

한반도 남동부일원의 암맥군에 관한 지화학적 연구

김진섭* · 김종선 · 손문

부산대학교 지질학과

Geochemical Study of Dyke Swarms, SE Korea

Jin-Seop Kim*, Jong Sun Kim and Moon Son

Department of Geology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

요약: 한반도 남동부에서 관찰된 총 287개 암맥들의 암석기재와 지화학적 자료들로부터 그 특성과 기원 마그마의 진화 경로를 밝히고자 하였다. 암맥들은 야외에서 염기성, 중성, 산성 암맥군으로 분류되며, 다시 염기성 암맥은 3개 그룹, 중성 암맥은 2개 그룹, 산성 암맥은 2개 그룹으로 각각 재분류된다. 이 중 염기성 암맥의 그룹(I)에 해당하는 암맥들이 연구지역에 가장 우세하게 산출되는데, 이들은 연일구조선을 경계로 하여 양쪽에 모두 분포하며 동일한 암석기재학 그리고 지화학적 특징을 보여주었다. 이는 선행 연구에서 밝혀진 바와 같이 연일구조선 양편의 암맥들이 모두 동시기에 만들어졌음을 의미하며 연일구조선이 마이오세 지각변형기 동안 지구의 시계방향 수평 회전운동을 규제한 주요 구조선이었음을 강력히 지지한다. 암맥들의 지화학적 특징들은 암석기재적으로 분류한 7개 그룹에 따라 서로 잘 구분되었다. 염기성, 중성, 산성 암맥들은 각각 현무암과 현무암질 안산암, 안산암과 테사이트 그리고 유문암에 해당되며, 마그마 계열은 대부분 칼크-알칼리 계열에 해당된다. 지화학 자료는 염기성 암맥들에서 감람석, 단사회석, 사장석의 분별정출 작용이 있었음을 지시하며, 특정 원소들의 함량과 조구조 판별도에서는 연구지역 암맥들이 지판의 침강 섭입과 관련된 마그마로부터 유래되었고 그 조구조 환경이 조산대 화산호와 관련이 있음을 보여주었다.

주요어: 한반도 남동부, 암맥군, 연일구조선, 마이오세, 화산호

Abstract: We attempted to show the evolution of the magma and the geochemical characteristics of dikes and dike swarms by using the petrographic and geochemical data from 287 dikes, SE Korea. The dikes can be divided into mafic, intermediate, and felsic dikes in the field. And each of them is subdivided into three groups, two groups, and two groups, respectively. The group (I) among the mafic dikes most pervasively occurs and are distributed in both sides of the Yeonil Tectonic Line (YTL), which petrographic and geochemical characteristics are the same. These facts thus, strongly support the results of the previous studies which showed that they were intruded contemporaneously and that YTL was a main tectonic line which restricted the crustal clockwise rotation during the Early Miocene. The geochemical characteristics are discriminated according to the seven groups divided petrographically. The mafic, intermediate and felsic dikes belong to basalt and basaltic andesite, andesite and dacite, and rhyolite, respectively, and the magmas mostly belong to calc-alkaline series. The geochemical data indicate that there were the fractional crystallizations of olivine, clinopyroxene, and plagioclase in the mafic dikes. And the content of characteristic elements and tectonic discrimination diagrams show that the dikes were formed from the magma related to the subduction of plate and that the tectonic setting was related to orogenic volcanic arc.

Key words: SE Korea, Dike swarms, Yeonil Tectonic Line, Miocene, volcanic arc.

서 언

한반도 남동부 경상분지에서 발생한 화산 및 침성활

동은 백악기 이후 한반도 지각 변천사를 이해하는데 중요한 연구 대상이다. 백악기~고제3기 화성활동에 관한 연구는 활발하여 원종관(1968), 김상욱(1982), 이상

*Corresponding author: Tel. 82-51-510-2253, E-mail. jsekim@pusan.ac.kr

만 외(1987), 김진섭(1990), 황상구와 김상욱(1994), 이미정 외(1995), 이준동과 황병훈(1999) 등이 있으며, 1980년대 이후 기기분석 기술이 발달함에 따라 다양한 지화학적 자료들이 수집되어 그 기원 마그마의 특성과 분화양상에 관한 해석이 수행되어 왔다. 그러나 불국사화강암류의 관입 이후의 신생대 화산활동에 관한 연구는 일부 선행 연구(윤성호 외, 1994; 위수민과 이선구, 1999)를 제외하고는 부족한 실정인데 특히, 당시의 지구조 환경과 지각 변형에 따른 마그마 활동을 이해하는데 있어 중요한 단서를 제공하는 암맥과 암맥군(dike swarm)에 관한 지화학적 연구는 현재로서는 찾아보기 어렵다.

경상분지 동부에는 특징적인 방향을 갖는 수조의 단층선(모량, 양산, 동래, 울산단층 등)이 발달하는데 이들 단층의 운동사를 근거로 동해의 성인을 비롯한 신생대의 지각 변형사에 관한 논의가 근래에 활발히 진행되고 있다. 동해의 확장과 관련한 제3기 지각변형 과정에서 경상분지 동부에는 지각에 균열이 발생하여 퇴적 분지의 생성과 데사이트와 현무암질 암석으로 대표되는 이원성(bimodal) 화산활동이 발생하였으며(한중환 외, 1987; Yoon, 1991, 1997; 김인수, 1992; 손문, 1998), 신장 균열을 따라서 일정한 방향성을 가지는 암맥군들이 관입하였다(손문 외, 2002a, 2002b). 이 암맥군들의 관입 메커니즘은 경상분지 내의 신생대 화성활동사를 밝히는데 중요한 열쇠가 될 수 있으며, 특히 염기성 암맥군에 관한 연구는 이들의 기원이 되는 맨틀의 진화를 살펴보는 데 유용한 단서를 제공할 수 있다.

이번 연구는 신생대 동안 지각변형이 가장 활발하였던 울산단층에서 동편 해안선까지의 지역(Fig. 1)에서 관찰된 총 287개 암맥들을 연구 대상으로 하였다. 한편, 본 연구에 앞서 선행된 손문 외(2002a)에서는 이들 암맥들의 연령, 야외 산상 그리고 관입면 방향성과 공간적 분포 양상을 근거로 주요 단층 운동과 암맥들의 형성 그리고 당시의 고응력장이 검토된 바 있다. 그 결과, 연구지역 염기성 중성 암맥은 대부분 동해가 활발히 확장되던 시기인 전기 마이오세(약 17 Ma 이전)의 지각 변형기 동안 만들어진 신장 균열들을 통로로 관입하였으며, 한반도 동남부 마이오세 지각변형의 서쪽 한계선인 연일구조선을 경계로 서부지역과 경계지역 그리고 동부지역의 화강암체에서 관찰된 각 암맥들의 평균 관입면 주향방향은 동쪽으로 갈수록 시계방향으로 회전됨이 밝혀졌다. 따라서 이번 연구에서는 암석기재와 지화학적 특징을 수집하여 이를 근거로 암맥들을 분류하고 이들의 기원 마그마의 진화 경로를 추적하였으며 연일구조선 양편의 암맥들이 동일한 마그

마 기원의 것들인지를 밝히는데 초점을 맞추고자 한다.

지질 개요

연구지역의 지질은 하부로부터 백악기 경상누층군의 하양층군과 유천층군, 백악기~고제3기 불국사화강암류와 왕산석영안산암질화산암류, 전기 마이오세 범곡리층군과 장기층군, 그리고 중기 마이오세 초연일층군으로 구성된다(Fig. 1).

연구지역 하양층군은 울산도폭의 울산층, 대구도폭의 대구층, 마산도폭의 함안층에 대비되며, 녹색색 및 암회색을 띠는 사암과 셰일 그리고 소량의 응회질 사암, 역암, 이회암층으로 구성된다. 유천층군은 백악기 말엽에 관입 분출한 안산암류로써 후기에 불국사화강암류에 의하여 관입당한 것으로 알려져 있다(박양대와 유형대, 1968). 불국사화강암류는 주로 울산단층을 따라 분포하는데 암상에 따라 흑운모화강암과 화강섬록암으로 구분되기도 한다(이미정 외, 1995; 이준동과 황병훈, 1999). 고제3기 왕산석영안산암질화산암류(윤선, 1988)는 주로 용결구조가 발달하는 데사이트질 화성쇄설암으로 구성된다. 제3기 마이오세 퇴적분지에는 전기 마이오세 동안에는 데사이트 혹은 현무암질 화산쇄설물과 육성 퇴적물이 퇴적되었으며 이후 중기 마이오세 초에는 화산 물질을 포함하지 않은 육성 혹은 해성 퇴적물이 충전되었다(윤선, 1988; Yun *et al.*, 1997; 손문, 1998). 전기 마이오세의 것은 범곡리층군과 장기층군으로 구분되고 있으나 연구자에 따라 각 층군의 정의가 차이가 있으며 현재까지 두 층군의 상대적 지질 시대에 관한 논란이 계속되고 있다(Tateiwa, 1924; 윤선, 1988; Yun *et al.*, 1997; 손문, 1998; 손문 외, 2000).

한편, 신생대 마이오세 지각변형기 동안 한반도 남동부에는 북서·남동방향의 지각 확장과 함께 북동방향의 정단층과 북북서방향의 우수향 주향이동단층들로 구획된 지구 내지 반지구형 퇴적분지들이 만들어졌다(Fig. 1). 이 과정에서 분지 기반암과 충전물의 층리면이 대부분 북서방향으로 경동(tilting)되었으며 젊은 지층일수록 그 경사각이 알아지는 경향을 보인다(손문과 김인수, 1994; 손문, 1998; Son *et al.*, 2000; 손문 외, 2000, 2002b). 또한 단층으로 구획된 지괴들은 시계방향으로 수평 회전되는 사건을 겪었으며 이러한 회전운동을 규제한 주요 지구구조선은 울산단층선 동편 약 5 km에 위치한 연일구조선인 것으로 알려져 있다(손문, 1988; 김인수 외, 1998; 손문 외, 2002a, 2002b).

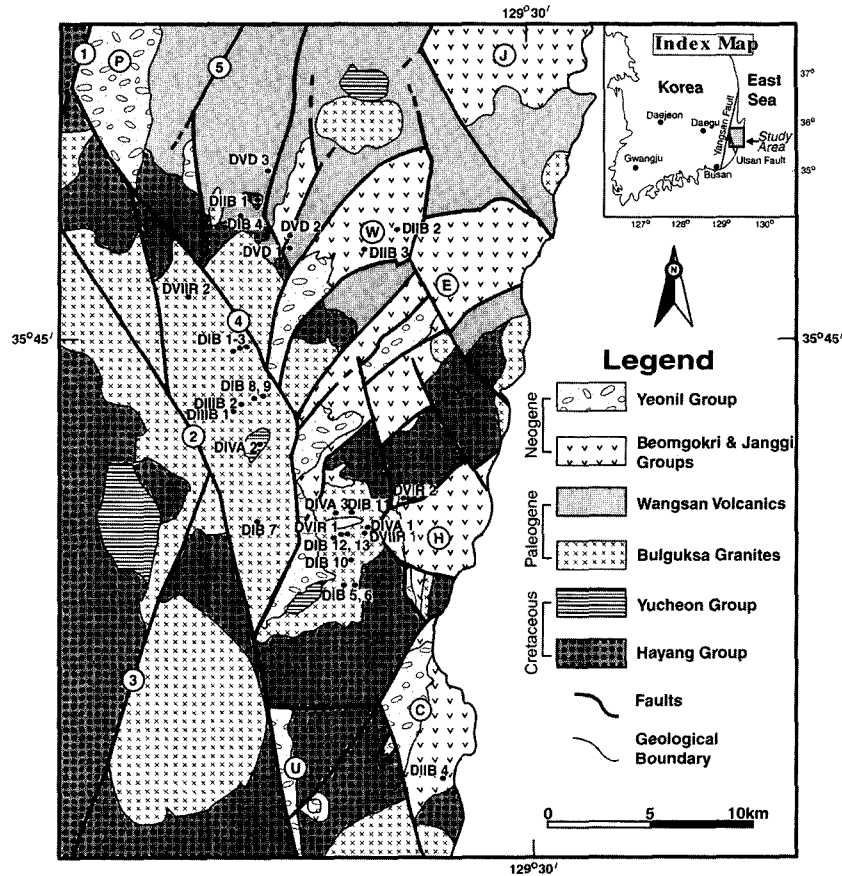


Fig. 1. Geological and sampling sites map of the study area (after Son *et al.*, 2002a). Faults ①: Yangsan Fault, ②: Ulsan Fault, ③: Dongnae Fault, ④: Yeonil Tectonic Line (YTL), ⑤: Ocheon Fault. Tertiary Miocene basins ⑩: Ulsan Basin, ⑨: Jeongja Basin, ⑧: Haseo Basin, ⑦: Eoil Basin, ⑥: Waeub Basin, ①: Janggi Basin, ②: Pohang Basin.

암석기재학적 특징

암맥들은 풍화에 약하며 세립질 혹은 유리질인 기질 부가 대부분이기 때문에 육안으로 암석을 정확히 분류하기에는 어려움이 많다. 따라서 야외에서는 암석의 색 지수 그리고 식별이 가능한 반정들을 근거로 암맥들을 염기성, 중성 그리고 산성 암맥으로 먼저 구분하였다. 이들 중 신선하고 대표적인 암상을 보이는 40여 개의 암맥 시료를 채취하여 현미경 관찰을 실시하였으며 조직과 구성 광물들을 관찰하였다. 암맥의 노두 사진과 경하 사진은 선행 연구(손문 외, 2002a)를 참고하기 바란다.

염기성 암맥

이번 조사에서 가장 많은 숫자인 총 266개가 관찰

되었다. 이들 암맥은 제3기 분지의 기반암인 하양층군, 유천층군, 불국사화강암류 그리고 분지 충전물 중에 전기 마이오세 지층을 관입하고 있으나 중기 마이오세 초의 연일층군에서는 전혀 관찰되지 않는다. 모암의 종류와 산상을 근거로 하면, 염기성 암맥은 경상계 퇴적암과 불국사 화강암을 관입하고 있는 그룹(I), 전기 마이오세 암석들을 관입하고 있는 그룹(II), 그리고 그룹(I)과 야외 산상은 유사하나 현미경 하에서 특징적으로 융식된 석영 반정을 포함하는 그룹(III)으로 분류된다.

그룹(I) 암맥들은 대부분 암맥군의 형태로 산출되며 연구지역 암맥들 중에 출현 빈도가 가장 높다. 대부분 화강암을 관입하고 있으며 흑운모 화강암과 화강섬록암 모두에서 암상에 차이가 없이 비교적 고른 분포를 보인다. 연일구조선의 서쪽 감산사 계곡과 개곡리 일원 그리고 연일구조선의 동쪽 건대 마을 일원에서 가

장 출현 빈도가 높다. 경하에서 사장석, 감람석, 단사 휘석(cpx), 각섬석 반정들이 관찰되며 오피틱 또는 서브오피틱 조식을 보이고 있어 현무암 내지 현무암질 안산암 계열의 암석들이므로 판단된다. 구성 광물들 중 사장석(0.5~2 mm 정도의 크기)이 약 70%로 가장 우세하다. 0.1~1 mm 크기의 휘석, 각섬석, 흑운모 등의 유색광물들은 대부분 변질되어 있으며 0.1 mm 이하의 불투명 광물이 점분상으로 관찰되기도 한다. 일반적으로 사장석 반정은 결정 크기가 가장 크며 장방형의 외형을 보이나 누대는 관찰되지 않는다. 변질광물로는 녹니석, 녹염석, 견운모, 방해석 등이 나타난다. 연일구조선을 경계로 하여 서편과 동편의 화강암을 관입하고 있는 이들 암맥은 모두 동일한 조직과 광물 조합을 보여줌이 주목된다.

그룹(II) 암맥들은 대부분 야외에서 장방형의 사장석이 관찰되나 그 외 반정은 식별하기 어려웠다. 와옥분지 내에서 피더 암맥(feeder dyke)의 산상을 보이며 범곡리층군 용동리옹회암(손문 외, 2000)을 관입한 암맥의 경우에는 사장석, 감람석, 휘석 반정과 함께 극세립 내지 유리질 기질부를 보이는 전형적인 반상 조직을 보인다. 이 암맥은 유색광물의 함량이 낮으며 기반암을 관입한 것들에 비해 반정의 양이 상대적으로 적은 전간상(intersertal) 조직을 특징적으로 보여주었다. 정자분지(손문과 김인수, 1994) 내의 당사리 안산암과 하양층군 기반암 경계부에서 산출되는 암맥의 경우는 야외에서 기질부가 유리질로써 휘석반정이 야외에서 관찰되었다. 암맥의 폭은 약 15 m 내외이며 수평에 가까운 주상절리가 발달한다. 경하관찰에 의하면 사장석과 휘석 반정과 극세립 내지 유리질의 기질부를 가지는데 유색광물의 함량이 낮아 현무암질 안산암에서 안산암에 해당될 것으로 판단된다.

한편, 그룹(III)은 야외 산상은 그룹(I)과 거의 구별이 되지 않으나 경하 관찰에서 석영의 반정이 산출되는 것으로써 유색광물의 함량과 반정의 비율도 높은 것이 특징이다. 이들 암맥은 연일구조선 서쪽의 경주시 개곡리 일대에서 일부 관찰되는데 화학분석 자료 해석을 위하여 하나의 그룹으로 구분하였다.

중성 암맥

연일구조선 동편에서만 총 8개의 지점에서 관찰되었으며 모암과 암상에 따라 두개의 그룹으로 구분하였다. 먼저, 그룹(IV)는 화강암류만 관입한 암맥들로써 야외에서 밝은 녹회색을 띠며 세립질의 치밀한 암상과 거의 풍화를 받지 않은 것이 특징이다. 경하에서 사장석, 휘석, 각섬석 반정들과 취반상 조직이 관찰되며 기

질부는 주로 사장석과 휘석으로 구성되어 있어 안산암질 암석인 것으로 판단된다. 이 암맥은 이번 연구지역 외의 경상분지 화강암체들에서 흔히 관찰되는 암맥들과 매우 유사한 산상을 보이는 것으로 보아 이들 암맥의 관입은 경상분지 동부에 국한되어 발생한 신생대 마이오세 지각변형과 관계하는 것이 아니라 이보다 고기이며 또한 광역적인 지각변형과 관계할 가능성이 높다. 한편 경주시 양북면 범곡리 추령고개의 전기 마이오세 추령각력암(윤선, 1988)을 관입한 폭 1~3 m 내외의 암맥들을 그룹(V)로 분류하였다. 이들은 테사이트질 암석으로 판단되는데 기질부는 풍화가 심해 광물의 식별이 어려우나 야외와 경하에서 자형의 사장석, 석영, 흑운모의 반정들이 뚜렷이 관찰되는 반상 조직을 보이고 있어 그룹(IV)과 구별된다.

산성 암맥

연일구조선 동편과 서편에 총 13개의 암맥이 관찰되었다. 이들은 화강암류와 그 이전의 암석들을 관입하고 있으며 마이오세 암석들에서는 관찰되지 않는다. 야외에서 장석과 석영 반정들이 관찰되었으며 일부는 풍화된 표면에 유동구조가 관찰된다. 경하 관찰을 통해볼 때 이들은 유문암질 암석인 것으로 판단된다. 대부분 정장석, 석영, 사장석의 반정이 우세하게 관찰되며 다른 암맥들에 비해 사장석 반정의 양이 상대적으로 적다. 반정 주위로 석영과 유사한 입자가 선상 배열을 하고 있으며 기질부가 특히 풍화를 많이 받은 양상이다. 한편, 일부 암맥의 경우에는 유동구조가 잘 발달하는데 석영과 장석의 구과조직이 관찰되며 직경 1 mm 내외의 구과가 전체 면적의 70% 이상을 차지하기도 한다. 따라서 산성 암맥은 유동구조와 구과조직이 전혀 발달하지 않는 그룹(VI), 그리고 특징적으로 유동구조와 구과조직이 발달하는 그룹(VII)으로 분류하였다.

지화학적 특징

연구지역 암맥들은 앞서 기술한 암석기재적인 특징에 따라 7개의 그룹으로 분류하여 그 중 대표적인 시료 29개를 선별하여 화학분석을 실시하였다(Table 1). 7개의 그룹을 요약하면 먼저 염기성 암맥에서 경상계 퇴적암과 불국사 화강암을 관입하고 있는 (I), 전기 마이오세 암석들을 관입하고 있는 (II), (I)과 야외 산상과 지화학적 특징은 비슷하나 용식된 석영 반정을 포함하는 (III), 중성 암맥에서 화강암을 관입한 안산암질 암맥인 (IV)와 추령각력암을 관입한 테사이트질 암맥

Table 1. Major elements and CIPW normative mineral compositions of the dikes in the study area.

sample	DIB1	DIB2	DIB3	DIB4	DIB5	DIB6	DIB7	DIB8	DIB9	DIB10	DIB11	DIB12	DIB13	DIIB1	DIIB2
SiO ₂	46.77	49.36	51.70	51.46	55.99	52.66	50.42	49.48	50.15	53.98	49.86	51.44	47.82	47.38	53.68
TiO ₂	1.48	1.68	1.30	1.04	0.88	0.89	1.27	1.65	1.56	1.38	1.47	1.52	1.74	1.69	1.51
Al ₂ O ₃	17.36	16.00	16.93	15.35	16.55	16.12	16.84	15.69	15.38	16.69	16.39	17.00	16.52	15.49	15.51
Fe ₂ O ₃	12.08	10.69	9.71	8.36	7.39	7.44	9.71	9.98	10.70	8.16	9.92	9.70	10.64	10.27	11.28
MnO	0.32	0.23	0.20	0.18	0.24	0.22	0.20	0.20	0.25	0.18	0.26	0.15	0.20	0.24	0.33
MgO	8.24	5.59	5.70	7.52	4.82	5.94	6.18	6.30	5.46	3.04	6.36	5.06	6.36	5.90	3.54
CaO	7.61	5.73	7.19	7.49	5.89	5.11	4.93	5.69	5.22	4.18	7.43	3.24	7.23	7.17	7.88
Na ₂ O	1.52	3.81	3.37	2.76	2.95	3.10	3.57	3.17	4.58	5.05	2.91	4.08	2.56	2.95	3.50
K ₂ O	0.38	2.05	1.31	1.34	1.38	2.03	2.01	3.27	0.85	3.23	0.86	1.97	1.16	1.20	0.89
P ₂ O ₅	0.27	0.53	0.49	0.43	0.32	0.34	0.34	0.55	0.80	0.50	0.49	0.53	0.61	0.62	0.31
LOI	3.25	3.65	1.37	3.24	3.16	5.62	3.73	3.28	4.36	2.80	3.22	4.82	4.41	6.31	0.77
Total	99.28	99.32	99.27	99.17	99.57	99.47	99.2	99.26	99.31	99.19	99.17	99.51	99.25	99.22	99.2
Q	2.71	0.00	1.03	2.08	11.32	4.50	0.00	0.00	0.00	0.00	1.98	2.82	0.79	0.00	6.13
C	1.23	0.00	0.00	0.00	0.17	0.26	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	3.61	0.00	0.00	0.00
Or	2.37	12.79	7.98	8.32	8.52	12.88	12.56	20.33	5.35	19.96	5.35	12.41	7.30	7.71	5.40
Ab	13.52	33.97	29.33	24.49	26.03	28.10	31.87	28.16	41.15	44.59	25.85	36.73	23.03	27.08	30.34
An	38.09	21.59	27.97	26.77	28.56	25.07	23.74	19.84	20.06	13.89	30.57	13.82	32.05	27.64	24.56
Di	0.00	4.21	4.76	7.77	0.00	0.00	0.00	5.25	2.05	3.91	4.22	0.00	1.90	5.77	11.44
DiWo	0.00	2.14	2.43	4.01	0.00	0.00	0.00	2.69	1.04	1.97	2.16	0.00	0.97	2.95	5.71
DiEn	0.00	1.17	1.36	2.54	0.00	0.00	0.00	1.58	0.56	0.95	1.25	0.00	0.56	1.67	2.43
DiFs	0.00	0.90	0.97	1.21	0.00	0.00	0.00	0.98	0.45	0.99	0.80	0.00	0.37	1.15	3.29
Hy	35.41	9.25	22.81	25.36	21.05	24.64	20.79	5.65	19.09	3.95	25.37	23.71	27.12	23.43	15.64
HyEn	21.68	5.24	13.32	17.20	12.58	15.93	12.51	3.48	10.57	1.93	15.46	13.47	16.36	13.87	6.65
HyFs	13.73	4.01	9.49	8.16	8.47	8.71	8.28	2.17	8.51	2.02	9.91	10.23	10.76	9.56	9.00
OI	0.00	10.77	0.00	0.00	0.00	0.00	4.61	13.57	4.47	7.66	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00
OIFo	0.00	5.84	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67	8.04	2.37	3.55	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
OIFa	0.00	4.93	0.00	0.00	0.00	0.00	1.95	5.52	2.10	4.11	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00
Mt	3.10	2.84	2.47	2.15	1.88	1.94	2.52	2.66	2.83	2.17	2.60	2.60	2.87	2.83	2.85
Il	2.96	3.37	2.54	2.07	1.75	1.81	2.55	3.29	3.15	2.74	2.94	3.08	3.52	3.49	2.94
Ap	0.62	1.22	1.10	0.99	0.73	0.80	0.78	1.26	1.86	1.14	1.12	1.23	1.42	1.47	0.69
C.I.	41.47	30.43	32.58	37.34	24.67	28.40	30.47	30.42	31.59	20.42	35.13	29.38	35.41	36.11	32.88
D.I.	18.60	46.77	38.35	34.90	45.87	45.48	44.43	48.48	46.50	64.55	33.18	51.96	31.12	34.79	41.87

인 (V), 그리고 산성 암맥에서 유상구조와 구과조각이 없는 (VI)과 특징적으로 유상구조와 구과조각이 발달하는 (VII)로 구분된다. 주성분 원소와 미량 원소의 분석은 한국기초과학 지원연구원 서울분소에서 X-선 형광분광분석기(XRF)와 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 실시하였다. 전철의 양은 Fe₂O₃로 나타내었다.

주성분 원소

주성분 분석 결과와 CIPW 노름값은 Table 1과 같다. 이를 하커 변화도에 도시하면(Fig. 2), SiO₂ 함량이 증가함에 따라 P₂O₅, TiO₂, Fe₂O₃+MgO, Fe₂O₃, MgO, MnO, CaO는 감소하며 K₂O는 증가하는 경향이

다. Al₂O₃는 일정한 범위값을 보이지만 (VII)는 상대적으로 낮은 값을 가진다. 한편 Na₂O는 다소 분산되나 대체로 증가하는 양상이다. 이는 화성암 분화의 일반적인 경향으로 알려져 있다(McBirney, 1993). 그러나 토의에서 보다 자세히 논의하겠지만 이 암맥들이 동일 모 마그마를 기원으로 한 일련의 분화 산물이 아님은 틀림없다. 한편, 야외 조사에서 구분된 염기성, 중성 그리고 산성 암맥들은 SiO₂의 값에 따라 대체로 잘 분리되며(Fig. 2), 현무암과 현무암질 안산암의 SiO₂ 함량의 상한을 각각 52 wt.%와 57 wt.%로 본다면(Cox *et al.*, 1979) 염기성 암맥들은 대부분 이들 암석에 해당된다(Table 1).

염기성 암맥은 SiO₂ 함량의 변화 폭이 좁아 SiO₂에

Table1. Continued.

sample	DIIB3	DIIB4	DIIB1	DIIB2	DIVA1	DIVA2	DIVA3	DVD1	DVD2	DVD3	DVIR1	DVIR2	DVIIR1	DVIIR2
SiO ₂	47.39	58.40	53.08	50.82	58.69	63.77	58.35	67.35	64.55	66.04	65.04	70.07	76.42	76.86
TiO ₂	1.75	0.67	1.49	1.42	0.74	0.57	0.79	0.39	0.38	0.37	0.52	0.51	0.08	0.11
Al ₂ O ₃	16.74	17.18	14.70	16.85	17.25	16.57	16.74	15.91	15.58	15.52	18.64	14.58	12.43	11.15
Fe ₂ O ₃	10.72	7.24	9.46	8.71	5.44	5.10	7.93	3.68	3.82	4.07	2.63	2.51	1.05	3.41
MnO	0.24	0.25	0.17	0.17	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.03	0.10	0.00	0.05
MgO	5.91	2.79	5.65	4.63	3.77	2.84	3.92	1.42	1.41	1.49	0.38	0.70	0.25	0.25
CaO	10.18	6.30	5.69	8.24	7.47	4.85	3.44	2.19	3.75	3.25	3.60	1.53	0.20	0.06
Na ₂ O	2.73	3.11	3.10	2.67	4.18	3.06	4.68	3.16	3.18	3.45	4.95	3.93	1.73	3.65
K ₂ O	1.52	1.62	1.80	1.59	0.53	1.84	2.26	3.29	3.02	3.17	2.39	4.47	6.52	4.10
P ₂ O ₅	0.39	0.27	0.43	0.59	0.17	0.13	0.20	0.17	0.16	0.15	0.28	0.11	0.01	0.01
LOI	1.65	2.02	3.68	3.49	0.76	0.75	0.81	2.12	3.16	1.69	0.88	0.88	0.83	0.30
Total	99.22	99.85	99.25	99.18	99.11	99.59	99.23	99.79	99.13	99.34	99.34	99.39	99.52	99.95
Q	0.00	14.07	5.69	4.20	10.84	22.46	5.93	28.90	23.84	23.54	18.83	25.44	40.66	37.80
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.77	3.61	0.61	0.83	1.98	0.73	2.20	0.61
Or	9.30	9.86	11.23	9.90	3.20	11.06	13.67	19.99	18.68	19.27	14.39	26.90	39.11	24.41
Ab	23.86	27.04	27.64	23.76	36.09	26.28	40.46	27.43	28.10	29.96	42.58	33.79	14.83	31.05
An	29.88	28.89	21.99	30.80	27.28	23.69	16.27	10.14	18.48	15.67	16.52	7.07	0.95	0.24
Di	16.37	1.37	4.20	7.06	7.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DiWo	8.35	0.69	2.15	3.60	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DiEn	4.66	0.31	1.23	1.99	2.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DiFs	3.35	0.37	0.82	1.47	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hy	0.52	15.10	22.77	17.76	11.62	12.88	18.97	7.88	8.22	8.67	3.38	4.18	1.83	4.89
HyEn	0.30	6.86	13.67	10.20	7.26	7.21	10.02	3.65	3.69	3.83	0.97	1.78	0.63	0.63
HyFs	0.22	8.23	9.10	7.56	4.36	5.66	8.95	4.23	4.54	4.85	2.41	2.40	1.20	4.26
Ol	12.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OlFo	7.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
OlFa	5.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	2.81	1.77	2.51	2.32	1.37	1.25	1.94	0.91	0.96	0.99	0.70	0.67	0.25	0.77
Il	3.44	1.31	2.99	2.84	1.44	1.10	1.54	0.76	0.75	0.72	1.01	0.99	0.15	0.21
Ap	0.88	0.61	0.99	1.36	0.38	0.29	0.45	0.38	0.37	0.34	0.62	0.24	0.02	0.02
C.I.	36.08	19.55	32.46	29.98	22.22	15.23	22.45	9.55	9.93	10.39	5.08	5.84	2.23	5.87
D.I.	33.16	50.96	44.56	37.86	50.12	59.79	60.07	76.32	70.61	72.77	75.80	86.12	94.60	93.26

대한 산화물의 도표로 각 그룹별 변화 경향을 살펴보기가 어렵기 때문에 각 산화물의 변화를 MgO에 대하여 나타내었다(Fig. 3). 먼저, 전체적인 산화물의 변화 양상을 살펴보면 Fe₂O₃+MgO, Fe₂O₃, CaO, TiO₂ 등은 MgO 함량이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보여주며, SiO₂와 Na₂O는 감소하는 경향을 보여준다. 그러나 다른 산화물 값은 분산되어 도시되며 일정한 변화 경향을 살펴보기 어렵다. 한편, MgO에 대한 각 산화물의 변화 경향에서 대부분의 산화물 값은 각 그룹별로 분리가 되지 않는다(Fig. 3).

Irvine and Baragar(1971)의 Na₂O+K₂O 대 SiO₂ 도표에 분석 자료를 도시하면, 대부분의 시료가 비알칼리암(subalkaline) 계열에 도시되나 일부 염기성 암맥

시료들은 알칼리암(alkaline) 계열에 도시되었다(Fig. 4A). 그러나 알칼리암에 도시된 시료들의 경우에 일관된 경향성을 보여주지 않을 뿐만 아니라, 경하에서 동일한 광물조성과 조적을 보이며 야외에서 이들과 인접한 동일한 산상의 암맥들이 비알칼리암 계열에 도시되는 것으로 보아 이들 시료들이 실제 알칼리암 계열에 해당되기보다는 비알칼리암 계열의 현무암에서 풍화의 차이에 따른 주성분원소의 이동에 의해 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 한편, AFM도표에 도시해 보면 대부분의 시료들은 칼크-알칼리 계열에 해당되며(Fig. 4B) 알루미늄 포화도를 알아보기 위한 도표에서는 메탈알루미나(metaluminous)에서 과알루미나(peraluminous) 영역에 걸쳐서 도시되었다(Fig. 4C). 염기성 암

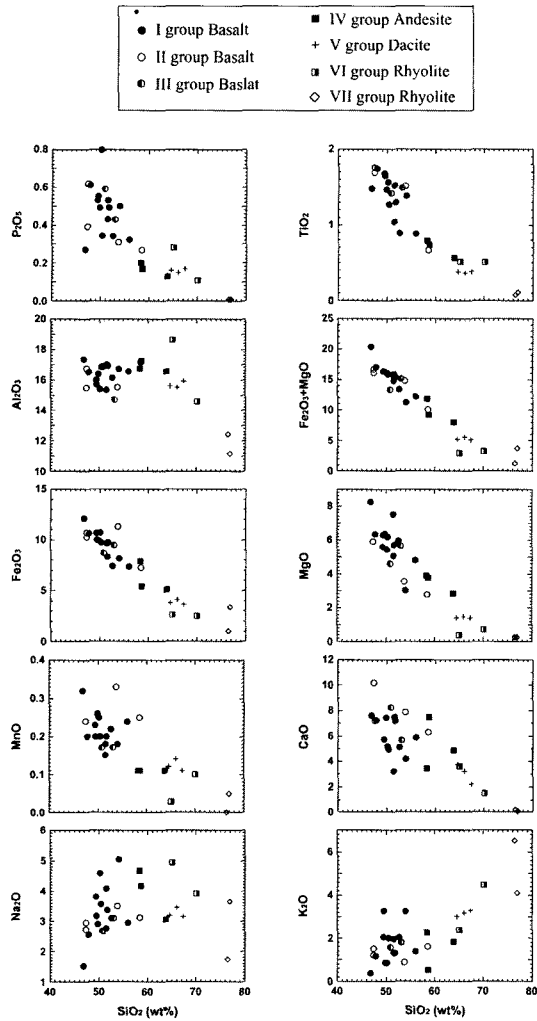


Fig. 2. Harker variation diagram of SiO₂ (wt.%) vs. major oxides (wt.%) for dikes in the study area.

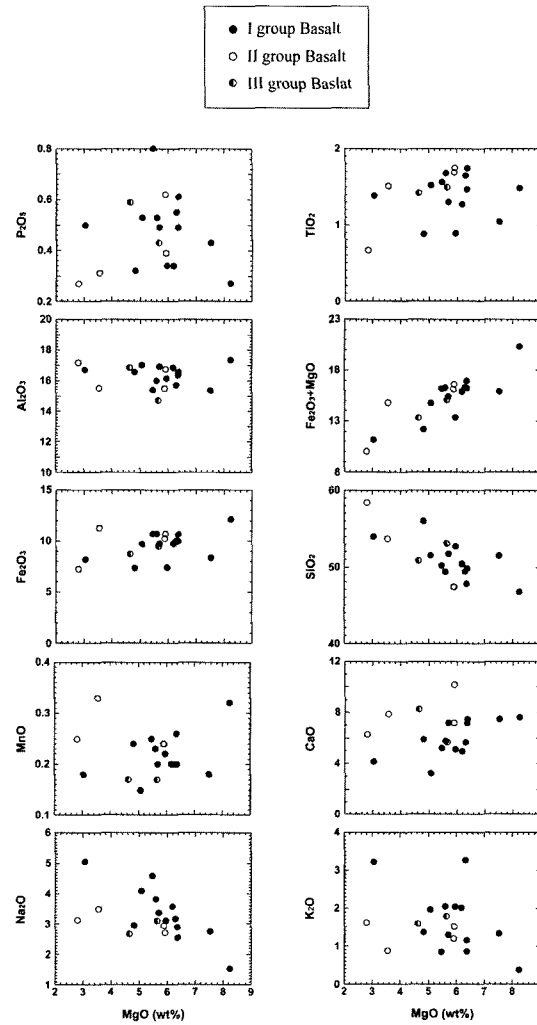


Fig. 3. Harker variation diagram of MgO (wt.%) vs. major oxides (wt.%) for mafic dikes in the study area.

맥의 Al 포화지수는 대부분 1.0 이하의 값을 가진다. 한편, 염기성 암맥 일부 시료의 CIPW 노름값에서 감람석이 나타나는데(Table 1), CIPW 노름 사면체 도표에서는 감람석 솔레아이트와 솔레아이트 영역에 도시되었다(Fig. 5).

미량 원소와 희토류 원소

미량 원소는 주성분 원소에 비해 상대적으로 풍화에 따른 원소의 이동이 적기 때문에 각 암맥군의 특성을 파악하고 그룹간의 구별을 용이하게 해 줄 것으로 판단된다. 각 시료들에서 얻어진 미량 원소와 희토류 원소의 조성은 Table 2에 나타내었다. Ba의 함량은 그룹

(I)에서 1177.9~203.0 ppm, (II)에서 1084~300.0 ppm, (III)에서 308.3~100.5 ppm, (IV)에서 485.3~171.2 ppm, (V)에서 373.7~93.5 ppm, (VI)에서 246.6~121.0 ppm, (VII)에서 606.1~96.6 ppm의 범위를 가진다. 대체적으로 염기성에서 산성 암맥으로 가면서 그 함량이 감소하며, 염기성 암맥의 경우 (I)과 (II)는 유사한 범위를 가지지만 (III)은 전체적으로 낮은 함량을 가진다.

Rb은 (I)에서 99.16~9.00ppm, (II)에서 38.10~18.25 ppm, (III)에서 55.40~48.50 ppm, (IV)에서 148.9~29.66 ppm, (V)에서 89.02~80.22 ppm, (VI)에서 122.33~45.07 ppm, (VII)에서 226.9~199.9 ppm의 범위를 가진다. Ba과는 다르게 이 경우에는 염기성에서 산

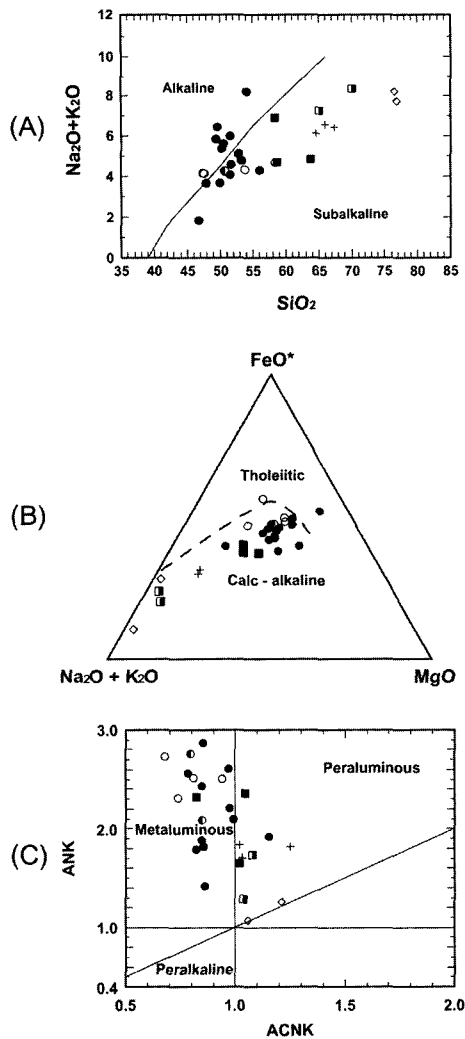


Fig. 4. (A) Plot of $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 for dikes of the study area (after Irvine and Baragar, 1971). (B) AFM diagram for dikes of the study area (after Irvine and Baragar, 1971). (C) Molar $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ vs. molar $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ diagram. Symbols are the same as those in Fig. 2.

성 암맥으로 가면서 함량이 증가한다. 염기성과 산성 암맥의 경우에는 각 그룹간 함량 차이가 인지된다.

Sr은 (I)에서 1177.9~203.0 ppm, (II)에서 1084~300.0 ppm, (III)에서 308.3~100.5 ppm, (IV)에서 485.3~171.2 ppm, (V)에서 373.7~93.5 ppm, (VI)에서 246.6~121.0 ppm, (VII)에서 606.1~96.6 ppm의 범위를 가진다. Sr은 Ba의 함량 변화와 유사한데 염기성 암맥 중에는 (III)에서 차이를 보인다.

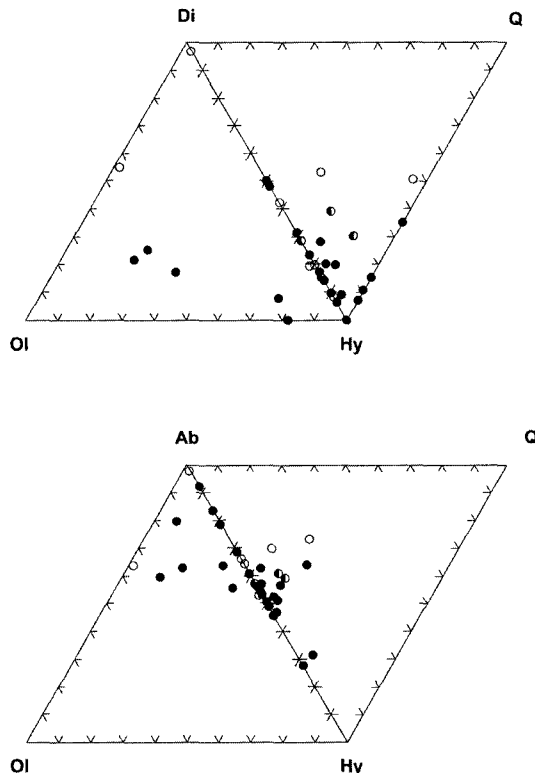


Fig. 5. The classification diagram of basalt according to CIPW normative composition for mafic dikes in the study area (after Yoder and Tilley, 1962).

한편, TiO_2 는 (I)에서 1.74~0.88 wt.%, (II)에서 1.75~0.67 wt.%, (III)에서 1.47~1.42 wt.%, (IV)에서 0.79~0.57 wt.%, (V)에서 0.39~0.37 wt.%, (VI)에서 0.52~0.51 wt.%, (VII)에서 0.11~0.08 wt.%의 범위로 비교적 적은 함량을 보인다(Table 1). Ti는 지판 섭입과 관련된 대륙연변부나 도호에 분포하는 화산암에서 흔히 고갈되기 쉬운 대표적 고장력원소(high field strength elements; HFSE) 중의 하나이다. TiO_2 는 염기성 암맥 중에 (I)과 (II)를 제외하고 나머지 그룹들은 대체로 함량의 차이가 인지된다.

염기성에서 중성 암맥들의 Nb은 (I)에서 19.37~7.14 ppm, (II)에서 27.42~5.03 ppm, (III)에서 13.36~7.90 ppm, (IV)에서 6.57~4.65 ppm, (V)에서 37.92~5.61 ppm의 범위를, Y는 (I)에서 34.81~20.02 ppm, (II)에서 30.36~19.16 ppm, (III)에서 32.78~18.96 ppm, (IV)에서 16.07~15.08 ppm, (V)에서 18.77~14.75 ppm의 범위를 가진다. 이는 조산대 안산암의 조성 범위(Gill, 1981)인 Nb(5~11 ppm)와 Y(20~25 ppm)의 함량에 해당

하거나 더 높은 값이다.

Hf 함량은 (I)에서 6.55~3.61 ppm, (II)에서 4.81~3.43 ppm, (III)에서 41.62~1.38 ppm, (IV)에서 2.32~1.39 ppm, (V)에서 2.98~1.73 ppm, (VI)에서 29.56~7.57 ppm, (VII)에서 12.46~4.34 ppm의 범위로 DHIB-1 시료를 제외하고는 매우 낮은 값을 보인다.

Th 함량은 (I)에서 3.03~0.88 ppm, (II)에서 5.71~1.53 ppm, (III)에서 7.43~7.25 ppm, (IV)에서 6.05~3.60 ppm, (V)에서 11.02~10.26 ppm, (VI)에서 12.92~6.09 ppm, (VII)에서 29.05~16.00 ppm의 범위를 가진다. HFSE의 함량은 전반적으로 낮아 지판의 침강 섭입에 관련된 마그마로부터 관입한 암맥들임을 보여주고 있다. Th의 경우 대체로 각 그룹간 미량 원소 함량 차이가 발견된다.

연구지역에는 염기성 암맥 중 (I)과 (II)가 가장 우세하게 산출되는데 이들은 대체로 유사한 지화학적 거동을 보이고 있어 동일한 모 마그마로부터 파생되었을 가능성이 크다. 고마그네슘질 광물에 농집되는 호정성(compatible) 원소인 Ni, Cr 등은 감람석, 휘석 등의 광물이 분별 정출되면서 제거되는데, Ni 함량은 (I)에서 184.1~51.8 ppm, (II)에서 133.1~63.1 ppm, (III)에서 140.8~76.5 ppm의 범위를 가진다. Cr 함량은 (I)에서 187.6~90.9 ppm, (II)에서 165.3~122.8 ppm, (III)에서 152.2~122.8 ppm의 범위를 가진다. 이는 초생 마그마의 Ni, Cr 함량(250~350 ppm Ni, 500~600 ppm Cr: Perfit *et al.*, 1980)에 비해서는 낮은 값이다. 그리고 대부분의 미량 원소 함량 변화에서 염기성 암맥 중 (I)과 (II)는 매우 유사한 함량을 가지나 (III)은 이들과는 다른 양상을 보이기도 한다.

Fig. 6과 7은 각각 N-type MORB 값으로 염기성 암맥의 미량 원소를 표준화하여 도시한 거미 성분도(spider diagram)와 C1 콘드라이트(chondrite) 값으로 중성암과 산성암맥의 미량 원소를 표준화하여 도시한 거미 성분도로써, 전체적으로 불호정성 원소인 Rb, Ba, Sr(산성암맥 제외), Th 등이 부화되어 있고, Nb 함량이 상대적으로 결핍된 특징을 보인다. 이는 초기 큰이온 친석 원소(LILE)의 부화가 상당했던 것으로 해석된다. 이와 같이 경희토류(light rare earth elements; LREE)에 비하여 HFSE가 결핍되고 강한 LILE 부화를 보이는 특징은 해양지판의 침강 섭입에 관련된 대륙 연변부나 도호 등의 조구조 환경과 관련된 암석에서 나타나는 특징이다. 한편, 거미 성분도(Fig. 6)에서 염기성 암맥 중 (I)과 (II)는 서로 유사한 패턴을 보이지만, (III)은 Ba, Zr, Hf 등에서 특이한 거동을 보인다. (III)은 기재적인 양상에서 (I)과 매우 유

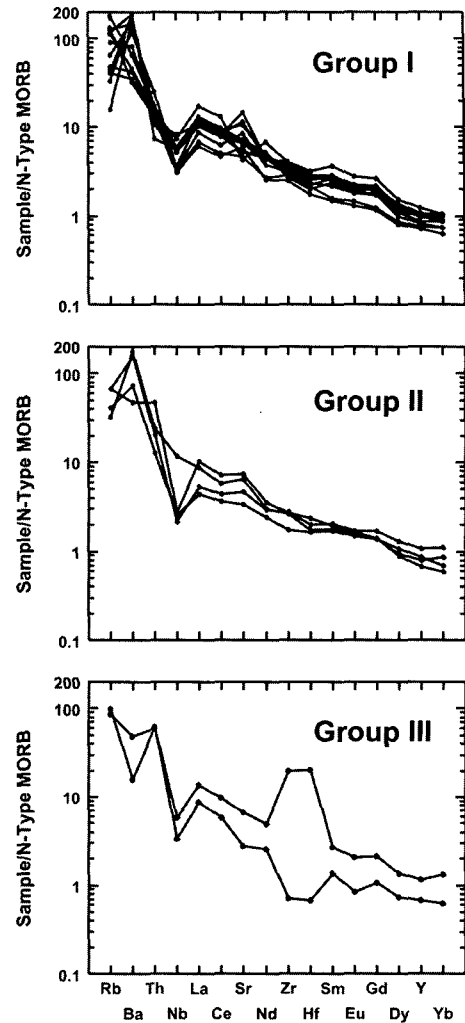


Fig. 6. N-type MORB normalized spider diagram for trace element.

사한 양상을 가지지만 응식된 석영 반정을 포함하고 있어 주변 모암에 의한 혼염 또는 마그마 혼합과 관련이 있을 가능성이 있다. 중성암맥인 (IV)와 (V)는 Ba, Th, La 등에서 구별되는 양상이며 산성암맥인 (VI)과 (VII)도 전체 미량 원소의 함량 값뿐만 아니라 패턴에서도 차이를 보여주고 있다(Fig. 7). 따라서 이번 연구에서 기재적으로 분류된 7개 암맥 그룹들은 미량 원소의 거미 성분도에서 대부분 서로 잘 구별된다 하겠다.

연구지역 암맥들의 전체 희토류 원소 함량은 (I)에서 243.8~92.99 ppm, (II)에서 136.81~83.2 ppm, (III)에서 187.38~106.57 ppm, (IV)에서 94.14~57.54 ppm, (V)에

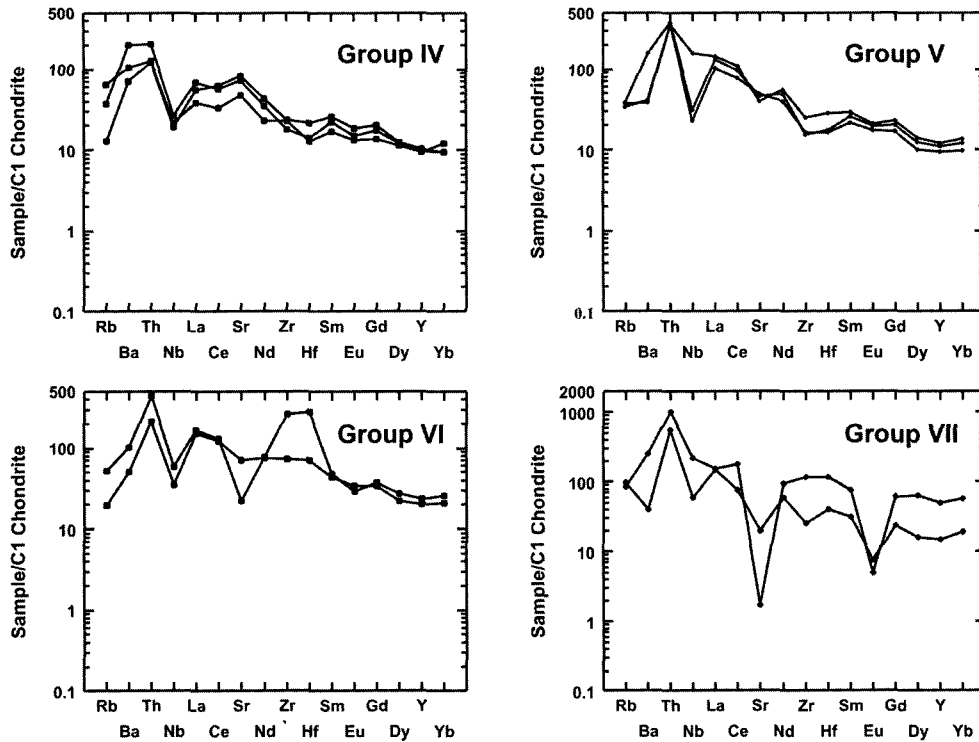


Fig. 7. C1 chondrite normalized spider diagram for trace element.

서 154.1~110.44 ppm, (VI)에서 202.02~187.77 ppm, (VII)에서 269.56~141.7 ppm의 범위를 가진다(Table 2). 이들 값에서 특이할만한 것은 중성 암맥 (IV)에 해당하는 것들이 가장 낮은 함량 값을 가진다는 것이다. 그리고 염기성 암맥들도 산성 암맥들과 비교해서 유사한 값을 가지는 것들이 많다. Fig. 8에서 C1 콘드라이트에 표준화한 연구지역 암맥들의 희토류 원소 함량 변화를 살펴보면, 염기성 암맥들에서 LREE는 부화되어 있으며 중희토류 원소(heavy rare earth elements; HREE)는 상대적으로 결핍되어 있다. (I)내에서는 전체적으로 변화경향이 유사하며 암석기재학적으로 잘 분류되었음을 보여준다. 한편 (II)는 다른 원소들의 함량 변화에서는 (I)과 잘 구별되지 않았으나 희토류 원소 함량 변화에서는 다소 차이가 있는 것으로 보인다. 그리고 (III)은 특징적으로 Eu과 Tm에서 부의 이상이 관찰되고, 전체적인 희토류 함량과 변화 경향은 (I)과 유사하다. 중성 암맥에서 (IV)와 (V)는 전체 함량과 변화 패턴에서 현저한 차이가 있음이 인지된다. 그리고 산성 암맥에서 (VII)은 매우 현저한 Eu 부의 이상이 관찰된다. 이상에서 살펴본 바와 같이 기재적으로 분류된 암맥 그룹간의 차이를 희토류 원소 함량 변화가 잘

반영하고 있음을 알 수 있다. 한편, 각 그룹간 희토류 원소 변화 경향은 제3기 분지에 분포하는 화산암류와의 상관성 연구에 있어 중요한 지표가 될 것으로 판단된다.

분별정정작용

연구지역 염기성 암맥에 대해 분화 효과를 알아보기 위해 MgO에 대한 산화물들의 함량 변화를 다시 한번 살펴보면(Fig. 3), Fe₂O₃와 TiO₂의 함량이 대체적으로 감소하고 있어 칼크-알칼리계열 마그마의 특징을 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 Ni와 Cr의 함량이 200 ppm 이하로 초기 산물에 비하여 매우 적은 것(Table 2)은 초기 산물과 평형을 이룬 상태가 아닌(Perfit *et al.*, 1980) 분별정출작용에 의해 분화된 암석임을 의미한다. MgO 대 SiO₂의 도표에서 MgO가 감소함에 따라 SiO₂가 증가하는 경향을 보이는데 이는 감람석의 분별에 의한 효과로 판단된다. 감람석의 분별은 Ni, Cr의 함량도 함께 감소시키는데 Fig. 9의 C, D에서 MgO가 감소함에 따라 Ni, Cr이 감소하는 경향이다.

한편, MgO 대 P₂O₅ 함량 변화도(Fig. 3)에서는 분산된 양상을 보여주고 있는데 이는 인회석의 분별작용이

Table 2. Trace element abundances (ppm) of the dikes in study area.

sample	DIB1	DIB2	DIB3	DIB4	DIB5	DIB6	DIB7	DIB8	DIB9	DIB10	DIB11	DIB12	DIB13	DIIB1
Ba	1144.6	726.5	992.6	1196.2	219.2	203.0	288.3	417.0	266.4	896.9	994.2	509.1	1177.9	462.9
Rb	23.97	24.82	36.14	64.30	23.16	73.50	63.71	99.16	26.84	71.47	9.00	50.41	18.74	23.15
Sr	487.2	948.5	641.8	473.1	424.9	531.8	757.0	1024.7	391.3	646.4	603.1	603.5	1314.9	298.8
Cs	0.55	1.81	1.31	2.71	2.65	3.12	1.85	1.62	0.60	1.07	0.74	2.86	3.05	12.63
Li	37.35	26.02	34.27	58.11	34.90	68.99	101.08	91.19	80.32	15.22	0.20	42.46	63.50	100.7
Ga	24.07	23.22	27.18	26.46	23.54	24.16	30.94	30.77	28.86	26.73	24.61	27.06	25.61	22.57
Nb	12.98	8.23	13.98	19.37	7.70	7.14	7.87	13.99	17.46	12.11	12.11	12.58	13.01	5.92
Hf	5.27	4.16	5.84	5.49	4.43	3.61	4.82	5.66	6.55	5.99	5.98	5.81	4.61	3.43
Zr	257.7	199.5	230.4	259.6	211.6	183.1	236.4	278.0	300.7	286.3	297.7	269.6	219.2	130.8
Y	30.16	22.82	29.34	29.66	21.06	20.02	27.58	27.25	34.81	27.53	29.77	24.05	28.06	23.92
Th	1.28	3.03	1.42	1.37	1.90	1.59	1.89	2.09	1.71	2.05	1.68	1.85	0.88	1.53
U	0.40	0.51	0.35	0.36	0.47	0.39	0.50	0.55	0.73	0.63	0.42	0.88	0.49	0.15
Cr	115.9	176.3	121.1	143.8	187.6	162.4	140.9	175.5	115.0	90.9	170.3	136.2	114.4	165.3
Ni	86.7	184.1	81.5	92.9	104.8	95.9	117.2	146.4	78.0	51.8	122.0	83.0	98.9	133.1
Co	33.46	33.32	29.64	32.75	26.97	25.94	37.67	35.31	29.87	18.12	34.63	29.28	34.82	43.21
Sc	17.18	16.81	16.54	17.57	13.91	12.97	18.83	15.75	17.56	14.41	18.26	18.11	17.41	18.90
Cu	42.05	40.53	78.68	40.24	42.51	38.91	48.43	39.66	38.85	36.03	45.84	40.55	46.19	74.17
Pb	5.84	6.33	11.03	34.85	7.24	6.09	7.26	6.91	8.39	13.71	24.81	5.42	3.68	5.39
Zn	76.7	62.6	95.5	103.0	90.9	62.4	82.4	75.6	88.4	42.0	112.1	51.1	69.4	132.3
Bi	2.57	1.59	1.77	2.09	1.34	0.86	1.05	1.60	3.31	1.30	1.37	1.61	1.71	1.87
Mo	1.73	0.50	1.60	1.84	0.95	0.48	0.56	1.33	1.16	1.92	1.37	1.44	1.33	0.60
Be	3.02	1.66	2.44	3.32	2.69	1.97	5.46	2.48	4.34	1.77	2.17	2.45	2.64	3.08
La	25.77	30.52	33.18	26.56	16.87	15.23	21.62	26.78	42.89	28.03	25.80	25.56	25.71	11.19
Ce	60.62	69.25	73.85	60.81	38.03	35.43	47.76	62.09	98.49	65.66	59.34	64.49	59.71	27.20
Pr	8.00	8.62	9.33	7.99	4.82	4.52	6.42	7.88	12.31	8.42	7.60	7.92	7.95	3.87
Nd	33.96	34.73	38.01	33.45	19.92	18.70	27.10	32.90	50.15	34.33	31.75	32.50	33.19	17.75
Sm	7.19	6.20	7.59	7.07	4.14	3.94	5.74	6.68	9.65	6.80	6.66	6.57	6.93	4.43
Eu	2.23	1.93	2.28	2.16	1.50	1.33	1.83	2.18	2.82	2.06	2.09	1.84	2.25	1.52
Gd	7.45	6.40	8.05	7.28	4.56	4.25	6.22	6.90	9.77	7.14	7.71	6.54	7.19	4.99
Tb	1.16	0.90	1.16	1.15	0.73	0.67	0.97	1.05	1.38	1.05	1.08	0.97	1.10	0.90
Dy	6.22	4.55	5.92	6.18	3.96	3.58	5.16	5.52	7.03	5.40	5.95	4.95	5.74	4.89
Ho	1.26	0.91	1.17	1.24	0.83	0.74	1.06	1.10	1.36	1.09	1.20	0.99	1.13	0.98
Er	3.49	2.59	3.32	3.51	2.37	2.08	3.07	3.14	3.80	3.11	3.48	2.87	3.21	2.66
Tm	0.48	0.36	0.45	0.49	0.35	0.30	0.44	0.44	0.50	0.44	0.49	0.41	0.43	0.36
Yb	3.04	2.24	2.81	3.12	2.23	1.89	2.74	2.75	3.16	2.80	3.14	2.67	2.64	2.14
Lu	0.48	0.38	0.44	0.49	0.38	0.33	0.45	0.44	0.50	0.45	0.50	0.43	0.43	0.32
REE	161.4	169.6	187.6	161.5	100.7	93.0	130.6	159.9	243.8	166.8	156.8	158.7	157.6	83.2

큰 기여를 하지 못했음을 의미한다. 그리고 MgO 대 CaO 도표에서도 뚜렷한 변화를 보이지 않는 것은 단사회석의 분별이 크지 않았음을 의미한다. 그러나 변질과정 중 CaO의 유동이 가능하기 때문에 단사회석의 분별정출 작용은 MgO에 대한 Sr, Cr, Ni, Sc의 함량을 함께 고려해야 한다. Fig. 9의 A, C, D, E에서 MgO가 감소함에 따라 분산되기는 하지만 대체로 이들 원소가 감소하는 경향이다. 따라서 단사회석의 분별작용

은 있었던 것으로 봄이 타당하다.

사장석의 분별시에는 MgO에 대한 Al₂O₃ 도표에서 Al₂O₃의 함량이 감소되어야 하나 이러한 현상이 인지되지 않는다(Fig. 3). 그러나 Fig. 9의 MgO 대 Sr(A), Eu(B), Eu/Eu*(F), Al₂O₃/CaO(G)와 Na₂O 대 Al₂O₃/CaO(H), La 대 Eu(I), La/Yb 대 La(J) 등을 고려하면 사장석의 분별작용도 있었을 가능성이 높다.

이상의 결과로 볼 때, 연구지역의 염기성 암맥들은

Table 2. Continued.

sample	DIIB2	DIIB3	DIIB4	DIIB1	DIIB2	DIVA1	DIVA2	DIVA3	DVD1	DVD2	DVD3	DVIR1	DVIR2	DVIIR1	DVIIR2
Ba	982.4	1084.8	300.0	308.3	100.5	171.2	485.3	256.9	93.5	373.7	99.8	121.0	246.6	96.6	606.1
Rb	38.10	18.25	37.40	48.50	55.40	29.66	87.33	148.9	85.67	89.02	80.22	45.07	122.3	226.9	199.9
Sr	419.4	578.5	662.7	591.7	248.3	607.1	534.2	346.0	351.7	335.2	291.4	516.6	161.3	144.5	12.4
Cs	7.68	0.75	17.31	1.41	1.39	2.61	10.39	15.54	1.88	3.83	1.95	0.53	3.14	5.43	1.99
Li	12.57	7.66	9.07	86.52	20.80	13.24	29.39	Q40.77	29.87	24.15	24.01	13.22	26.82	13.96	8.61
Ga	26.69	26.11	25.83	44.70	21.44	22.24	22.94	23.18	26.02	26.27	28.68	30.45	36.80	22.89	28.87
Nb	5.03	27.42	6.41	13.36	7.90	4.65	6.57	5.34	5.61	7.57	37.92	8.59	14.39	14.45	53.52
Hf	4.15	3.59	4.81	41.62	1.38	2.32	1.51	1.39	1.73	1.88	2.98	7.57	29.56	4.34	12.46
Zr	203.1	196.2	201.8	1443	52.6	92.2	69.3	89.2	64.3	60.4	95.8	284.5	1014	100.1	455.5
Y	30.36	19.16	22.40	32.78	18.96	16.07	15.39	15.08	14.75	17.54	18.77	32.25	36.99	23.08	78.19
Th	2.46	2.88	5.71	7.25	7.43	3.60	6.05	3.67	10.26	11.02	10.39	6.09	12.92	16.00	29.05
U	0.63	0.72	1.27	2.60	1.83	2.68	1.22	1.52	1.88	2.00	2.41	1.84	3.75	3.06	6.71
Cr	139.4	161.3	122.8	148.6	152.2	132.4	116.5	83.2	124.6	72.1	85.2	22.0	235.7	194.7	309.2
Ni	77.4	96.89	63.1	140.8	76.5	68.9	58.0	45.8	63.1	37.4	42.7	12.6	121.4	94.5	147.0
Co	30.36	40.23	16.85	32.37	5.94	11.92	11.52	13.59	7.42	6.63	5.21	2.83	5.77	2.13	3.53
Sc	29.01	18.15	10.00	14.59	6.07	12.53	10.20	11.91	4.77	4.03	4.19	5.21	7.63	1.16	0.36
Cu	94.95	69.26	29.90	44.08	12.15	12.53	22.09	39.09	12.19	15.24	9.62	9.36	13.31	8.47	10.94
Pb	8.31	3.64	15.74	23.94	20.06	5.67	7.75	4.21	13.84	16.00	19.91	28.65	21.63	16.87	28.42
Zn	96.7	77.6	69.6	69.5	47.5	32.5	42.1	40.6	36.8	37.6	57.7	89.3	27.4	19.0	134.9
Bi	3.39	1.96	3.18	1.40	1.56	2.60	3.07	3.97	2.76	3.32	1.14	2.11	4.85	2.31	1.93
Mo	4.69	1.66	1.93	16.34	3.01	1.83	1.40	0.69	1.34	1.03	2.00	0.90	13.11	2.02	3.12
Be	1.62	1.71	2.09	2.10	1.47	1.55	1.96	2.67	2.32	3.57	3.43	2.65	2.28	3.69	16.05
La	13.54	21.78	25.55	34.53	21.53	13.24	16.33	9.21	24.19	30.76	34.20	36.26	38.95	35.98	36.22
Ce	33.17	43.75	54.35	73.17	43.99	37.87	35.12	20.29	47.05	59.13	65.84	75.22	80.15	46.84	107.6
Pr	4.68	5.29	6.58	8.91	4.99	5.08	4.19	2.58	5.15	6.50	7.15	9.11	9.59	8.33	11.48
Nd	21.37	21.78	26.20	35.76	18.50	20.39	16.62	10.70	18.78	23.00	26.11	35.46	36.60	27.54	44.20
Sm	5.36	4.70	5.16	7.09	3.64	3.96	3.43	2.62	3.34	4.01	4.53	6.71	7.28	4.90	11.66
Eu	1.75	1.70	1.56	2.13	0.85	1.07	0.87	0.78	1.00	1.15	1.23	1.99	1.70	0.44	0.29
Gd	6.20	5.19	5.19	7.86	3.90	4.19	3.61	2.76	3.49	4.13	4.66	6.95	7.70	4.90	12.73
Tb	1.09	0.82	0.80	1.37	0.60	0.62	0.55	0.49	0.50	0.61	0.69	1.04	1.23	0.75	2.57
Dy	5.90	4.00	4.29	6.26	3.31	3.15	3.02	2.90	2.58	3.19	3.60	5.60	7.04	4.05	16.41
Ho	1.23	0.79	0.90	1.31	0.69	0.64	0.62	0.63	0.56	0.68	0.75	1.17	1.48	0.88	3.37
Er	3.61	2.14	2.71	3.94	2.05	1.79	1.74	1.89	1.61	2.03	2.26	3.55	4.50	2.84	10.40
Tm	0.52	0.30	0.41	0.35	0.30	0.26	0.26	0.30	0.25	0.31	0.35	0.53	0.66	0.47	1.51
Yb	3.39	1.81	2.66	4.02	1.91	1.61	1.59	2.05	1.66	2.03	2.33	3.57	4.44	3.23	9.77
Lu	0.54	0.31	0.45	0.68	0.31	0.27	0.26	0.34	0.28	0.35	0.40	0.61	0.70	0.55	1.35
REE	102.4	114.4	136.8	187.4	106.6	94.1	88.2	57.5	110.4	137.9	154.1	187.8	202.0	141.7	269.6

감람석, 단사휘석, 사장석의 분별정출 작용이 있었던 것으로 판단된다.

조구조적 환경

앞서 Fig. 6와 7에서 연구지역의 암맥들이 LREE에 비하여 HFSE가 결핍되고 강한 LILE 부화를 보이는 특징을 살펴보았다. 이는 해양지판의 침강 섭입에 관련된 대륙 연변부나 도호 등의 조구조 환경과 관련된

암석에서 나타나는 특징이다. Ba, Nb, La 함량을 조산대 안산암과 비교하여 도시하면(Fig. 10), 분산되어 일정한 영역에 집중되지는 않으나 대체로 조산대 영역에 도시된다.

Pearce *et al.*(1977, 1984)의 도표(Fig. 11A, B)에 도시하면, 전형적인 조산대 안산암 영역과 화산호 영역에 도시된다. Wood(1980)의 Hf/3-Th-Nb/16 조구조 판별도(Fig. 11C)에서는 지판이 침강 섭입하는 지판 경계

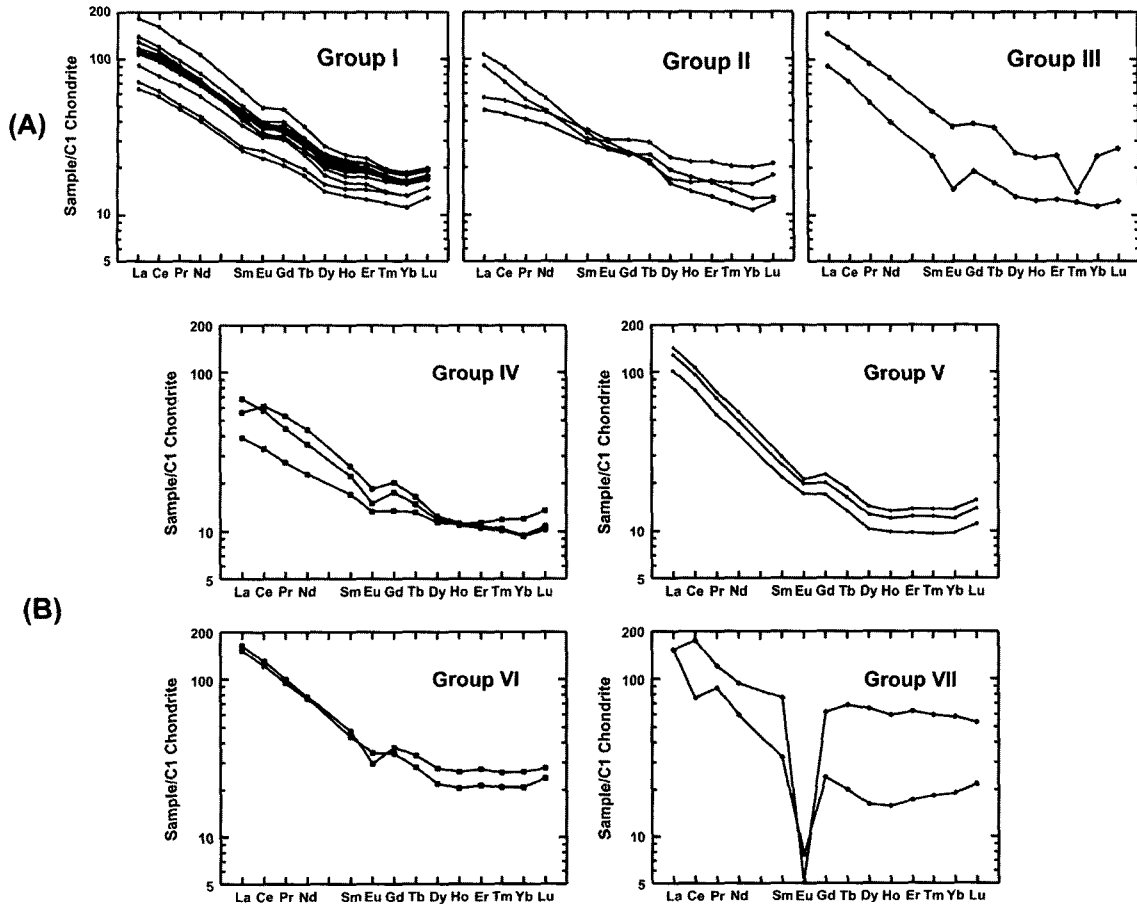


Fig. 8. C1 Chondrite normalized REE patterns. (A) Mafic dikes (B) Intermediate and felsic dikes.

부에 약간 벗어나는 위치에 도시된다. 이 영역은 다시 Hf/Th 비를 기준으로 원시 호상 열도의 솔레아이트 계열(Hf/Th>3.0)과 성숙한 호상 열도의 칼크-알칼리 계열(Hf/Th<3.0)으로 구분되는데, 연구지역의 현무암 암맥은 3 이하의 값으로 칼크-알칼리 계열의 영역에 해당된다. Th/Yb 대 La/Yb 도표(Fig. 11D)에서는 해양 도호와 대륙연변호에 인접하여 도시된다.

Mullen(1983)에 의한 TiO₂-MnO-P₂O₅ 조구조 판별도(Fig. 12A)에서 연구지역 염기성 암맥은 칼크-알칼리 현무암 또는 도호 현무암 영역에 도시된다, Bailey (1981)는 La/Yb 비와 Sc/Ni 비를 이용하여 섭입 환경에서 형성된 화산호 안산암의 4가지 유형을 구분하는 판별도를 제안하였다. 여기에서 La/Yb 비는 대륙 지각이 관여한 정도를 나타낸다. 이 판별도에 염기성 암맥들을 도시한 결과, 대륙 도호에서 약간 벗어나는 위치에 도시된다(Fig. 12B). 한편, Y/Nb 대 TiO₂ 판별도

(Fig. 12C)에서는 대륙 솔레아이트 영역에 도시된다. 이상의 여러 조구조 판별도들을 이용한 결과는 연구지역 염기성 암맥들의 조구조 환경은 조산대 화산호와 가장 관련될 것으로 판단된다.

토 의

연구지역 암맥들이 동일한 모마그마를 기원으로 한 일련의 분화 산물로 인정하기에는 문제점이 있다. 각 암맥들이 관입한 모암을 살펴보면, 산성 암맥들과 중성 암맥 중 안산암질 암맥(그룹IV)은 백악기 퇴적암과 불국사화강암을, 중성 암맥 중 데사이트질 암맥(그룹V)은 추령각력암을, 그리고 염기성 암맥들은 중기 마이오세초의 연일층군 이전의 암석들을 모두 관입하고 있다. 또한, 마이오세 동안 한반도 동남부에는 이원성 화산활동이 발생하였는데 데사이트질 화산활동이 먼저

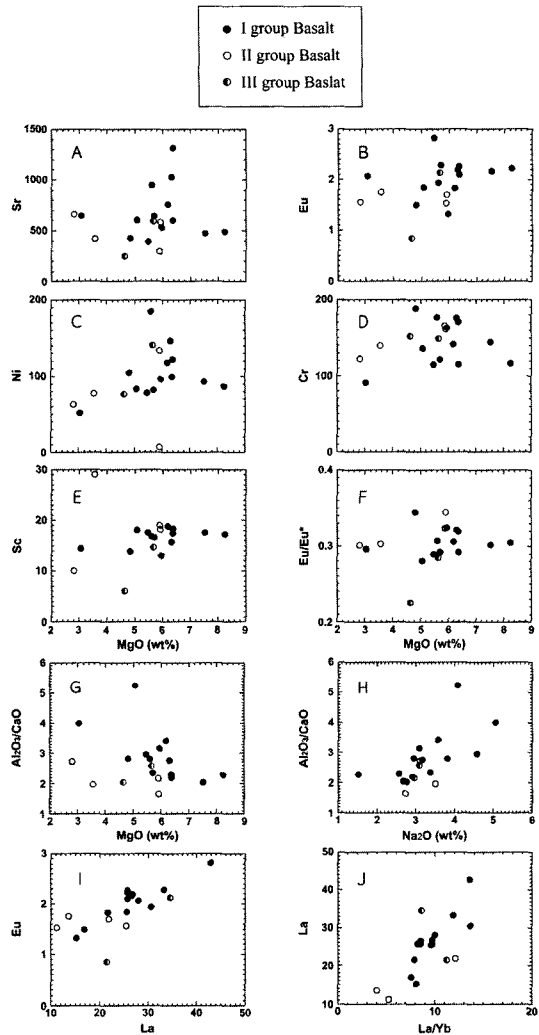


Fig. 9. Harker variation diagrams of trace element (ppm) and Eu anomaly vs. MgO (wt.%) (A, B, C, D, E and F), Al₂O₃/CaO vs. MgO (G), Al₂O₃/CaO vs. NaO (H), Eu vs. La (I), La vs. La/Yb (J) for basaltic dikes in the study area.

있었으며 현무암질 화산활동은 뒤이어 발생하였다(손문, 1998; 손문 외, 2000). 이러한 사실들로 상대 연령을 추정해 보면, 제일 먼저 산성 암맥들과 안산암질 암맥, 그 다음이 데사이트질 암맥, 마지막으로 염기성 암맥의 순으로 관입된 것으로 판단된다. 보편적인 화성암의 분화양상은 분화가 진전됨에 따라 SiO₂의 함량이 증가함을 감안한다면 연구지역의 암맥군들이 동일한 모암에서 분화되었다고 간주되기는 어렵다. 그렇다면 하커 변화도(Fig. 2)에서 나타나는 일련의 산화물

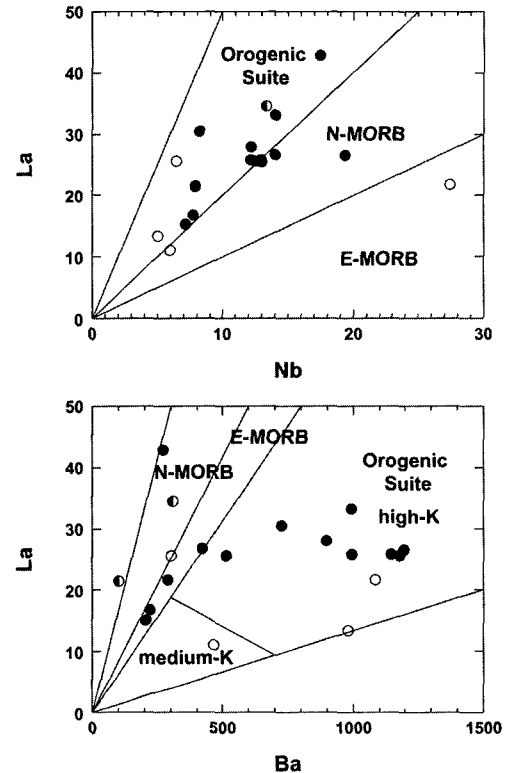


Fig. 10. Discriminant tectonic setting diagrams of the study area (after Gill, 1981). Symbols are the same as those in Fig. 2.

들이 보여주는 변화 경향은 동일한 모암의 분화 경향이라기보다는 일반적인 화성암이 보여주는 특정한 SiO₂의 값에 대한 일정한 범위의 산화물 값이라고 해석하는 것이 타당하리라 판단된다. 전체 회토류 원소 함량에서도 염기성 암맥과 산성 암맥에서 서로 유사하게 높은 값을 가지며 중성 암맥에서 가장 낮은 값을 가진다는 것도 이 사실을 뒷받침하는 것으로 판단된다. 한편, 하커 변화도에서 나타나는 주성분 산화물의 선적인 변화경향은 잔류암 불혼합 모델(White and Chappell, 1977), 마그마 혼합(Blake and Campbell, 1986), 특별한 경우의 분별결정화 과정(Phillips *et al.*, 1981) 등에 의하여 설명된다. 연구지역의 경우 분석된 시료의 수가 많을 경우에 충분히 직선적인 변화 경향을 보일 것으로 판단된다. 따라서, 하커 변화도에 나타나는 어떤 변화 양상을 해석할 때에는 충분한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

한편, Fig. 8에서 그룹(VII)을 살펴보면 특이한 회토류 원소 패턴을 보이는데 이는 남산화강암의 회토류

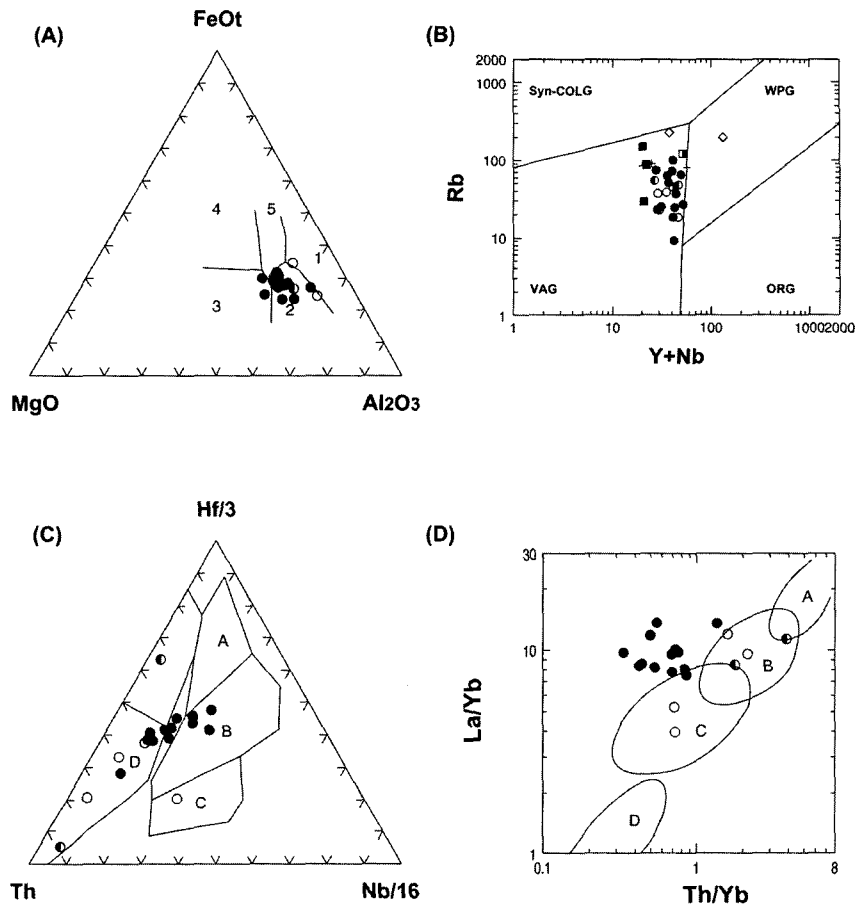


Fig. 11. Tectonic discriminant diagrams for basaltic dikes in the study area. (A) MgO-FeO*-Al₂O₃ diagram (after Pearce *et al.*, 1977) 1. Spreading center, 2. Orogenic suite, 3. Ocean ridge, 4. Ocean island, 5. Continental. (B) Rb vs. Y+Nb diagram (after Pearce *et al.*, 1984). (C) Hf/3-Th-Nb/16 diagram (after Wood, 1980). A; N-type MORB, B; E-type MORB and tholeiitic WPB, C; Alkaline WPB, D; Destructive plate margin. (D) La/Yb vs. Th/Yb diagram. A; Andean arc, B; Continental margin arc, C; Oceanic arc, D; Primitive arc.

원소 패턴(이미정 외, 1995; 이준동과 황병훈, 1999)과 매우 유사한 양상이다. 만약 이 암맥들이 남산화강암과 동일한 시기에 관입한 동일 마그마 기원이라면 기존에 알려져 있는 남산화강암 관입연대는 재해석되어야 할 것으로 판단된다. 기존 연구들(이미정 외, 1995; 고정선, 2001)은 남산화강암과 토함산화강암의 관입 시기가 거의 유사할 것으로 보고한 바 있다. 만약 남산화강암의 일부가 토함산화강암을 관입한 암맥으로 산출됨이 명백하다면, 이는 남산화강암이 토함산화강암의 결정 함량이 적어도 70%이상의 거의 고화가 완료된 상태에서 관입했음을 지시하는 것이다. 화강암의 냉각율이 빠른 냉각의 경우에도 10~20°C/Ma인 점을 감안한다면 두 화강암체는 관입 시기에서 반드시 차이가

있어야 한다.

한편, 선행 연구(손문 외, 2002a)에서 연구지역 염기성~중성 암맥들의 관입은 동해의 확장에 기인하여 한반도 남동부에서 진행되었던 신생대 마이오세 지각변형과 밀접한 관련성이 있음을 밝힌 바 있다. 이들 암맥과 주변 화산암류에서 얻어진 K/Ar 전암 연령은 대부분 전기 마이오세를 지시하고 있다(손문 외, 2002a: Table 1, 2). 이 시기는 동해가 가장 활발히 확장하고(Kaneoka *et al.*, 1990; Chough and Lee, 1992; Jolivet and Tamaki, 1992) 한반도 남동부에 지각 확장과 화산활동이 가장 빈번하였던 시기와 일치한다. 이번 연구에서 연일구조선을 경계로 서부지역과 경계지역 그리고 동부지역의 화강암체에서 관찰된 염기성 암맥들

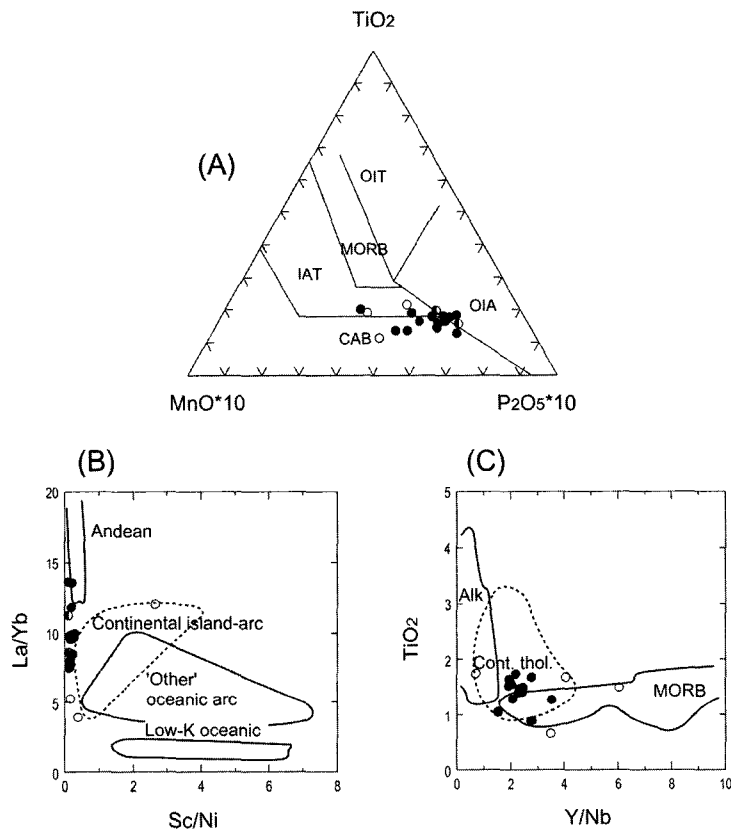


Fig. 12. (A) MnO-TiO₂-P₂O₅ discrimination diagram for basalt (after Mullen, 1983). MORB, OIT; ocean-island or seamount tholeiite, OIA; ocean-island alkali basalt or seamount alkali basalt, CAB; island arc calc-alkaline basalt, IAT; island-arc tholeiite. (B) La/Yb-Sc/Ni discrimination diagram for andesite (after Bailey, 1981) showing the field of Andean-type (active continental margin), continental island-arc, low-K oceanic island-arc and 'other' oceanic island andesites. (C) TiO₂-Y/Nb discrimination diagram for basalt (adapted from Floyd and Winchester, 1975).

은 암석기재와 지화학적 측면에서 대부분 동일한 기원의 마그마에서 유래된 특징들을 보이고 있다. 그러나 관입면의 주향 방향은 동쪽으로 갈수록 시계방향으로 회전된다(손문 외, 2002a). 연일구조선의 형성과 지괴 회전 운동의 종결 시기는 고자기학과 구조지질학 연구를 통해 각각 17 Ma와 16 Ma 전후임이 밝혀져 있다(김인수와 강희철, 1989; 손문, 1998; Lee *et al.*, 1999; 손문 외, 2002b). 이러한 점들은 연구지역 염기성 암맥의 관입 시기는 대부분 17 Ma 이전이며 연일구조선은 한반도 동남부 지괴들의 시계방향 수평 회전운동을 가장 서쪽에서 규제한 주요 구조선임을 지지하는 것이다.

한편, 연일구조선 동쪽과 서쪽에서 서로 다른 방향의 암맥군이 형성될 수 있는 또 다른 원인으로 지각에 균열이 현재 암맥들의 주향 방향으로 먼저 존재하였고 이후 암맥들이 관입하였을 가능성을 생각할 수 있

다. 그러나 한반도 동남부에서 칼크-알칼리 마그마의 활동이 16 Ma 이후로 보고된 것은 극히 드물다. 또한 기존의 지하 균열이 신장되어 암맥이 관입하기 위해서는 반드시 일정한 방향의 응력이 작동되어야 하는데 연일구조선 동편과 서편에 동일 시대 동안 서로 다른 응력이 작동되었을 가능성은 아주 희박하다. 따라서 현재로서는 위의 가능성은 매우 낮다고 할 수 있다. 그러나 이번 연구에서 얻어진 결과들이 불국사 화성활동 말기와 이후의 한반도 동남부 지각과 조구조 변천사를 편찬하는데 있어 보다 중요한 자료로 활용되기 위해서는 차후 관입암에 관한 보다 면밀한 암석기재, 암석화학적 연구 그리고 체계적인 절대연령 측정 작업과 제 3기 분지를 구성하고 있는 화산암류와 암맥군의 상관성에 관한 연구들이 계속적으로 수행되어야 함은 틀림없다.

결 론

한반도 남동부에서 얻어진 총 287개 암맥의 암석기재학적 특징과 지화학적 자료를 수집하여 선행 연구(손문 외, 2002a)에서 밝혀진 결론들과 종합적으로 해석함으로써 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 연구지역의 암맥들은 염기성, 중성, 산성 암맥으로 분류되며, 다시 염기성 암맥은 3개 그룹, 중성 암맥은 2개 그룹, 산성 암맥은 2개 그룹으로 총 7가지 그룹으로 분류된다. 이중에 염기성 암맥의 그룹(I)에 해당하는 암맥군들이 가장 우세하다.

2) 염기성 암맥 중 그룹(I)에 해당하는 암맥들은 연일 구조선을 경계로 하여 서편과 동편에 모두 분포하며, 양편에서 동일한 암맥임을 지지하는 암석기재학적 양상과 지화학적 특징을 보여준다. 이는 연일구조선이 마이오세 지각변형기 동안 지괴의 시계방향 수평 회전 운동을 규제한 주요 지구조선임을 강력히 지지한다.

3) 지화학 분석결과에 따르면 암석기재학적으로 분류한 7가지 그룹이 서로 잘 구분되는 특성을 보여준다. 염기성, 중성, 산성 암맥들은 각각 현무암과 현무암질 안산암, 안산암과 테사이트, 유분암에 해당되며, 마그마 계열은 칼크-알칼리 계열에 해당된다. 그리고 염기성 암맥들은 감람석, 단사회석, 사장석의 분별정출 작용이 있었던 것으로 판단된다.

4) 연구지역의 암맥들은 특징적인 원소들의 함량과 조구조 관별도에서 지판의 침강 섭입에 관련된 마그마로부터 관입한 암맥들임을 보여주고, 그 조구조 환경이 조산대 화산호와 관련이 있음을 지시한다.

감사의 글

본 연구는 2002년 한국과학재단 목적기초연구(과제 번호: R05-2002-000530-0)의 지원비에 의해 수행되었다. 연구과정 동안 많은 도움을 준 박맹언 교수와 좌용주 교수께 감사 드리고, 이 논문의 심사과정 동안 유익한 조언과 지적을 해주신 박계현 교수와 황상구 교수에게 감사드린다.

참고문헌

고정선, 2001, 경상분지내 남산 A-형 화강암과 경주 I-형 화강암류에 대한 광물학적, 지화학적 및 Sr-Nd 동위원소 연구. 부산대학교 박사 학위논문, 173 p.
 김상욱, 1982, 유천분지내에 분포하는 후기 백악기 화산암류의 암석학적 연구. 서울대학교 박사 학위논문, 133 p.
 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주

향이동운동. 지질학회지, 28, 84-109.
 김인수, 강희철, 1989, 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25, 273-293.
 김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김진섭, 백인성, 1998, 경주-울산 일원에 대한 지역지질 특성연구: 울산단층주변 화강암류의 잔류자기와 대자율. 자원환경지질, 31, 31-43.
 김진섭, 1990, 경상분지 남동부 일대에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 26, 53-62.
 박양대, 윤형대, 1968, 한국지질도(1:50,000), 울산도폭(Sheet-7020-I) 및 설명서. 국립지질조사소, 20 p.
 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고자기학적 고찰. 부산대학교 박사 학위논문, 233 p.
 손문, 김인수, 1994, 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질 구조와 분지발달. 자원환경지질, 27, 65-80.
 손문, 김인수, 이동호, 이준동, 김진섭, 백인성, 2000, 울산 단층 일원에 대한 지역지질 특성연구: 제3기 마이오세 와음분지의 지질구조와 대자율비등방성(AMS). 지질학회지, 36, 195-216.
 손문, 김종선, 김진섭, 김인수, 2002a, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 지각변형. 암석학회지(제출중).
 손문, 정혜운, 김인수, 2002b, 한반도 동남부 연일구조선(단층) 남부 일원의 지질과 지질구조. 지질학회지, 38, 175-197.
 원종관, 1968, 경상분지 내에서의 백악기 화성활동에 관한 연구(I). 지질학회지, 4, 215-236.
 위수민, 이선구, 1999, 양남분지 내에 분포하는 제3기 화산암류에 대한 지화학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 423-436.
 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구 보고서, 25 p.
 윤성효, 김진섭, 김영라, 1994, 부산 일원에 분포하는 백악기 화산암류의 암석학적 연구(II): 조구조적 위치 및 성인. 한국지구과학회지, 15, 356-365.
 이미정, 이종익, 이민성, 1995, 경주지역의 A-형 알카리장석 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31, 583-607.
 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
 이준동, 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 80-95.
 차문성, 1976, 부산지역의 불국사 산성화성암류의 암석학적 연구. 광산지질, 9, 85-106.
 한중환, 박영훈, 손진담, 손병국, 1987, 한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체구조발달 및 퇴적환경 연구 (II). 연구보고서 KR-86-2-(B)-4, 한국동력자원연구소, 109p.
 황상구, 김상욱, 1994, 밀양-양산지역 백악기 화산암류의 암석학적 연구(I): 암석조구조적 위치. 지질학회지, 30, 229-241.
 Bailey, J.C., 1981, Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites. Chem. Geol., 32, 139-154.
 Blake, S. and Campbell, I.N., 1986, The dynamics of

- magma-mixing during flow in volcanic conduits. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94, 72-81.
- Chough, S.K. and Lee, K.E., 1992, Multi-stage volcanism in the Ulleung back-arc basin, East Sea (Sea of Japan). *The Island Arc*, 1, 32-39.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979, *The interpretation of igneous rocks*. George Allen & Unwin, London, 450 p.
- Floyd, P.A. and Winchester, J.A., 1975, Magma-type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 27, 211-218.
- Gill, J.B., 1981, *Orogenic andesites and plate tectonics*. Springer-Verlag, 390 p.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Jolivet, L. and Tamaki, K., 1992, Neogene kinematics in the Japan Sea region and volcanic activity of the northeast Japan Arc. In: Tamaki, K., Suyehiro, K., Allan, J., McWilliams, M. (eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 127/128, Part 2*, 1311-1331.
- Kaneoka, I., Notsu, K., Takigami, Y., Fujioka, K. and Sakai, H., 1990, Constraints on the evolution of the Japan Sea based on ^{40}Ar - ^{39}Ar ages and Sr isotopic ratios for volcanic rocks of the Yamato Seamount Chain in the Japan Sea. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 97, 195-204.
- Lee, Y.S., Ishikawa, N. and Kim, W.K., 1999, Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, 304, 131-149.
- McBirney, A.R., 1993, *Igneous petrology* (2nd ed.). Jones and Bartlett, Boston, 508 p.
- Mullen, E.D., 1983, $\text{MnO}/\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 62, 53-62.
- 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.*, 25, 956-983.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E. and Birkett, T.C., 1977, The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 121-132.
- 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.*, 30, 227-256.
- Phillips, G.N., Wall, V.J. and Clemens, J.D., 1981, Petrology of the Strathbogie Batholith: a cordierite-bearing granite. *Can. Mineral.*, 19, 47-63.
- Son, M., Seo, H.J. and Kim, I.S., 2000, Geological Structures and Evolution of the Miocene Eoil Basin, South-eastern Korea. *Geosciences Journal*, 4, 73-88.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50,000 Geological Atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. *Geol. Surv. Chosen* (in Japanese).
- White, A.J.R. and Chappell, B.W., 1977, Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43, 7-22.
- 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.*, 50, 11-30.
- Yoder, H.S., Jr., and Tilley, C.E., 1962, Origin of basaltic magma: an experimental study of natural and synthetic rock system. *Jour. Petrol.*, 3, 342-532.
- Yoon, S., 1991, Geologic events of the Tertiary Yangnam and Pohang basins, Korea: With a remark on the origin of the Yamato basin of the Japan Sea. *Saito Ho-on Kai Spec. Pub.*, 3, 303-309.
- Yoon, S., 1997, Miocene-Pleistocene volcanism and tectonics in southern Korea and their relationship to the opening of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 281, 53-70.
- Yun, H., Yi, S. and Byun, H., 1997, Tertiary system of Korea. *Paleont. Soc. Korea Special Publication*, 3, 1-30.

(2002년 9월 2일 접수, 2002년 10월 30일 채택)