanoes.

- Jour. Petrol., v. 35, p. 1295-1340.
- Feeley, T.C. and Harker, M.D. (1995) Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magma: An example from Volc n Ollag e, Andean Central Volcanic Zone. Jour. Geol., v. 103, p. 213-225.
- Francalanci, L., Taylor, S.R., McCulloch, M.T. and Woodhead, J.D. (1993) Geochemical and isotope variation in the calc-alkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea, Italy: constraints on magma genesis. Contrib. Mineral. Petrol., v. 113, p. 300-313.
- Francis, P.W., Thorpe, R.S., Moorbat, S., Kretzschmar, G.A., and Hammill, M. (1980) Strontium isotope evidence for crustal contamination of calc-alkaline volcanic rocks from Cerro Galan, northwest Argentina. Earth Planet. Sci. Lett., v. 48, p. 257-267.
- Furukawa, Y. (1993) Magmatic processes under arcs and formation of the volcanic front. Jour. Geophys. Res., v. 98, p. 8309-8319.
- Gamble, J.A., Smith, I.E.M., Graham, I.J., Kolelaar, B.P., Cole, J.W., Houghton, B.F. and Wilson, C.J.N. (1990) The petrology, phase relations and tectonic setting of basalts from the Taupo Volcanic Zone, New Zealand and the Kermadec Island Arc-Havre Trough, SW Pacific. Jour. Volcanol. Geotherm. Res., v. 43, p. 253-270.
- Garland, F., Hawkesworth, C.J. and Mantovani, M.S.M. (1996) Description and Petrogenesis of the Paran rhyolites, southern Brazil. Jour. Petrol., v. 36, p. 1193-1227.
- Gill, J.B. (1981) Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 390p.
- Gill, J.B. (1984) Role of underthrust oceanic crust in the genesis of a Fijian calc-alkaline suite. Contrib. Mineral. Petrol., v. 43, p. 29-45.
- Graham, I.J. and Hackett, W.R. (1987) Petrology of calc-alkaline lavas from Ruapehu volcano and related vents, Taupo Volcanic Zone, New Zealand. Jour. Petrol. v. 28, p. 531-567.
- Green, T.H. and Pearson, N.J. (1985a) Rare earth element partitioning between clinopyroxene and silicate liquid at moderate to high pressure. Contrib. Mineral. Petrol., v. 91, p. 24-36.
- Green, T.H. and Pearson, N.J. (1985b) Experimental determination of REE partition coefficients between amphibole and basaltic to andesitic liquids at high pressure. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 49, p. 1465-1468.
- Green, T.H. and Ringwood, A.E. (1968) Genesis of calc-alkaline igneous rock suite. Contrib. Mineral. Petrol., v. 18, p. 105-162.
- Hanson, G.N. (1978) The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth Planet. Sci. Lett., v. 38, p. 26-43.
- Hart, S.R. and Davis, K.E. (1978) Nickel partitioning between olivine and silicate melt. Earth Planet. Sci. Lett., v. 40, p. 203-219.
- Hart, S.R. and Dunn, T. (1993) Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. Contrib. Mineral. Petrol., v. 113, p. 1-8.
- Hasegawa, A., Hori, Z.S., Yamamoto, A. and Horiuchi, S. (1991) Deep structure of the northeastern Japan arc and its relationship to seismic and volcanic activity. Nature, v. 352, p. 683-689.
- Hawkesworth, C.J. and Ellam, R. (1989) Chemical fluxes and wedge replacement rates along recent destructive plate margins. Geology, v. 17, p. 46-49.
- Helz, R.T. (1976) Phase relations of basalts in their melting ranges at $P_{H_2O}=5$ kb. Part II. Melt compositions. Jour. Petrol., v. 17, p. 139-193.
- Hildreth, W. and Moorbat, S. (1988) Crustal contributions to arc magmatism in the Andes od Central Chile. Contrib. Mineral. Petrol., v. 98, p. 455-489.
- Hwang, S.K. and Kim, S.W. (1992) Silicic volcanism of Yangsan caldera, Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 28, p. 491-503 (in Korean).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W. (1994a) Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Milyang-Yangsan area, Korea: petrotectonic setting. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 30, p. 229-241 (in Korean).
- Hwang, S.K. and Kim, S.W. (1994b) Petrology of Cretaceous volcanic rocks in the Milyang-Yangsan area, Korea (II): petrogenesis. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 30, p. 563-577 (in Korean).
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. Jour. Earth Sci., v. 8, p. 523-548.
- Iyer, H.M. (1984) Geophysical evidence for the locations, shapes and sizes and internal structures of magma chambers beneath regions of Quarternary volcanism. Philos. Trans. R. Soc. London, A310, p. 473-510.
- Jaques, A.L. and Green, D.H. (1980) Anhydrous melting of peridotite at 0-15 Kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. Contrib. Mineral. Petrol., v. 73, p. 287-310.
- Jin, M.S. (1985) A relationship between tectonic setting and chemical composition of the Cretaceous granitic rocks in southern Korea. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 21, p. 67-73.
- Johnson, K.E., Harmon, R.S., Richardson, J.M., Moorbat, S. and Strong, D. F. (1996) Isotope and trace element geochemistry of Augustine volcano, Alaska: Implications foce magma evolution. Jour. Petrol., v. 37, p. 95-115.
- Jwa, Y.-J. and Park, J.-M. (1996) Petrology of the igneous rocks in the Gosung area, Gyeongsang basin, I. Major element geochemistry and K-Ar radiometric age. Econ. Environ. Geol., v. 29, p. 561-573 (in Korean).
- Kay, R.W. (1980) Volcanic arc magmas: implications of a melting-mixing model for element recycling in the crust-upper mantle system. Jour. Geol., v. 88, p. 497-522.
- Kay, S.M., Kay, R.W. and Citron, G.P. (1982) Yectonic controls on tholeiitic and calc-akaline magmatism in the Aleutian arc. Jour. Geophys. Res., v. 87, p. 4051-4072.
- Kim, J.S. (1990) Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in the southeastern part of Kyeongsang basin. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 26, p. 53-62 (in Korean).
- Kim, J.S. and Sung, J.G. (1996) Petrology of the Cretaceous volcanic rocks on Cheonsungsan area, Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, v. 5, p. 108-120 (in Korean).
- Kim, J.S. and Yun, S.H. (1993) Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in Pusan area, Korea. Jour. Petrol. Soc. Korea, v. 2, p. 156-166 (in Korean).

- Kim, J.S., Sung, J.G. and Lee, J.D. (1997) Geochemical characteristics and REE patterns of subduction-related Cretaceous volcanic rocks in the Kyeongsang Basin, Korea. *Jour. Czech Geol. Soc.*, v. 42, p. 11.
- Kim, S.W. and Lee, Y.G. (1981) Petrology and structural geology of the Late Cretaceous volcanic rocks in the Northeastern part of Yucheon Basin. *Jour. Korean Isn't. Mininh Geol.*, v. 14, p. 1-25 (in Korean).
- Kim, S.W., Lee, J.Y. and Kim, Y.K. (1993) Petrology of the Cretaceous andesitic rocks in Taegu-Jain area. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 29, p. 324-337 (in Korean).
- Kim, S.W., Lee, J.Y., Kim, Y.K. and Koh, I.S. (1991) Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in Southern Yuchon minor basin. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 27, p. 24-39 (in Korean).
- Kogiso, T., Tatsumi, Y. and Nakano, S. (1997) Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 148, p. 193-205.
- Koh, S.M. and Chang, H.W. (1996) Geological interpretation on the Cretaceous strata in the Haenam area, Chollanamdo, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 29, p. 381-393.
- Lee, H.K., Kim, S.J., Yun, H., Choi, W.C., Song, Y.S. and Itaya, T. (1993) K-Ar age of the Keumseongsan volcanic rocks and mineralization in the southeastern part of Euisung, Gyeongsangbuk-Do, Republic of Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 26, p. 445-454 (in Korean).
- Liu, J., Bohlen, S.R. and Ernst, W.G. (1996) Stability of hydrous phases in subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 143, p. 161-171.
- Martin, H. (1987) Petrogenesis of Archaean trondjemites, Tonalites, and granodiorites from Eastern Finland: major and trace element geochemistry. *Jour. Petrol.*, v. 28, p. 921-953.
- Mason, P.D.R., Downes, H., Seghedi, I., Szakca, A. and Thirlwall, M. F. (1995) Low pressure evolution of magmas from the Calimani, Gurghiu and Harghita Mountains, East Carpathian Arc. *Tectonophysics*, v. 106, p. 305-319.
- Mason, P.D.R., Downes, H., Thirlwall, M., F. Seghedi, I., Szakca, A., Lowry, D. and Mattey, D. (1996) Crustal assimilation as a major petrogenetic process in the East Carpathian Neogene and Quaternary continental margin arc, Romania. *Jour. Petrol.*, v. 37, p. 927-959.
- McCulloch, M.T. and Gamble, J.A. (1991) Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 102, p. 358-374.
- McCulloch, M.T. and Perfit, M.R. (1981) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and trace element constraints on the petrogenesis of Aleutian island arc magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 56, p. 167-169.
- McDermott, F., Defant, M.J., Hawkesworth, C.J., Maury, R.C. and Joron, J.L. (1993) Isotope and trace element evidence for three component mixing in the genesis of the North Luzon arc lavas (Philippines). *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 113, p. 9-23.
- Miller, D.M., Langmuir, C.H., Goldstein, S.L. and Franks, A.L. (1992) The importance of parental magma composition to calc-alkaline and tholeiitic evolution: evidence from Umnak island in the Aleutians. *Jour. Geophys. Res.*, v. 97, p. 321-343.
- Morris, J.D. and Hart, S.R. (1983) Isotopic and incompatible element constraints on the genesis of island arc volcanics from Cold Bay and Amak Island, Aleutians, and implications for a mantle structure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 47, p. 2015-2030.
- Myers, J.D., Marsh, B.D. and Sinha, A.K. (1986) Geochemical and Strontium isotopic characteristics of parental Aleutian arc magmas: evidence from the basaltic lavas of Atka. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 94, p. 1-11.
- Mysen, B.O. and Kushiro, I. (1977) Compositional variations of coexisting phases with degree of melting of peridotite in the upper mantle. *Am. Mineral.*, v. 62, p. 843-865.
- Münker, C. and Cooper, R.A. (1995) The island arc setting of a New Zealand Cambrian volcano-sedimentary sequence: implications for the evolution of the SW Pacific Gondwana fragments. *Jour. Geol.*, v. 103, p. 687-700.
- Nakamura, E., Campbell, I.H., McCulloch, M.T. and Sun, S.-S. (1989) Chemical Geodynamics in a back arc region around the Sea of Japan: implications for the genesis of alkaline basalts in Japan, Korea, and China. *Jour. Geophys. Res.*, v. 94, p. 4634-4654.
- Nicholls, I.A. and Ringwood, A.E. (1973) Effect of water on olivine stability in tholeiites and the production of silica-saturated magmas in the island arc environment. *Jour. Geol.*, v. 81, p. 285-300.
- Park, K.H. (1990) A down sag caldera associated with the Chisulryoung volcanic formation, near Kyeongju city, southern Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 26, p. 213-226.
- Pearce, J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In Thorpe, R. S. (ed.) Andesites: orogenic andesites and related rocks. Chichester, New York, Wiley, p. 525-548.
- Pearce, J.A. (1983) Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In Hawkesworth C.J. and Norry M.J. (ed.) Continental basalts and mantle xenoliths. Shiva, p. 230-249.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrol.*, v. 25, p. 956-983.
- Perfit, M.R., Gust, D.A., Bence, A.E., Arculus, R.J. and Taylor, S.R. (1980) Chemical characteristics of island-arc basalts: implications for mantle sources. *Chem. Geol.*, v. 30, p. 227-256.
- Powell, M. (1978) Crystallisation conditions of low-pressure cumulate nodules from the Lesser Antilles island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 39, p. 162-172.
- Reedman, A.J., Park, K.H. and Evans, J.H. (1989) The age of granitoid intrusions and related mineralization in the Chisulryoung Mountain Area, south-east Korea: constraints on the age of the Chisulryoung volcanic formation and Yucheon Group volcanism. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 25, p. 51-58.
- Rollinson, H. (1993) Using geochemical data. John Wiley & Sons, 352p.
- Romick, J.D., Perfit, M.R., Swanson, S.E. and Shuster, R.

- D. (1990) Magmatism in the eastern Aleutian Arc: temporal characteristic of igneous activity on Akutan Island. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 104, p. 700-721.
- Saunders, A.D., Norry, M. and Tarney, J. (1991) Fluid influence on the trace element compositions of subduction zone magmas. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A335, p. 337-392.
- Smith, T.E., Thirlwall, M. F. and Macpherson, C. (1996) Trace element and isotope geochemistry of the volcanic rocks of Bequia, Grenadine Islands, Lesser Antilles arc: a study of subduction enrichment and intra-crustal contamination. *Jour. Petrol.*, v. 37, p. 117-143.
- Sparks, R.S.J., Huppert, H.E. and Turner, J.S. (1984) The fluid dynamics of evolving magma chambers. *Philos. Trans. R. Soc. London*, A310, p. 517-534.
- Spulber, S.D. and Rutherford, M.J. (1983) The origin of rhyolite and plagiogranite in oceanic crust: an experimental study. *Jour. Petrol.*, v. 24, p. 1-25.
- Stern, C.R. and Kilian, R. (1996) Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic zone. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 123, p. 263-281.
- Strong, D.F. and Hammer, S.K. (1981) The leucogranites of southern Brittany: Origin by faulting, frictional heating, fluid flux and fractional melting. *Can. Mineral.*, v. 19, p. 163-176.
- Tatsumi, Y., Hamilton, D.L. and Nesbitt, R.W. (1986) Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high pressure experiments and natural rocks. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 29, p. 293-309.
- Thirlwall, M.F. and Graham, A.M. (1984) Evolution of high-Ca, high-Sr, C-series basalts from Granada, Lesser Antilles: the effects of intra-crustal contamination. *Jour. Geol. Soc. London*, v. 141, p. 427-445.
- Thompson, A.B. (1992) Water in the Earth's upper mantle. *Nature*, v. 358, p. 295-302.
- Thy, P., Beard, J.S. and Lofgren, G.E. (1990) Experimental constraints on the origin of Icelandic rhyolites. *Jour. Geol.*, v. 98, p. 417-421.
- Turner, S. and Hawkesworth, C. (1997) Constraints on flux rates and mantle dynamics beneath island arcs from Tonga-Kermadec lava geochemistry. *Nature*, v. 389, p. 568-573.
- Vukadinovic, D. (1995) High-field-strength elements in Javanese basalts and chemical layering in the mantle wedge. *Mineral. Petrol.*, v. 55, p. 293-308.
- Weaver, B.L. and Tarney, J. (1984) Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, v. 310, p. 575-577.
- Wilson, M. (1989) Igneous petrogenesis. Unwin Hyman, London, 466p.
- Winchester, J.A. and Floyd, P.A. (1977) Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element. *Chem. Geol.*, v. 20, p. 325-343.
- Wood, D.A. (1980) The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 50, p. 11-30.
- Wyllie, P.J. (1982) Subduction products according to experimental prediction. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 93, p. 468-476.
- Yun, S.H. (1988) Development and the structure of its cauldron of the Hwasan rong igneous complex, northern Kyeongsang basin, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 24, p. 267-288 (in Korean).
- Yun, S.H. (1993) Volcanic activity and cauldron structure of the Geumseongsan Volcanic Complex. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 29, p. 309-323 (in Korean).
- Yun, S.H., Kim, J.S. and Kim, Y.L. (1994) Petrology of the Cretaceous volcanic rocks in Pusan area, Korea (II): -petrogenesis and tectonic setting-. *Jour. Korean Earth Science Society*, v. 15, p. 356-365 (in Korean).
- Yun, S.H., Koh, J.S. and Kim, Y.L. (1996) Petrology of the Cretaceous andesitic rocks in southern Pusan area. -with special reference to Songdo-Tadaepo area. *Jour. Korean Earth Science Society*, v. 17, p. 472-488.