

거제도 동부에 분포하는 고제3기 암맥군: 절대연대와 지구조적 의미

손 문¹ · 김종선^{1,*} · 황병훈¹ · 이인현² · 김정민³ · 송철우¹ · 김인수¹

Paleogene dyke swarms in the eastern Geoje Island, Korea: their absolute ages and tectonic implications

Moon Son¹, Jong-Sun Kim^{1,*}, Byoung-Hoon Hwang¹, In-Hyun Lee², Jeongmin Kim³,
Cheol Woo Song¹ and In-Soo Kim¹

¹부산대학교 지구환경시스템학부, ²시민환경연구소, ³한국기초과학지원연구원 동위원소 분석팀

¹Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Citizen' Institute for Environmental Studies, Seoul 110-761, Korea

³Isotope Research Team, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

요약: 거제도 동부 일운면 일대에는 백악기 말의 화강섬록암을 관입하고 있는 고제3기 암맥들이 발달한다. 이 암맥들은 북서 방향의 산성 암맥군과 서북서(A그룹)과 남북 내지 북북동 방향(B그룹)의 염기성 암맥군들로 구분된다. 야외 횡절관계를 근거하면 산성 암맥군이 가장 먼저 관입하였으며 다음으로 A그룹과 B그룹이 관입하였다. 산성 암맥군은 백악기 말-신생대 초 양산단층계의 좌수향 주향이동 단층운동에 수반되어 만들어진 인장 틀을 따라 관입한 것으로 판단된다. A그룹과 B그룹 염기성 암맥군들은 야외 암상과 관입 방향성에서 경주-감포 지역의 암맥군들 중 중성과 염기성 암맥군에 각각 대비된다. 또한 대비되는 두 지역 암맥군들은 전체 희토류 원소 함량과 콘드라이트에 표준화한 거미 성분도 및 미량원소와 희토류 원소 함량 패턴에서 유사한 양상이다. 이는 두 지역의 대비되는 암맥군들이 성인적으로 밀접히 관련되어 있음을 의미한다. K-Ar과 Ar-Ar 연대측정 결과를 종합하면, A그룹 암맥군은 64-52 Ma 사이에, B그룹 암맥군은 51-44 Ma에 관입한 것으로 판단된다. 이는 약 51 Ma를 전후로 한반도 남동부의 인장 응력장이 북북동-남남서에서 동서 내지 서북서-남남동으로 급격히 변화되었음을 의미한다. 고제3기 아시아 일원에서 발생한 주요 지구조 사건들을 고려하면, 64-52 Ma에는 북상하던 태평양판의 사고 섭입으로 동아시아 대륙연변에 북북서 방향의 광역적인 좌수향 전단 응력장이 작동하였으며, A그룹 암맥군은 이와 수반된 인장 단열들을 따라 관입한 것으로 해석된다. 한편, 약 55 Ma의 인도와 유라시아 대륙의 충돌에 의한 응력은 약 51 Ma 경에는 한반도 일원까지 전파된 것으로 보인다. 이로 인해 한반도를 포함한 동아시아 대륙이 태평양판 쪽으로 밀려감으로써 섭입하던 태평양판의 각도가 급해져 동아시아 연변에 강력한 흡입력이 발생하였으며, 이 때문에 태평양판의 운동 방향이 북북서에서 서북서방향으로 회전되었을 가능성이 있다. 따라서 약 51 Ma부터 한반도 동남부에는 지판 경계의 강력한 흡입력으로 동서 내지 서북서-동남동의 인장력이 작동되어 B그룹 암맥군이 관입한 것으로 해석된다.

주요어: 고제3기, 암맥군, 인도-유라시아 충돌, 태평양판, 해구퇴각, 흡입력

Abstract: The Paleogene dikes intruding into the late Cretaceous granodiorite are pervasively observed in the Irun-myeon, eastern Geoje Island. They are classified into three groups: NW-trending acidic dike swarm and WNW- (A-Group) and NS-NNE-trending (B-Group) basic dike swarms. Based on their cross-cutting relationships, the earliest is the acidic dike group and followed by A- and B-Groups in succession. The acidic dikes seem to have intruded into tension gashes induced by the sinistral strike-slip faulting of the Yangsan fault system during the late Cretaceous-early Paleogene. In terms of rock-type, orientation, age, and geochemistry, A-Group and B-Group are intimately correlated with the intermediate and basic dike swarms in the Gyeongju-Gampo area, respectively. These results significantly suggest that the corresponding dike swarms are genetically related. Based on the K-Ar and Ar-Ar age data, A- and B-Groups were intruded during 64-52 Ma and 51-44 Ma, respectively. The result means that the direction

*Corresponding author: kjsun@pusan.ac.kr, Tel. 82-51-510-2184

of tensional stress in and around the SE Korean peninsula was changed abruptly from NNE-SSW to EW~WNW-ESE at about 51 Ma. Considering the tectonic environments during the Paleogene, it is interpreted that A-Group was injected along the WNW-trending tensional fractures developed under an regional sinistral simple shear regime which was caused by the north-northwestward oblique subduction of the Pacific plate beneath the Eurasian plate. Meanwhile, the regional stress caused by the collision of India and Eurasia continents at about 55 Ma was likely propagated to the East Asia at about 51 Ma, and then the East Asia including the Korean peninsula was extruded eastwards as a trench-rollback and the dip of downgoing slab of the Pacific plate was abruptly steepened. As a result, the strong suction-force along the plate boundary produced a tensional stress field trending EW or WNW-ESE in and around the Korean peninsula, which resultantly induced B-Group to intrude passively into the study area.

Key words: Paleogene, dyke-swarm, India-Eurasia collision, Pacific plate, trench-rollback, suction-force

서 론

경상분지의 남부 남해안과 거제도 일대에는 특징적인 방향성을 갖는 암맥군들이 발달한다. 일반적으로 신장성 단열을 따라 마그마가 주입되는 수동형 관입 (passive injection)은 대부분 수십 % 이상 지각의 측방 신장과 함께 일정한 방향성을 가진 암맥군(dyke swarm)을 형성시키는 것이 특징이다(Price and Cosgrove, 1990). 따라서 수동 관입의 결과인 이곳 암맥군의 암석기재와 지화학적 특성 그리고 관입 방향성과 암석연령 등은 광역 혹은 지역적인 고응력장과 지각 변형사를 해석하고 이들의 지구조적 의미를 밝히는 하나의 수단으로써 유용하게 사용될 수 있다(Speight and Mitchell, 1979; Bussell, 1989; Glazner *et al.*, 1999; Borradaile, 2001; 김진섭 외, 2002b; Mayborn and Leshner, 2004; 김종선 외, 2005; Khan *et al.*, 2006).

신생대 고제3기에는 아시아 일원에서 매우 중요한 지구조 사건들이 발생한 것으로 알려져 있다. 이들 중 대표적인 사건으로 약 55 Ma경에 시작된 인도와 유라시아 대륙의 충돌사건을 들 수 있다(Tapponier and Molnar, 1976; Patzelt *et al.*, 1996; Hall, 2002). 이 사건으로 히말라야 조산대가 형성되고 인도차이나와 남중국지괴가 동남쪽으로 돌출되는 사건이 발생하였으며, 이때 아시아 대륙의 주요 지구조의 틀이 마련되었다. 또한 약 43 Ma경에는 태평양판의 이동방향이 북북서에서 서북서방향으로 급작스럽게 변화되는 사건이 발생하였다(Koppers *et al.*, 2001; Hall, 2002). 이로 인해 하와이-엠펜데르 군도를 비롯한 태평양의 열점에 의한 군도들이 굴곡 되었으며, 동아시아 연변의 섭입환경이 변화되어 대륙 연변에 다양한 지각변형이 발생하였다(Lonsdale, 1988; Stern and Bloomer, 1992; Hall, 2002). 한편, 이러한 지구조 사건들은 한반도 내에도 응력장을 변화시키고 특징적인 지질구조를 형성시켰을 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 이와 관련한 심도

있는 연구는 국내에서 찾아보기 어렵다. 이런 상황에서 최근 한반도 동남부에 분포하는 고제3기의 중성~염기성 암맥군이 이들 지구조 사건과 밀접히 관련되어 있을 가능성이 제기되고 있다(김진섭 외, 2002a, 2002b; 김종선 외, 2005; 손문과 김인수, 2005). 따라서 경상분지 남부에 분포하는 암맥군들의 암석학적 특성 그리고 관입 방향성과 지질연대는 고제3기 주요 지구조 사건들과 이로 인한 한반도의 지각변형에 관한 지식을 확대한다는 측면에서 중요하다.

이번 연구는 거제도 동부의 거제시 일운면 일원에 분포하는 백악기말 불국사화강암류를 관입하고 있는 암맥군들을 주 연구 대상으로 하였다(Fig. 1). 먼저, 야외조사를 통하여 암맥군의 분포, 암상 기재, 방향성, 횡절관계 등에 관한 자료들을 수집하였으며 이를 근거로 암맥군을 분류하였다. 분류된 각 암맥군의 대표 암석을 대상으로 경하관찰, 지화학 분석 그리고 K-Ar 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 전암 연대분석을 실시하여 암맥군들의 암석학적 특성과 지질시대를 결정하였다. 본 연구는 이러한 연구 결과들을 울산-경주 일원 고제3기 암맥군에 관한 선행연구의 결과들과(김진섭 외, 2002a, b; 김종선 외, 2005)과 비교·분석하여 그 지구조적 의미를 토의하는데 목적이 있다.

일반 지질

거제도의 전체 지질은 하위로부터 백악기 경상누층군의 퇴적암류(성포리층과 장목리층)와 화산암류(안산암질암과 데사이트질 회류용회암), 불국사화강암류에 해당하는 화강암, 화강섬록암과 섬록암 그리고 다양한 조성의 후기 암맥들로 구성된다(원종관 외, 1980; 김종선 외, 1998). 연구지역인 거제시 일운면 일대는 백악기의 퇴적암류, 화산암류, 화강섬록암 그리고 이들을 관입하고 있는 암맥류가 분포한다(Fig. 1). 장목리층(원종관 외, 1980)에 해당하는 퇴적암류는 대부분 강한 접

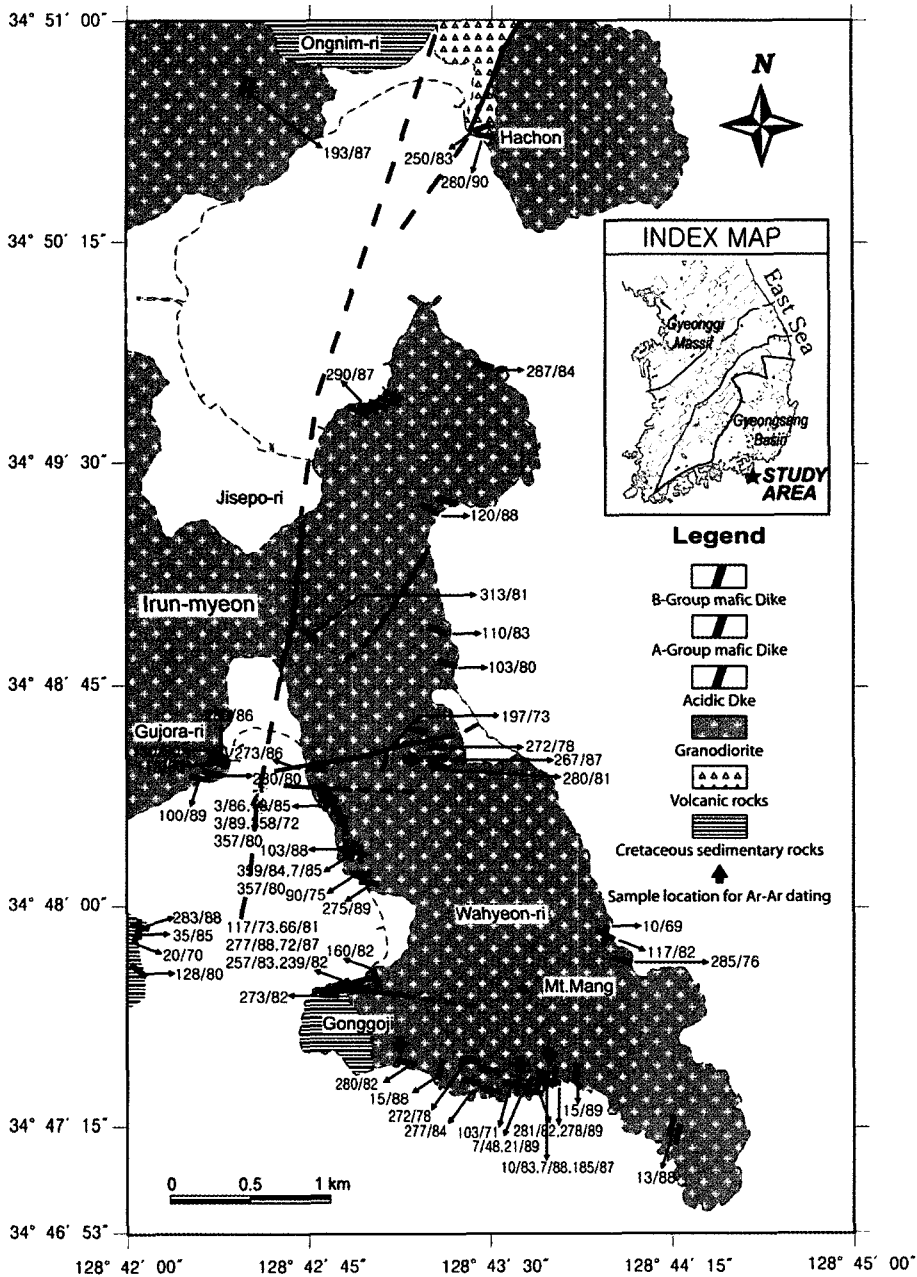


Fig. 1. Geological map in the study area showing the classification and distribution of dikes. The intrusion attitude (strike/dip) of dikes is measured according to the right-hand rule.

축변성작용을 받은 사암과 이암의 호층으로 구성되며, 일운면 옥림리, 구조라리와 와현리 공고지 일원에 소 규모로 분포한다. 주로 안산암질 화산력 응회암인 화산암류는 옥림리 하촌 일원에 국부적으로 분포하며, 퇴적암류와는 북북동 방향의 단층 접촉관계를 보인다.

연구지역에서 가장 넓은 분포를 보이는 화강섬록암은 퇴적암과 화산암류를 관입하고 있으며 관입 경계부에는 다량의 포획암(xenolith)과 함께 엽기성 미립 포유암(mafic microgranular enclave)이 산출된다(김종선 외, 2004). 주성분광물로는 사장석, 석영, 알칼리장석, 각섬

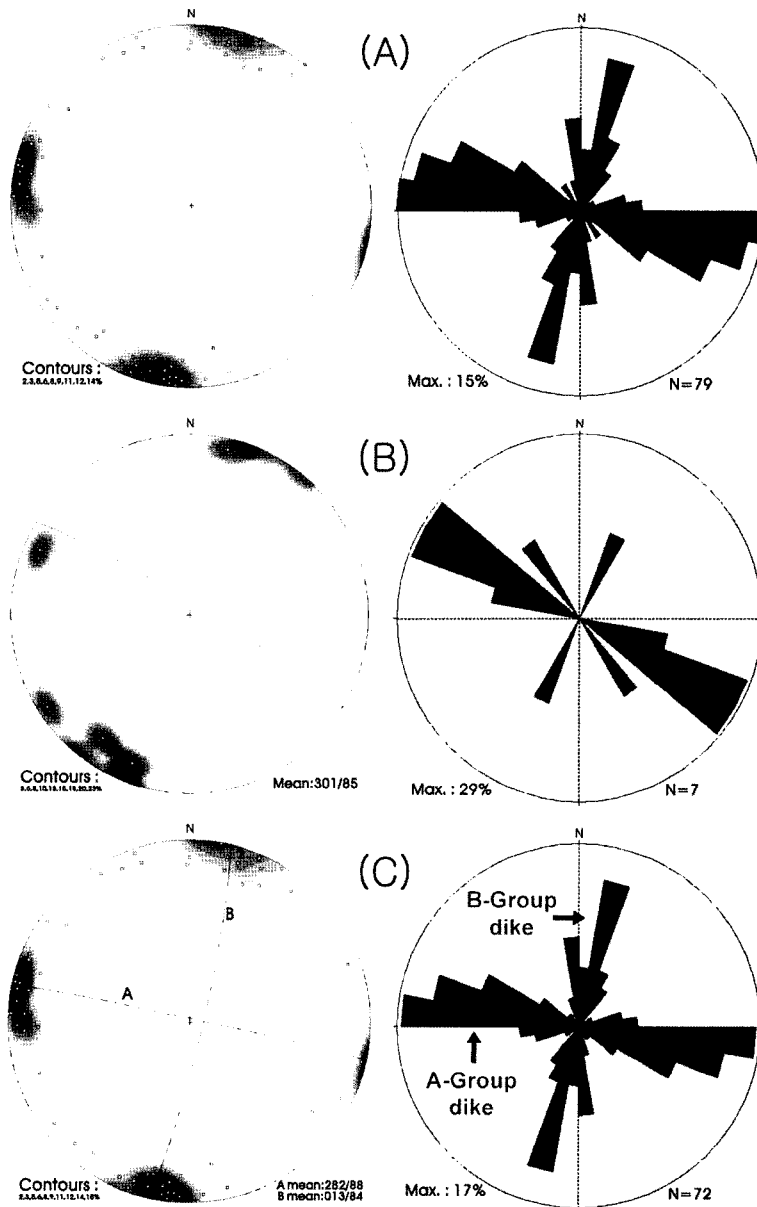


Fig. 2. Contoured π - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the intrusion planes of (A) all dikes, (B) acidic dikes, and (C) mafic dikes, respectively. Great circles in (B) and (C) indicate the mean attitudes. Mean: Strike/dip are measured according to the right-hand rule.

석 등이 있으며 소량의 휘석, 흑운모, 녹염석, 인회석, 녹니석, 불투명광물 등이 관찰된다. 화강섬록암은 석영과 사장석의 반정을 가지는 반상조직을 보이는 경우가 많으나 노두에 따라 다양한 조직으로 변화되는데, 이는 산성질 마그마에 염기성 마그마가 불균질하게 혼합(mingling)된 결과이다(김종선과 이준동, 2000). 이준희

와 이상원(1999)은 거제도 화강암류의 지화학적 연구를 통해 이들이 대륙연변부의 조구조적 환경에서 맨틀 또는 하부지각 물질이 부분 용융되어 생성된 칼크-알칼리 마그마가 결정 분화한 대륙호 내지 화산호 화강암임을 보고하였다. 한편, 거제도 화강암류에 대한 절대연령 자료가 아직 보고되어 있지 않아 정확한 관입

연대를 확인하기는 어려우나, 지리적으로 인접하며 암석학적 유사성을 보이는 진해지역과 고성지역 화강암류의 Rb-Sr 연대(Lee *et al.*, 1995; 좌용주, 1998)가 71 Ma(진해)와 71.3 ± 6.8 Ma(고성)로 알려져 있는 점을 고려한다면, 연구지역의 화강섬록암도 70 Ma를 전후하여 관입한 것으로 판단된다.

이번 연구의 주 연구대상인 암맥류는 연구지역의 전역에서 암맥군의 형태로 산출되는데, 특히 남쪽 해안선을 따라 노출되는 해안 절벽들에서 잘 관찰된다. 이들 암맥류는 야외에서 산성과 염기성 암맥으로 구분된다. 일반적으로 염기성 암맥들은 풍화에 약하고, 육안으로는 구별하기 어려울 정도의 세립질 또는 유리질의 기질부가 대부분을 차지하고 있기 때문에 야외에서의 정확한 암석 분류는 현실적으로 어려운 점이 있다. 이번 연구에서 염기성 암맥류는 야외에서의 색지수, 반정의 조합, 관입방향성 그리고 횡절관계를 근거로 하여 A그룹과 B그룹 암맥군으로 구분하였다(Fig. 1). 각 암맥군의 방향성과 횡절관계 그리고 암석기재 및 지화학적 특성들은 아래에 자세히 기술하였다.

암맥군의 관입방향과 횡절관계

연구지역에 분포하는 산성과 염기성 암맥들의 자세는 매우 체계적인 방향성을 보이는데, 전체적으로 서북서(약 $N80^{\circ}W$) 방향이 가장 우세하며 다음으로 북북동(약 $N10^{\circ}E$) 그리고 북서(약 $N60^{\circ}W$) 방향의 것들이 일부 관찰된다(Fig. 2A). 산성 암맥들은 북서 방향의 주향을 가지는 것들이 절대적으로 우세하며(Fig. 2B), 염기성 암맥들은 서로 수직에 가까운 서북서와 남북~북북동의 두 방향으로 관입면의 주향이 확연히 구분된다(Fig. 2C). 서북서의 암맥들은 남북~북북동의 것들에 비해 상대적으로 밝은 색지수를 보이는데, 야외에서 전자는 안산암질 암상에 그리고 후자는 현무암질 암상에 가깝다. 이번 연구에서는 이러한 관입방향성과 야외 암상을 근거로 하여 염기성 암맥들을 서북서의 것을 A그룹 그리고 남북~북북동 것을 B그룹 암맥군으로 구분하였다.

산성 암맥은 총 7매가 관찰되었으며, 예외적으로 관입면과 평행한 유문구조가 발달하는 약 4 m 폭의 유문암질 암맥 1매(Fig. 3A)를 제외하고는 연구지역 화강섬록암의 후기 잔류 마그마로 추정되는 반화강암(aplite)의 특징을 보여준다. 또한 이들 암맥은 염기성 암맥들에 의해 절단되고 있어 연구지역 암맥군들 중 가장 고기의 것으로 판단된다. 대부분 1 m 이내의 비교적 얇은 두께를 가지며 관입면은 $N50^{\circ}\sim 70^{\circ}W$ 의 주향과 70° 이상의 고각의 경사를 가진다. 이는 산성 암맥



Fig. 3. Acidic and mafic dikes in the study area. (A) Outcrop of the acidic dike with 4 m width showing rhyolitic structure. (B) Outcrop of the A-Group dike trending EW. (C) Outcrop of four NNE-trending B-Group dikes cutting the A-Group dike.

들이 관입될 당시 연구지역이 북동-남서 방향의 인장응력장 하에 있었음을 지시한다.

연구지역에서 가장 흔히 관찰되는 A그룹 암맥군은 총 43매를 대상으로 관입면의 방향성이 측정되었다. 이

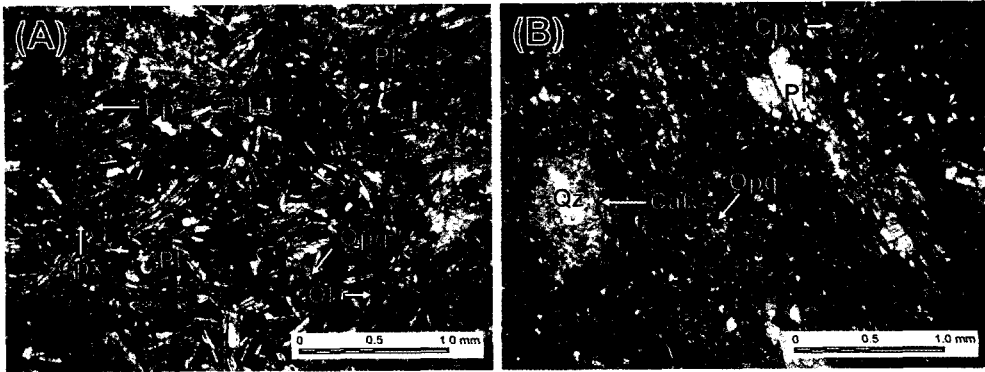


Fig. 4. (A) Photomicrograph of nonporphyritic fine grained and intergranular texture in A-Group mafic dike with minerals of plagioclase, clinopyroxene, opaque, and olivine in the Gonggoji (under crossed polars, X40). A black arrow: Curved quench crystals of plagioclase forming sheaf-like aggregate and swallowtail sections in A-Group mafic dikes. (B) Photomicrograph of porphyritic very fine grained and trachytic texture in B-Group mafic dike with minerals of plagioclase, clinopyroxene, and opaque (under crossed polars, X40).

들 암맥은 산성 암맥을 절단하고 있으며 모암의 기존 단열면을 따라 주입된 특징인 뚜렷한 관입 경계면을 보여주고 있어(Fig. 3B) 화강암질 마그마가 완전히 고화된 이후 관입된 것으로 판단된다. 두께는 수 cm에서 최대 약 7m까지 다양하나 1~2m 내외의 것들이 우세하게 산출되며 전형적인 암맥군 형태로 국지적으로 군집되어 출현한다. 관입면의 주향은 N60°~90°W에 집중되며 70° 이상 고각의 경사를 가진다. 따라서 이 암맥군은 북북동-남남서 방향의 인장응력장 하에서 수동적으로 주입된 것으로 해석된다.

B그룹 암맥군은 총 29매를 대상으로 관입면의 방향성이 측정되었다. A그룹과 마찬가지로 모암과 뚜렷한 관입 경계면을 형성하고 있으며 국지적으로 매우 군집되어 출현하는 경향을 보인다. 수심 cm에서 최대 약 5m의 두께로 산출되며 1~2m 내외의 것들이 우세하다. 이들은 산성 암맥은 물론이거니와 A그룹 암맥들도 절단하고 있음이 야외에서 관찰되고 있어(Fig. 3C) 연구 지역에 산출되는 암맥군들 중 가장 후기의 것으로 해석된다. 관입면의 주향은 N10°W~N20°E에 집중되며 역시 대부분 70° 이상 고각의 경사를 보여준다. 따라서 이 암맥군은 동서 내지 서북서-동남동 방향의 인장응력장 하에서 생성된 인장 단열들을 따라 주입된 것으로 판단된다.

암석기재

염기성 암맥들을 대상으로 이들 중 신선하고 대표적인 암상을 보이는 시료를 채취하여 현미경 관찰을 실

시하였으며 조직과 구성 광물들을 관찰하였다. 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

야외에서 A그룹 암맥군은 부분적으로 풍화, 변질되어 있으며 암청색에서 담녹색을 띤다. 암맥의 주변에는 관입방향과 평행한 녹염석맥 등의 세맥들이 흔히 관찰된다. 야외에서는 일견 안산암질 암석으로 판단되었으나, 경하에서 관찰하면 대부분 사장석, 감람석, 단사휘석(cpx)의 입상결정들을 가지고, 입간 조직(intergranular texture) 내지 서브오피틱(subophitic) 조직을 보이는 현무암질 암석인 것으로 동정된다(Fig. 4A). 입상결정 중 사장석(0.1~0.7 mm)이 약 70%로 가장 우세하다. 과냉각에 의해 간혹 여러 개의 결정들이 모여서 화살통과 같은 다발을 이루거나 깃털 모양의 형태를 이루며, 누대는 관찰되지 않는다. 0.1~0.5 mm 크기의 감람석, 휘석 등의 유색광물들은 대부분 녹염석 또는 녹니석으로 변질되어 있으며, 0.1 mm 이하의 불투명 광물이 점문상으로 관찰되기도 한다. 그리고 간혹 석영 결정을 포함하기도 하는데 이는 모암의 일부 결정을 포획한 것으로 판단된다.

B그룹의 암맥군은 A그룹에 비해 보다 국지적으로 집중되어 출현하는 경향을 보이며 대부분 풍화와 변질이 심하게 진행된 특징을 보인다. A그룹의 암맥군과는 달리 관입면과 평행한 녹염석맥 등의 세맥이 관찰되지 않는다. 또한 야외에서 이 암맥군은 보다 짙은 흑색 내지 암청색을 띠고 있어 A그룹에 비해 보다 고철질의 암상으로 추정되었다. 그러나 현미경 하에서 관찰하면, 주 구성광물로는 사장석, 단사휘석, 불투명광물 등이 산출되고 0.5~2 mm 내외의 사장석 반정과 함께 기질

부에는 0.1 mm 이하의 사장석이 조면암질 조직을 보여주고 있어 이 암맥군은 반상조직의 현무암 내지 현무암질 안산암으로 동정된다(Fig. 4B). 유색광물들은 대부분 변질되어 있으며, 간혹 행인을 2차적으로 충전한 방해석과 석영이 관찰되기도 한다.

지화학적 특성

염기성 암맥군들의 시료를 선별하여, 기초과학지원 연구원 서울분소에서 X-선형광분광분석(XRF)에 의해 주성분원소를, 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS)를 이용하여 미량원소를 분석하였다. 전철의 양은 Fe_2O_3 로 나타내었다.

주성분원소 분석을 통한 C.I.P.W. 노름(norm)값과 미량원소의 분석결과는 Table 1과 같다. 현무암과 현무암질 안산암의 SiO_2 함량의 상한을 각각 52 wt.%와 57 wt.%로 본다면(Cox *et al.*, 1979) A그룹의 암맥군은 현무암에 해당한다. 그리고 B그룹은 Fig. 5A의 TAS(Total alkali vs. SiO_2) 도표에서 조면암질 안산암의 경계에 도시되나, 암석의 풍화에 따라 알칼리 원소가 부화되는 점을 감안한다면, 현무암질 안산암에서 조면암질 안산암에 해당될 것으로 판단된다. 암맥군들의 분화계열을 밝혀보기 위해 Irvine and Baragar(1971)의 AFM 삼각도에 주성분 분석치를 도시하면(Fig. 5B), A그룹은 슬레이이트 계열(tholeiite series)에 B그룹은 칼크-알칼리 계열(calc-alkaline series)의 영역에 해당된다. 그러나 A그룹은 해양이나 대륙지역의 열개(rifting)와 관련된 전형적인 슬레이이트 계열로 판단하기에는 후술할 미량원소나 희토류 원소의 함량에서 지지되지 않는다. 알루미늄이나 포화도를 알아보면(Fig. 5C), Al 포화지수는 1.0 이하의 값으로 두 암맥군 모두 메타알루미나(metaluminous) 영역에 도시된다.

미량원소는 주성분원소에 비해 상대적으로 풍화나 변질에 따른 원소의 이동이 적기 때문에 각 암맥군의 특성을 파악하고 그룹간의 구별을 용이하게 해 줄 것으로 판단된다. 각 시료들에서 얻어진 미량원소와 희토류원소의 조성은 Table 1에 나타내었으며, 이들을 경주-감포 지역에서의 선행 연구결과(김진섭 외, 2002b)와 비교하였다. 이때 유사한 관입방향을 보이는 암맥군과 서로 비교하고자 하였으며, A그룹의 경우에는 경주-감포 지역의 중성 암맥들과 B그룹은 염기성 암맥군과 비교하였다. C1 콘드라이트(chondrite)에 표준화한 거미 성분도(spider diagram)(Fig. 6A)에서 A그룹을 경주-감포 지역의 중성 암맥과 비교하면, Ba, Th, Nb에서 낮은 값을 보이지만 전체적으로 유사한 패턴을 보

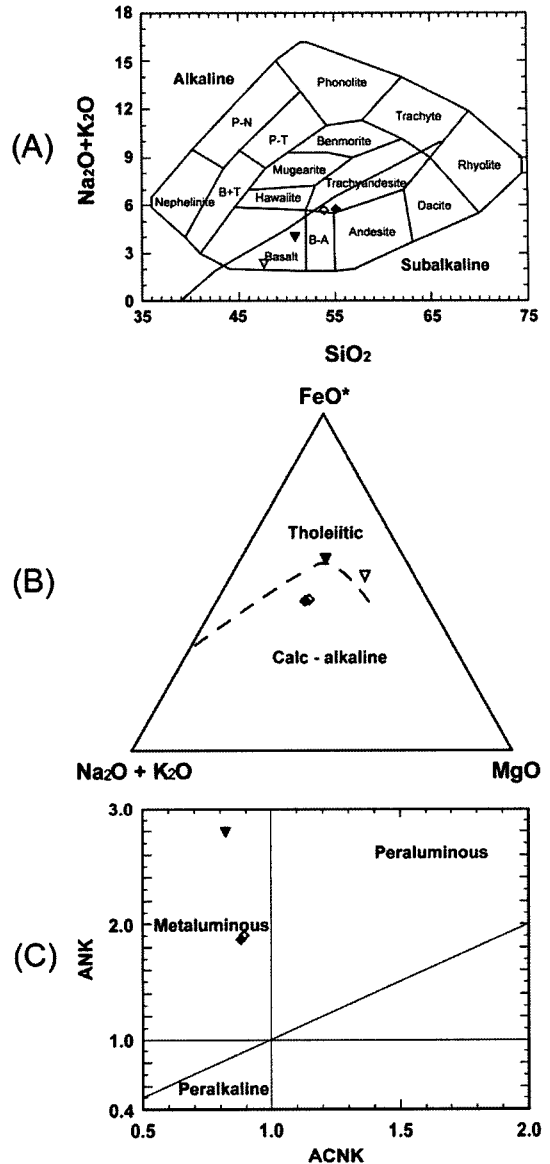


Fig. 5. (A) Plot of Na_2O+K_2O vs. SiO_2 for dikes of the study area (after Irvine and Baragar, 1971). (B) AFM diagram for dikes of the study area (after Irvine and Baragar, 1971). (C) Molar $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ vs. molar $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ diagram. ▽; GJA-1, ▼; GJA-2, ◇; GJB-1, ◆; GJB-2.

여준다. B그룹은 Nb와 Hf에서 약간 낮은 값을 보이지만 또한 서로 매우 유사한 패턴을 보인다. 그리고 전체적으로 불호정성 원소인 Rb, Ba, Sr, Th 등이 부화되어 있으며, Nb 함량이 상대적으로 결핍된 특징을 보인다. 이는 초기 큰 이온 친석원소(large ion lithophile

Table 1. Major elements, CIPW normative mineral compositions, and trace element abundances (ppm) of the dikes in the study area

Sample	GJA-1	GJA-2	GJB-1	GJB-2	Sample	GJA-1	GJA-2	GJB-1	GJB-2
SiO ₂	47.64	50.82	53.90	55.16	Sr	473.10	397.80	583.90	525.30
TiO ₂	0.90	1.08	1.11	1.07	Cs	0.93	0.77	0.29	0.60
Al ₂ O ₃	17.44	17.21	16.23	16.03	Ga	18.04	20.40	23.01	23.60
Fe ₂ O ₃ *	11.02	11.74	9.05	8.87	Nb	0.59	0.87	3.29	2.29
MnO	0.18	0.19	0.17	0.17	Hf	1.04	1.54	1.82	1.27
MgO	6.68	4.32	4.25	4.02	Zr	57.29	84.38	161.20	102.90
CaO	11.23	8.10	5.31	5.29	Y	14.42	19.88	23.33	21.65
Na ₂ O	1.96	3.28	4.23	4.20	Th	1.46	1.13	1.51	1.30
K ₂ O	0.35	0.73	1.47	1.55	U	0.49	0.35	0.38	0.36
P ₂ O ₅	0.15	0.18	0.42	0.40	Cr	81.51	7.58	87.46	57.49
LOI**	2.50	1.74	3.72	3.22	Ni	40.76	7.13	36.73	36.20
Total	100.05	99.39	99.86	99.98	Co	66.62	59.32	53.64	35.39
Q	0.00	1.64	3.45	5.16	Sc	30.37	27.93	19.84	17.25
C	0.00	0.00	0.00	0.00	V	247.20	254.60	182.40	175.40
Or	2.14	4.47	9.12	9.55	Cu	86.75	58.43	47.03	41.76
Ab	17.14	28.68	37.49	36.97	Pb	4.08	6.95	9.64	5.71
An	39.03	31.08	21.94	21.11	Zn	141.30	108.70	112.00	99.51
Di	14.54	7.85	2.57	3.13	Cd	0.03	0.14	0.10	0.07
DiWo	7.41	3.93	1.30	1.58	Mo	0.30	0.45	0.69	0.67
DiEn	4.07	1.76	0.67	0.79	La	8.59	9.39	22.30	21.36
DiFs	3.07	2.15	0.60	0.75	Ce	19.54	23.04	52.41	51.08
Hy	20.08	20.87	19.95	18.81	Pr	2.70	3.07	6.48	6.27
HyEn	11.45	9.41	10.48	9.67	Nd	14.59	16.46	34.07	33.01
HyFs	8.63	11.48	9.47	9.14	Sm	3.22	3.68	5.99	5.88
OI	2.27	0.00	0.00	0.00	Eu	1.08	1.23	1.84	1.83
OIFo	1.24	0.00	0.00	0.00	Gd	3.68	4.29	6.60	6.22
OIFa	1.03	0.00	0.00	0.00	Tb	0.51	0.65	0.87	0.81
Mt	2.68	2.88	2.31	2.25	Dy	2.87	3.84	4.68	4.31
Il	1.77	2.12	2.21	2.12	Ho	0.59	0.81	0.94	0.86
Ap	0.34	0.41	0.96	0.91	Er	1.67	2.30	2.70	2.49
C_I***	41.35	33.72	27.04	26.30	Tm	0.23	0.33	0.37	0.34
D_I****	19.29	34.79	50.06	51.67	Yb	1.51	2.17	2.52	2.31
Ba	116.50	155.80	325.30	483.30	Lu	0.23	0.33	0.38	0.36
Rb	22.52	19.66	7.28	25.12	ΣREE	61.01	71.59	142.15	137.13

Fe₂O₃*, total iron as Fe₂O₃; LOI**, Loss on ignition; C_I***, Color Index; D.I.****, Differentiation Index.

elements; LILE)의 부화가 상당했던 것으로 해석된다. 이와 같이 경희토류(light rare earth elements; LREE)에 비하여 고장력원소(high field strength elements; HFSE)가 결핍되고 강한 LILE 부화를 보이는 특징은 해양지판의 침강 섭입에 관련된 대륙 연변부나 도호 등의 조구조 환경과 관련된 암석에서 나타나는 것으로 알려져 있다.

연구지역 암맥들의 총 희토류 원소 함량은 A그룹에서 61.01 ppm과 71.59 ppm 그리고 B그룹에서 142.15

ppm과 137.13 ppm으로 두 그룹의 전체 희토류 원소 함량이 2배 정도 차이가 있다. 이는 경주-감포 지역의 중성 암맥과 염기성 암맥 전체 희토류 원소 함량의 평균 값이 각각 79.93 ppm, 157.54 ppm인 것과도 유사한 양상이다. C1 콘드라이트에 표준화한 연구지역 암맥군들의 희토류 원소 함량 변화를 살펴보면(Fig. 6B), 경희토류는 부화되어 있으며 중희토류 원소(heavy rare earth elements; HREE)는 상대적으로 결핍되어 있다. 특히 B 그룹에서 경희토류의 부화가 뚜렷하다. 경주-감포지역

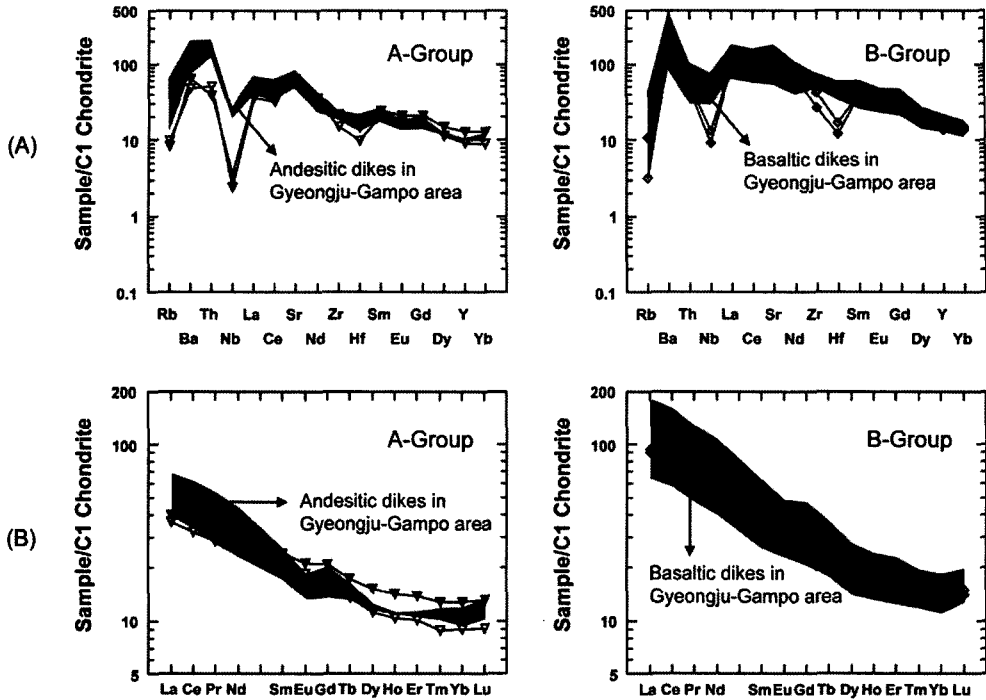


Fig. 6. (A) C1 chondrite normalized spider diagram for trace element (Sun and McDonough, 1989). (B) C1 chondrite normalized REE patterns (Sun and McDonough, 1989). Symbols are the same as those in Fig. 5.

의 암맥군들과의 비교에서 A그룹은 중희토류에서 약간 분산되어 있으나 평균적인 함량과 경향은 대체로 유사하며, B그룹은 상당히 일치하는 경향이다. 따라서 연구지역의 암맥군들과 경주-감포 일원의 암맥군들은 유사한 방향으로 대비되는 암맥군들이 미량원소와 희토류원소 함량 등에서 상당히 유사한 지화학적 특징을 보여주고 있다.

조구조 환경

Fig. 6에서 연구지역의 암맥군들이 LREE에 비하여 HFSE가 결핍되고 강한 LILE 부화를 보이는 특징을 살펴보았다. 그리고 이들의 조구조 환경을 알아보기 위해 여러 암석학자들에 의해 제시된 조구조 판별도에 도시하여 보았다. Pearce *et al.*(1977)의 MgO-Al₂O₃-FeO 도표(Fig. 7A)에 도시하면, 두 암맥군은 전형적인 조산대 안산암 영역에 도시된다. 그리고 Mullen(1983)에 의한 10*MnO-10*P₂O₅-TiO₂ 조구조 판별도(Fig. 7B)에서 A그룹은 도호 슬레아이트 현무암 영역에, B그룹은 칼크-알칼리 현무암 영역에 도시된다. Wood (1980)의 Th-Nb/16-Hf/3 조구조 판별도(Fig. 7C)에서는

지판이 침강 섭입하는 지판 경계부 환경에 도시된다. 이 영역은 다시 Hf/Th 비를 기준으로 원시 호상 열도의 슬레아이트 계열(Hf/Th > 3.0)과 성숙한 호상 열도의 칼크-알칼리 계열(Hf/Th < 3.0)로 구분되는데, 연구지역의 암맥군은 3 이하의 값으로 칼크-알칼리 계열의 영역에 해당된다. Meschede(1986)의 Zr/4-Y-2*Nb 도표(Fig. 7D)에서는 화산호 현무암의 위치에 도시된다. 이상의 여러 조구조 판별도들을 이용한 결과는 연구지역 염기성 암맥들의 조구조 환경이 조산대 화산호와 가장 관련이 있음을 지시한다.

절대연령

반정을 거의 포함하지 않고 변질의 증거가 보이지 않는 신선한 A그룹 암맥 1개와 B그룹 암맥 2개, 화강 섬록암 1개 시료에 대해 K-Ar 전암 연대를 측정하였다. 또한 보다 정확한 암맥군들의 관입시기를 알아보기 위해 A그룹 암맥 2개와 B그룹 암맥 2개에 대해서 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대측정을 실시하였다. K의 정량과 Ar 동위원소비 측정은 한국기초과학지원연구원 대덕 본소에서 실시되었다.

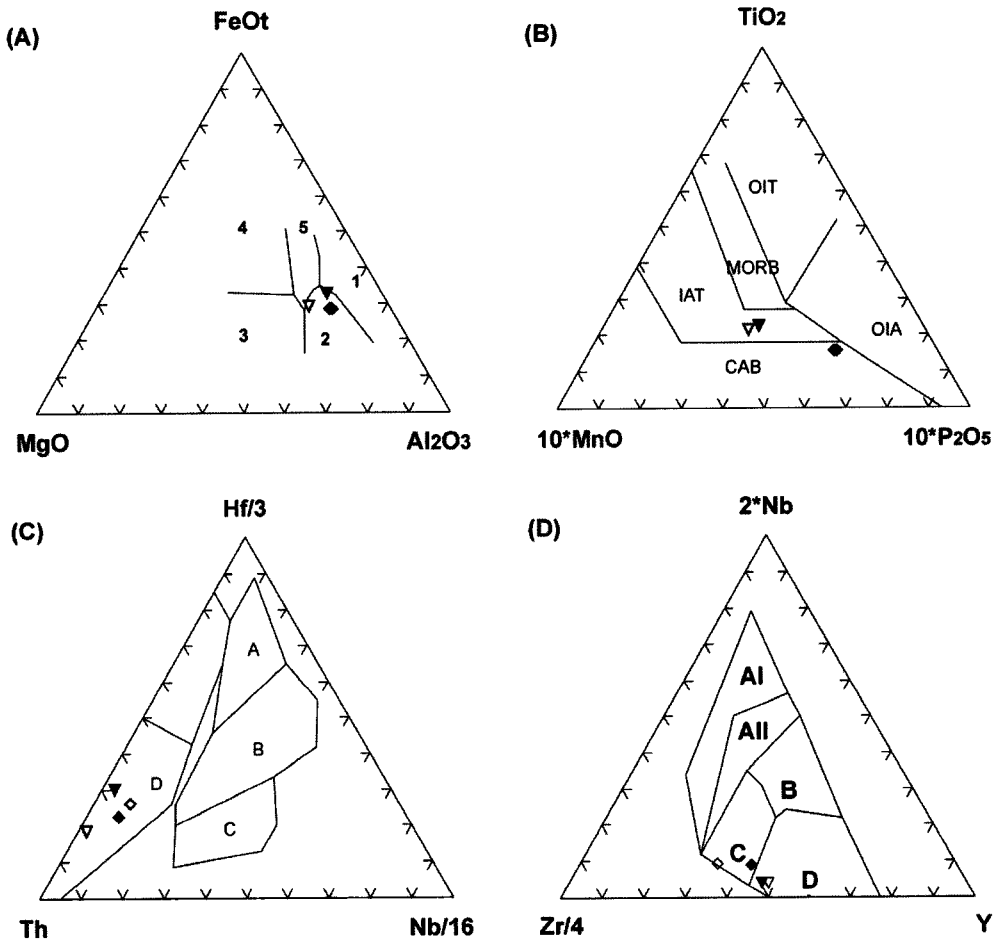


Fig. 7. Tectonic discriminant diagrams for mafic dikes in the study area. (A) MgO-Al₂O₃-FeOt diagram (after Pearce *et al.*, 1977) 1. Spreading center, 2. Orogenic suite, 3. Ocean ridge, 4. Ocean island, 5. Continental. (B) 10*MnO-10*P₂O₅-TiO₂ diagram (after Mullen, 1983) CAB; Calc-alkaline basalts, IAT; Island arc tholeiites, MORB; Mid-ocean ridge basalts, OIA; Ocean island andesites, OIT; Ocean island tholeiites. (C) Th-Nb/16-Hf/3 diagram (after Wood, 1980) A; N-type MORB, B; E-type MORB and tholeiitic WPB and differentiates, C; Alkaline WPB and WPB and differentiates, D; Destructive plate-margin basalts and differentiates, Note: WPB; Within-plate basalts. (D) Zr/4-Y-2*Nb diagram (after Meschede, 1986, Fig. 1) AI-AII; Within-plate alkaline basalt, AII-C; Within-plate tholeiites, B; P-type MORB, D; N-type MORB, C-D; Volcanic arc basalts. Symbols are the same as those in Fig. 5.

K-Ar

K의 함량은 원자흡광분광법(AAS)으로 정량화되었으며 그 오차는 5% 이내로 평가된다. Ar 동위원소비는 Ar 추출 라인과 연결된 VG5400 모델 불활성 기체 질량 분석기(static vacuum mass spectrometer)로 측정되었다. 분석기간 동안 측정된 표준물질의 연대 측정 결과를 보면 Baba-1 흑운모는 11.6±0.2 Ma(추천치 = 11.6 ±0.4 Ma)였다. K-Ar 연대 계산에 사용된 붕괴 상수와 K의 동위원소 존재 비는 λβ = 4.962 × 10⁻¹⁰ y⁻¹, λe = 0.581 × 10⁻¹⁰ y⁻¹, ⁴⁰K/K = 0.01167(atomic%)로 Steiger

and Jäger(1977)를 참조하였다. K-Ar 연대측정 결과는 Table 2와 같다.

A그룹 암맥에서 55.4±1.6 Ma, B그룹 암맥에서 51.5 ±1.5 Ma와 45.1±1.3 Ma, 화강섬록암에서 45.2±1.3 Ma의 연령을 얻었다. 암맥의 결과는 야외에서 B그룹 암맥군이 A그룹 암맥군을 관입하고 있는 것이 확인되므로 상당히 조화적인 결과로 판단되나, 화강암의 경우에는 이들 암맥이 화강암을 관입하고 있음에도 암맥의 연령과 유사하거나 상대적으로 젊은 연령결과를 보이는 것은 화강암의 관입정지 이후 암맥들의 관입에

Table 2. Whole rock K-Ar data for the mafic dikes and granite samples of the study area

Sample*	K (wt.%)	wt. (g)	⁴⁰ Ar radiogenic (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	³⁶ Ar (10 ⁻¹⁰ ccSTP/g)	Air (%)	Age (Ma)
A-2	1.343	0.01772	293.09	35.65	26.7	55.4 ± 1.6
B-1	0.971	0.01996	197.01	22.36	25.1	51.5 ± 1.5
B-2	1.049	0.01651	185.75	33.27	34.6	45.1 ± 1.3
G-1	2.217	0.02180	393.46	59.61	31.1	45.2 ± 1.3

*A-Group, B-Group, and granodiorite are abbreviated to A, B, and G, respectively.

의한 열적 영향에 의해 상당량의 Ar 손실이 일어났을
을 반영하는 것으로 해석된다(이종의 외, 1977).

Ar-Ar

일반적으로 암맥들은 큰 암체로서 분포하지 않아 분
화의 산물들을 추정하기 어렵기 때문에 Rb-Sr 연대측
정법을 적용하기에는 문제점이 있다. 한편 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연
대측정은 기존에 이용되었던 K-Ar법이 가지고 있는 여
러 가지 약점들을 보완할 수 있으며 시료의 불균질성
문제를 해결할 수 있고 과잉 또는 손실 Ar에 관한 정
보를 제공해 줄 수 있는 등 K-Ar 연대측정에 비해 많
은 장점을 지니고 있다(김정민 외, 2001). 연구지역의
시료에 대한 중성자 조사와 Ar 동위원소비 측정 등과
같은 자세한 실험 방법에 관한 내용은 김종선 외(2005)
를 참고하기 바란다. 측정된 동위원소들의 신호는 Uto
et al.(1997)의 계산방법을 응용한 스프레드시트 프로그
램을 이용해 최종적인 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 비를 구한 후 각 가열
단계의 연대를 계산하였다. 최종적인 플래토(plateau)
연대계산은 ISOPLLOT(Ludwig, 2001) 프로그램을 이용
하였다. 측정된 시료에 대한 Ar 동위원소비의 결과는
Table 3과 같고, 염기성 암맥군 시료의 연대 결과는
Fig. 8과 같다. GJA-1(64.1 ± 1.7 Ma, 60.0 ± 6.4 Ma),
GJA-2(54 ± 1 Ma, 53.3 ± 2.3 Ma), GJB-2(43.3 ± 1.1 Ma,
44.1 ± 2.6 Ma) 시료의 경우 플래토 연대와 등시선 연대
가 오차범위 내에서 일치한다(Fig. 8A, B, D). 한편,
GJB-1 시료의 경우 플래토 연대는 정의되지 않으나 일
부 스텝에서 얻어진 총 가스연대(total gas age)는 등시
선 연대와 일치하는 값을 가진다(h에서 P 스텝까지 이
용한 총 가스연대 = 57.9 ± 2.3 Ma, 56 ± 4 Ma)(Fig. 8C).
그러나 야외에서 B그룹 암맥군이 A그룹 암맥군을 관
입하고 있으므로 적어도 GJA-2B의 연대인 54 ± 1 Ma
보다 젊은 연대를 지시하여야 하나, 상대연령과 조화
적이지 않다. 따라서 일부 스텝에서 얻어진 총 가스연
대와 등시선 연대가 일치하는 값을 가지기는 하지만
의미 있는 연대로 해석하기 어렵다. 한편, 등시선의 Y
축 값이 모두 공기 기원의 값과 유사하기 때문에 모든

시료의 경우 방사기원의 Ar 과 공기 기원의 Ar 이외
다른 기원을 가진 Ar이 존재할 가능성은 없는 것으로
판단된다.

토 의

거제도 동부 일운면 일대에는 북서 방향의 산성 암
맥과 서북서(A그룹)와 남북~북북동(B그룹)의 서로 수
직에 가까운 두 방향성을 가지는 염기성 암맥들이 분
포하고 있다(Fig. 2). 이 암맥들은 같은 조성과 방향성
을 가지는 것들이 국지적으로 집중되어 분포하고 있어
고응력장을 밝히는 하나의 유용한 수단이 되는 수동형
암맥군의 특징을 보여준다. 특히, 이곳 염기성 암맥들
에서 나타나는 특징들은 경주-감포 지역의 암맥들(김
진섭 외, 2002a, b; 김종선 외, 2005)에서도 확인되고
있어 이들의 관입 사건은 광역적인 지구조 환경과 밀
접히 관련될 것으로 판단된다. 야외에서의 횡절관계를
살펴보면, 염기성 암맥들이 산성 암맥을 절단하고 있
으며 염기성 암맥군 중 B그룹이 A그룹을 절단하고 있
어 암맥군들의 상대연령은 산성 암맥이 가장 먼저이며
다음으로 A그룹과 B그룹의 순서임이 확실하다.

먼저, 대부분 북서 방향의 관입면을 가지는 연구지
역 산성 암맥들은 북동-남서 방향의 지각신장 사건을
암시한다(Fig. 2B). 이와 관련하여 최근 연구지역 북쪽
양산단층 동편의 화강암류에 대한 대자율 이방성 연구
에서(조형성 외, 2007), 60~70 Ma의 연령을 가지는 불
국사 화강암류의 자기적 엮리와 선구조가 북동-남서
방향으로 배열되어 있음을 근거로 이 시기에 양산단층
계가 좌수향 주향이동 운동을 하였으며, 이로 인해 단
층 주변에 북동-남서 방향으로 지각 신장이 발생하여
화강암질 마그마가 관입한 것으로 보고한 바 있다. 한
편, 연구지역 산성 암맥들은 출현 암맥군들 중 가장 고
기이며 대부분 화강암질 마그마의 후기 잔류물인 반화
강암의 특징을 보이고 있다. 이는 이 암맥들의 관입 시
기가 연구지역 화강섬록암의 정치(emplacement)와 동
시기 혹은 직후기임을 지시한다. 따라서 연구지역 화

Table 3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analytical data from whole rock in the study area

Sample No.	Temp (°C)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	K/Ca	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	^{39}Ar (%)	Age (Ma)	2s
(Type: Basaltic dike, Host rock: Granodiorite)									
GJA-1	600	101204.4	5.20	334.15	0.19	0.02	0.00	1140.0	456.5
	670	193878.3	63.66	645.38	0.01	0.02	0.00	1425.2	714.4
	730	8989.2	12.55	29.51	0.08	0.03	0.02	163.0	55.6
	800	2924.2	10.24	9.50	0.10	0.04	0.08	70.7	16.6
	850	1095.6	6.19	3.27	0.16	0.11	0.08	79.2	6.5
	920	706.8	4.33	2.02	0.23	0.15	0.14	66.8	5.2
	950	448.7	2.63	1.16	0.38	0.23	0.11	64.1	6.3
	1000	427.8	5.55	1.10	0.18	0.23	0.18	62.8	3.6
	1030	475.3	6.74	1.26	0.15	0.21	0.09	62.9	4.6
	1060	419.6	5.11	1.07	0.19	0.24	0.07	62.6	5.6
	1100	334.7	4.82	0.78	0.21	0.30	0.08	62.8	4.2
	1160	333.8	7.85	0.77	0.13	0.31	0.07	64.3	4.9
	1230	576.2	20.50	1.51	0.05	0.21	0.03	77.6	11.3
	1300	699.5	30.44	1.93	0.03	0.17	0.03	75.0	13.5
	1450	1053.1	31.89	2.91	0.03	0.17	0.01	115.2	29.1
(Type: Basaltic dike, Host rock: Granodiorite)									
GJA-2	600	71278.3	9.26	233.94	0.11	0.03	0.00	1026.7	408.3
	670	6252.9	4.37	19.74	0.23	0.07	0.01	248.2	47.0
	750	736.4	2.94	2.18	0.34	0.12	0.08	55.2	5.2
	780	441.4	2.19	1.17	0.45	0.21	0.04	57.0	6.6
	850	395.3	1.83	1.01	0.55	0.24	0.08	59.1	3.7
	880	203.7	1.47	0.37	0.68	0.45	0.04	56.8	4.0
	930	168.5	2.66	0.27	0.37	0.51	0.06	53.5	2.9
	960	190.1	3.47	0.33	0.29	0.48	0.05	56.1	3.3
	1010	171.2	4.89	0.28	0.20	0.49	0.10	52.3	2.8
	1040	136.2	2.46	0.16	0.41	0.63	0.07	53.2	2.5
	1070	136.7	1.74	0.15	0.57	0.66	0.08	55.3	3.6
	1100	131.3	1.08	0.14	0.93	0.67	0.11	54.3	2.6
	1120	131.2	1.64	0.14	0.61	0.68	0.09	54.9	3.6
	1150	147.6	2.81	0.18	0.35	0.63	0.11	57.0	3.1
	1170	214.3	6.32	0.38	0.16	0.46	0.04	61.7	4.3
	1230	438.3	17.23	1.10	0.06	0.24	0.02	66.7	6.3
	1280	443.7	18.70	1.11	0.05	0.24	0.01	68.2	10.2
	1350	683.6	22.10	1.79	0.04	0.21	0.01	92.9	16.8

강섬록암도 백악기 말~신생대 초의 양산단층의 좌수향 주향이동 운동(김인수, 1992)과 밀접히 관련되며 이러한 단층운동과 수반되어 만들어진 북서 방향의 소규모 인장 틈들을 따라 산성 암맥들이 관입되었을 가능성이 크다.

연구지역 염기성 암맥군들 중 A그룹은 평균 약 100°, B그룹은 평균 약 10° 주향의 매우 체계적인 관입면 방향성을 보여주고 있다(Fig. 1과 2C). 이는 경주-감포 지역의 중성~염기성 암맥군에서 관찰된 선행 연구결과와 유사한 것으로 고제3기 동안 한반도 동남부 전역에

서 상당히 체계적인 암맥군 관입 사건이 발생하였음을 암시한다. 야외 암상과 관입 방향성을 근거로 할 때, A그룹과 B그룹 암맥군은 각각 경주-감포 지역의 중성과 염기성 암맥군과 유사한 양상이다. 그러나 현미경상의 조직과 구성광물에서는 서로 차이가 있으며(Fig. 4와 김진섭 외, 2002a의 Fig. 3과 4), 주성분 원소의 분석 자료에서도 비교 암맥군들 간에 다소간의 차이가 확인된다(Table 1과 김진섭 외, 2002b의 Table 1).

한편, 두 지역의 대비 암맥군들이 동일한 모 마그마에서 유래되었을지라도 암맥의 조직은 암맥을 형성한

Table 3. Continued

Sample No.	Temp (°C)	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	K/Ca	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	^{39}Ar (%)	Age (Ma)	2s
(Type: Basaltic dike, Host rock: Granodiorite)									
GJB-1	740	15828.7	0.81	52.63	1.24	0.02	0.01	169.9	152.8
	820	37047.3	2.93	124.83	0.34	0.00	0.00	98.7	279.7
	930	10095.8	2.63	34.06	0.38	0.00	0.00	16.7	76.2
	1000	42297.2	19.28	140.52	0.05	0.02	0.00	450.3	2011.1
	1040	6388.6	5.59	21.43	0.18	0.01	0.00	34.0	91.0
	1080	1668.3	3.62	5.26	0.28	0.07	0.01	71.0	33.3
	1150	663.6	1.92	1.88	0.52	0.16	0.06	66.3	8.0
	1190	370.1	1.61	0.92	0.62	0.26	0.09	61.3	5.9
	1220	287.0	1.57	0.65	0.63	0.32	0.11	58.9	4.3
	1260	337.3	1.60	0.79	0.62	0.30	0.13	64.1	4.1
	1290	302.4	1.81	0.72	0.55	0.29	0.13	56.2	3.8
	1320	284.9	1.93	0.66	0.52	0.31	0.14	55.6	3.9
	1360	279.6	2.11	0.65	0.47	0.30	0.14	54.4	3.8
	1400	296.0	2.26	0.71	0.44	0.28	0.16	53.0	4.1
(Type: Basaltic dike, Host rock: Granodiorite)									
GJB-2	750	7373.0	1.46	24.90	0.69	0.00	0.00	7.4	83.1
	790	6965.9	2.10	23.49	0.48	0.00	0.00	13.1	106.0
	920	3734.5	0.99	12.30	1.01	0.03	0.01	62.3	46.5
	970	1734.6	0.88	5.57	1.13	0.05	0.02	54.8	33.4
	1000	921.9	0.80	2.95	1.25	0.05	0.02	30.7	13.7
	1040	668.3	0.99	2.09	1.00	0.07	0.03	29.7	7.6
	1070	402.8	1.16	1.20	0.86	0.11	0.04	28.3	5.9
	1110	465.2	1.12	1.38	0.89	0.12	0.06	35.1	7.3
	1140	314.8	0.86	0.85	1.17	0.19	0.07	38.3	3.3
	1170	223.1	0.55	0.52	1.83	0.30	0.07	43.2	4.1
	1210	259.0	0.68	0.63	1.47	0.27	0.10	45.4	2.9
	1250	193.2	0.81	0.40	1.24	0.37	0.11	46.0	3.5
	1290	205.5	1.04	0.44	0.96	0.36	0.14	46.7	2.9
	1330	155.0	0.93	0.26	1.07	0.48	0.15	47.4	2.6
1360	135.9	0.52	0.22	1.92	0.50	0.09	43.3	2.3	
1400	178.3	0.37	0.36	2.70	0.39	0.08	43.8	3.2	

Correction factors for interfering isotopes

$(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}$	-1.054E-03	1.123E-04
$(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}$	1.065E-03	6.406E-05
$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}$	3.409E+00	6.236E-02
J factor	0.00035657	1.127E-05

Notes: Isotopic ratios corrected for blank, radioactive decay, and mass discrimination, not corrected for interfering reactions. Calculated ages include errors in J and irradiation parameters. K/Ca is molar ratio calculated from reactor produced $^{39}\text{Ar}_{\text{K}}$ and $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}$.

마그마의 냉각률, 즉 초기 마그마의 온도, 주변 모암과의 온도구배, 주변 암맥들과의 거리, 암맥의 폭 등과 같은 여러 가지 변수에 좌우될 것이다. 또한 광물조성과 주성분원소 함량도 분화정도와 관입시기의 차이 등에 따라 차이가 나타날 수 있다. 이러한 점들은 암석

의 조직, 광물조성, 주성분원소 함량을 근거로 대비 암맥군들이 동일 마그마 기원인지를 확인하기에는 현실적인 한계가 있음을 의미한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 미량원소와 희토류원소의 함량과 패턴을 비교해 보면(Fig. 6), 경주-감포 지역과 이번 연구지

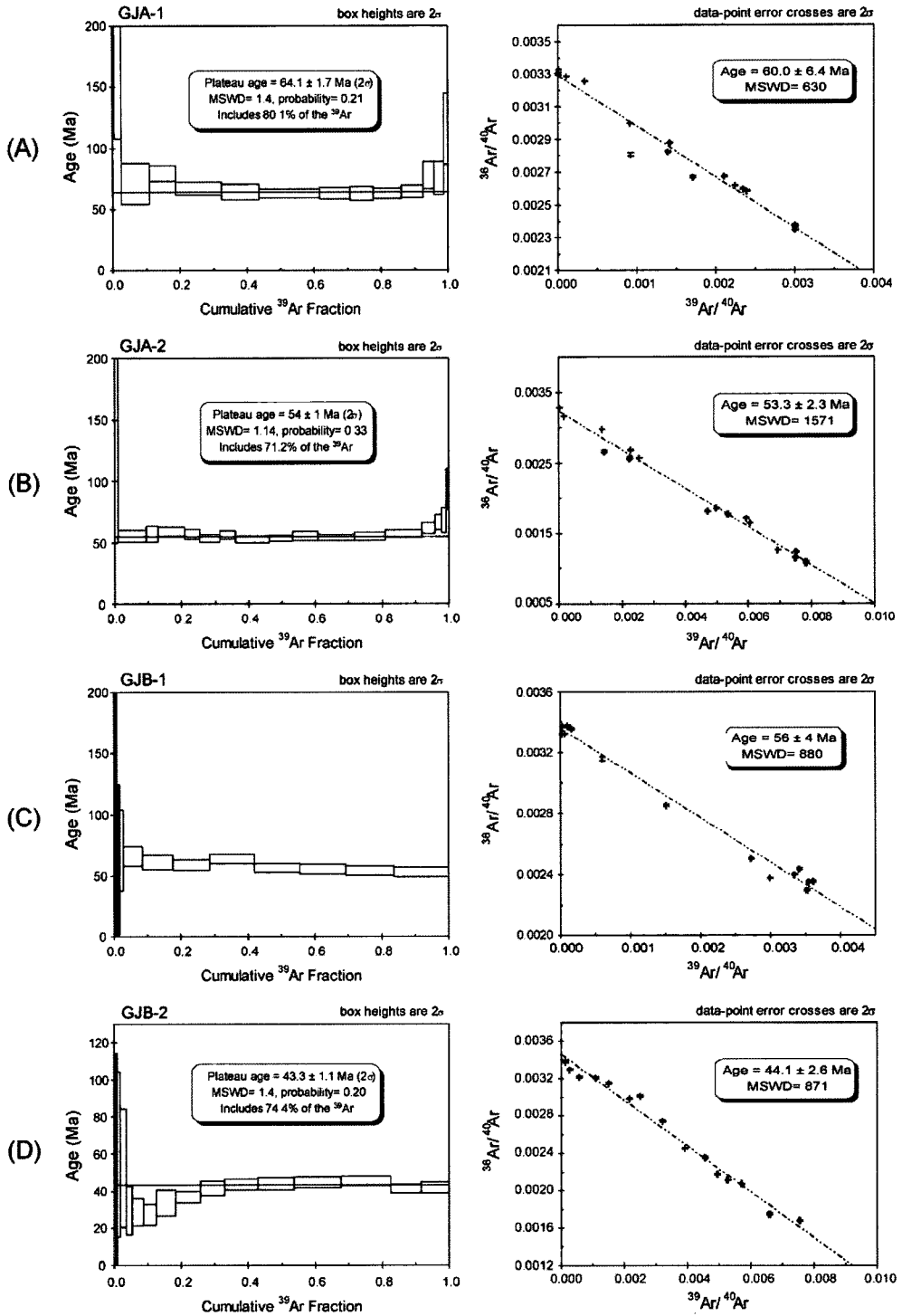


Fig. 8. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ release spectra and isochron diagrams from mafic dikes.

역의 암맥군들은 전체 회토류 원소 함량에서 동일한 관입방향 암맥군의 경우 유사한 양상을 보였으며, C1 콘드라이트에 표준화한 거미 성분도와 회토류 원소 함량 패턴도 몇 가지 원소를 제외하고 전체적으로 매우 유사한 변화 패턴을 보여주었다. 이는 두 지역의 각 암맥군들이 암석기재 및 주성분원소의 함량에서 다소간의 차이가 있을지라도 성인적으로 밀접히 관련되어 있음을 의미한다.

이번 연구의 K-Ar 연대측정으로 A그룹에서 55.4 ± 1.6 Ma, B그룹에서 51.5 ± 1.5 Ma와 45.1 ± 1.3 Ma의 결과를 도출하였으며, Ar-Ar 연대측정으로 A그룹에서 64.1 ± 1.7 Ma(GJA-1)와 54 ± 1 Ma(GJA-2), B그룹에서 44.1 ± 2.6 Ma (GJB-2)의 야외 횡절관계와 조화되는 결과들을 얻어내었다. 한편, 경주-감포 지역의 암맥군들에 대한 Ar-Ar 연대측정(김중선 외, 2005)에서 서북서 방향의 암맥에서 55.9 ± 1.5 Ma와 52.4 ± 0.9 Ma, 북북동 방향의 암맥군에서 47.3 ± 0.8 Ma와 48.0 ± 1.3 Ma의 결과를 보고한 바 있다. 이러한 일련의 연대측정 결과들을 종합하면, 평균 관입방향이 서북서인 A그룹 암맥들은 약 64~52 Ma 사이에, 남북 내지 북북동의 B그룹 암맥들은 약 51~44 Ma 사이에 관입된 것으로 판단된다. 이는 약 51 Ma를 전후로 한반도 남동부의 인장 응력장이 북북동-남남서 방향에서 동서 내지 서북서-남남동 방향으로 급격히 변화되었음을 의미한다. 그렇다면 각 시기 동안의 아시아 일원의 지구조환경은 어떠하였으며 약 51 Ma 전후로 한반도 동남부의 응력장이 왜 갑작스럽게 변화되었는지에 관해 토의해 보고자 한다.

먼저, 64~52 Ma 사이의 북북동-남남서 방향 지각신장과 관련한 지구조환경을 토의하면 다음과 같다. Maruyama *et al.*(1997)은 북상하던 쿨라(Kula)판이 60 Ma 경에 이미 오호츠크와 인접하게 위치하였음을 보고하였으며, Lonsdale(1988)과 Cottrell and Tarduno(2003)는 하와이-앰페리 해산의 고자기 연구를 통해 81 Ma경에 태평양판은 이미 오늘날 일본열도에 도달하였음을 보고한 바 있다. 한편, Engebretson *et al.*(1985)과 Konstantinovskaia(2001)는 감차가 일원에 대한 지구조 모델에서 65~55 Ma 사이 한반도를 포함하는 북서태평양 일원은 오호츠크판의 좌수향 변환단층계와 태평양판의 북북서 방향 섭입에 따른 좌수향의 지구조 응력장하에 놓여 있었던 것으로 보고하고 있다. 따라서 64~52 Ma 사이의 서북서 방향의 암맥군(A그룹)은 쿨라판을 뒤따르며 북상하던 태평양판의 사교 섭입으로 인하여 동아시아 대륙연변에 발생한 북북서 방향의 광역적인 좌수향 지구조 응력장하에서 만들어진 서북서 방향의 인장 단열들을 따라 수동적으로 관입된 것으로 판단된다.

51 Ma 전후의 급작스런 응력장의 변화와 이후 한반도의 동서 방향 인장응력은 인도-유라시아의 충돌에 의한 응력이 한반도 일원까지 전파되는 사건(Tapponnier and Molnar, 1976; Patriat and Achache, 1984; Besse and Courtillot, 1988; 김인수, 1992; Spence, 1993; Patzelt *et al.*, 1996; Hall, 2002)과 북북서에서 서북서 방향으로 태평양판의 이동방향이 변화되는 일련의 사건들이 복합적으로 관련될 가능성(Stern and Bloomer, 1992; Richards and Lithgow-Bertelloni, 1996; Sahabi *et al.*, 1996; Koppers *et al.*, 2001; Hall, 2002)이 높다. 즉, 약 55 Ma에 시작된 인도판의 충돌에 의해 한반도를 포함한 동아시아 대륙이 동쪽, 즉 태평양판 쪽으로 밀려감(extrusion)으로써 해구의 퇴각이 발생하였으며, 이로 인해 섭입하던 태평양판의 경사가 급해져 동아시아 연변에 강력한 흡입력(suction force)이 발생하여 태평양판의 운동 방향이 북북서에서 서북서방향으로 회전되었을 가능성이 있다. 이러한 지구조 환경의 급격한 변화로 동쪽으로 태평양판의 슬랩 퇴각(slab rollback)이 발생하고 한반도 동남부에는 동서 내지 서북서-동남동 방향의 인장력이 작용하기 시작하였으며, 이로 인해 남북 내지 북북동 방향의 염기성 암맥군(B그룹)이 관입한 것으로 해석된다. 최근 Schellart *et al.*(2006)은 남서태평양 지역에서도 이 시기(~50 Ma)에 중요한 지구조환경의 변화가 발생하였으며 이러한 변화는 태평양판의 슬랩 퇴각과 관련되어 있음을 주장하고 있다.

결 론

경상분지의 남부 거제도 동부 일면엔 일대에는 특징적인 방향성을 가지는 고제3기의 수동형 암맥군들이 발달한다. 이들 암맥군에 관하여 야외 기재, 경화관찰, 지화학 분석 그리고 K-Ar 및 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 전암연대 분석을 실시하여 얻어진 결과를 경주-울산 일원 고제3기 암맥군에 관한 선행연구 결과(김진섭 외, 2002a, b; 김중선 외, 2005)와 비교·분석하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 연구지역 암맥군들은 백악기 말의 화강섬록암을 관입하고 있으며, 북서 방향의 산성 암맥군과 서북서 방향(A그룹)과 남북 내지 북북동 방향(B그룹)의 두 조의 염기성 암맥군들로 구분된다.
2. 산성 암맥은 염기성 암맥에 의해 절단되며 염기성 암맥군 중 B그룹이 A그룹을 절단하고 있어 암맥군들의 상대연령은 산성 암맥이 가장 먼저이며 다음으로 A그룹과 B그룹의 순서이다.

3. 북서 방향 산성 암맥군은 대부분 반화강암의 특성을 보이고 있어 백악기 말~신생대 초 양산단층계의 좌수향 주향이동 운동과 수반되어 만들어진 인장 틈을 따라 관입하였다.

4. A그룹과 B그룹 암맥군들은 야외 암상과 관입 방향성에서 경주-감포 지역 암맥군들 중 중성과 염기성 암맥군에 각각 대비된다. 미량원소와 희토류원소의 함량 패턴을 비교해 보면, 경주-감포 지역과 연구 지역의 암맥군들은 전체 희토류 원소 함량에서 동일한 관입방향 암맥군의 경우 유사한 양상을 보였으며, 콘드라이트에 표준화한 거미 성분도와 희토류 원소 함량 패턴도 유사하다. 이는 두 지역의 대비되는 암맥군들이 성인적으로 밀접히 관련됨을 지시한다.

5. 연대측정 결과를 종합하면, A그룹 암맥군은 약 64~52 Ma 사이에, B그룹 암맥군은 약 51~44 Ma 사이에 관입하였다. 따라서 약 51 Ma를 전후로 한반도 남동부의 인장 응력장은 북북동-남남서 방향에서 동서 내지 서북서-남남동 방향으로 급격히 변화되었다.

6. 염기성 암맥군들의 관입 시기의 아시아 일원 일련의 지구조 사건들을 고려하면, 약 64~52 Ma 사이에는 북상하던 태평양판의 사교 섭입으로 동아시아 대륙 연변에 북북서 방향의 광역적인 좌수향 전단 응력장이 작동하였으며, A그룹 암맥군은 이로 인해 생성된 서북서 방향 인장 단열들을 따라 수동적으로 관입하였다.

7. 약 55 Ma에 시작된 인도와 유라시아 대륙의 충돌에 의해 발생한 응력이 약 51 Ma 경에는 한반도 일원까지 전파되어 한반도를 포함한 동아시아 대륙이 태평양판 쪽으로 밀려감으로써 해구의 퇴각이 발생한 것으로 판단된다. 이로 인해 섭입하던 태평양판의 각도가 급해져 동아시아 연변에 강력한 흡입력이 발생하여 태평양판의 운동 방향이 북북서에서 서북서방향으로 회전되었을 가능성이 있다. 이로 인해 태평양 북서변의 지구조 환경이 약 51 Ma 경부터 급격히 변화되기 시작하였으며 한반도 동남부에는 동서 내지 서북서-동남동 방향의 인장력이 작동되기 시작하여 B그룹 암맥군이 수동적으로 관입하였다.

사 사

이 논문은 2004년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구 정착금) 지원과 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2006-000-10457-0)을 받아 수행된 연구이다. 심사과정에서 유익한 의견을 주신 강원대학교 이회권 교수님과 부경대학교 박계현 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28, 84-109.
- 김정민, 정창식, 한현수, 조운갑, 2001, 하나로 원자로와 불활성 기체분석기를 이용한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대측정. 2001년도 한국광물학회·한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 60-64.
- 김종선, 김건기, 좌용주, 이준동, 2004, 경상분지 화강암류에서 발견되는 엔클레이브(포유암)에 대한 암석기재적 연구. 암석학회지, 13, 1-15.
- 김종선, 손문, 김진섭, 김정민, 2005, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대. 암석학회지, 14, 93-107.
- 김종선, 이준동, 2000, 거제도의 화강암질암의 지화학적 특성에 의한 마그마 불균질 혼합 증거. 지질학회지, 36, 19-38.
- 김종선, 이준동, 윤성효, 1998, 거제도 화강암질암의 마그마 불균질 혼합 증거: 1. 그 기체적 특성. 지질학회지, 34, 105-121.
- 김진섭, 김종선, 손문, 2002a, 한반도 남동부일원의 암맥군에 관한 지화학적 연구. 암석학회지, 11, 182-199.
- 김진섭, 손문, 김종선, 김인수, 2002b, 한반도 남동부 제3기 암맥군과 지구조적 중요성. 암석학회지, 11, 169-181.
- 손문, 김인수, 2005, 한반도 동남부 신생대 지각변형의 주요 특징과 그 지구조적 의미. 제21차 공동학술강연회 및 춘계학술답사, 대한지질학회, 대한자원환경지질학회, 7-31.
- 원종관, 지정만, 김수진, 윤선, 소철섭, 김형식, 1980, 한국 지질도(1: 50,000), 거제-울포지질도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 45p.
- 이종익, 이미정, 두경택, 이민성, Keisuke Nagao, 1997, 경상분지 중동부 울산-경주 지역의 화강암체에 대한 K-Ar 연대 측정. 지구과학회지, 18, 379-389.
- 이춘희, 이상원, 1999, 거제도에 분포하는 화강암류에 대한 암석학 및 암석화학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 61-79.
- 조형성, 손문, 김인수, 2007, 양산단층 동편 화강암질암의 대자율 이방성(AMS). 자원환경지질, 40, 171-189.
- 좌용주, 1998, 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구. II. 미량원소 지구화학과 Rb-Sr 방사성 연대. 자원환경지질, 31, 473-483.
- Besse, J. and Courtillot, V., 1988, Paleogeographic maps of the continents bordering the Indian Ocean since the Upper Jurassic. J. Geophys. Res., 96(B10): 11,791-11,808.
- Borradaile, G.J., 2001, Paleomagnetic vectors and tilted dikes. Tectonophysics, 333, 417-426.
- Bussell, M.A., 1989, A simple method for the determination of the dilation direction of intrusive sheets. Journal of Structural Geology, 11, 679-687.
- Cottrell, R.D. and Tarduno, J.A., 2003, A Late Cretaceous pole for the Pacific plate: implications for apparent and true polar wander and the drift of hotspots. Tectonophysics, 362, 321-333.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J., 1979, The inter-

- pretation of igneous rocks. George Allen & Unwin, London, 450p.
- Engelbreton, D.C., Cox, A. and Gordon, R.G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, 206, 1-59.
- Glazner, A.F., Bartley, J.M. and Carl, B.S., 1999, Oblique opening and noncoaxial emplacement of the Jurassic independence dike swarm, California. *Journal of Structural Geology*, 21, 1275-1283.
- Hall, R., 2002, Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20, 353-431.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Science*, 8, 532-548.
- Khan, T., Murata, M., Karim, T., Zafar, M., Ozawa, H. and Rehman, H., 2006, A Cretaceous dike swarm provides evidence of a spreading axis in the back-arc basin of the Kohistan paleo-island arc, northwestern Himalaya, Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, doi:10.1016/j.jseaes.2006.04.001
- Konstantinovskaia, E.A., 2001, Arc-collision and subduction reversal in the Cenozoic evolution of the Northwest Pacific: an example from Kamchatka (NE Russia). *Tectonophysics*, 333, 75-94.
- Koppers, A.A.P., Morgan, J.P., Morgan, J.W. and Staudigel, H., 2001, Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails. *Earth and Planetary Science Letters*, 185, 237-252.
- Lee, J.I., Kagami, H. and Nagao, K., 1995, Rb-Sr and K-Ar age determination of the granitic rocks in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea: Implication for cooling history of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochemical Journal*, 29, 363-376.
- Lonsdale, P., 1988, Paleogene history of the Kula plate: Off-shore evidence and onshore implications. *Geological Society of America Bulletin*, 99, 733-754.
- Ludwig, K.R., 2001, Users manual for Isoplot/EX. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 1a, 56p.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, 6, 121-142.
- Mayborn, K.R. and Leshner, C.E., 2004, Paleoproterozoic mafic dike swarms of northeast Laurentia: products of plumes or ambient mantle? *Earth and Planetary Science Letters*, 225, 305-317.
- Meschede, 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56, 207-218.
- 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 and Planetary Science Letters*, 62, 53-62.
- Patriat, P. and Achache, J., 1984, India-Asia collision chronology has implication for crustal shortening and driving mechanism of plates. *Nature*, 311, 615-621.
- Patzelt, A., Li, H., Wang J. and Appel, E., 1996, Palaeomagnetism of Cretaceous to Tertiary sediments from southern Tibet: evidence for the extent of the northern margin of India prior to the collision with Eurasia. *Tectonophysics*, 259, 259-284.
- 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 and Planetary Science Letters*, 36, 121-132.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 502p.
- Richards, M. and Lithgow-Bertelloni, C., 1996, Plate motion changes, the Hawaiian-Emperor bend, and the apparent success and failure of geodynamic models. *Earth and Planetary Science Letters*, 137, 19-27.
- Sahabi, M., Geli L., Olivet, J., Gilg-Capar, L., Roult, G., Ondreas, H., Beuzart, P. and Aslanian, D., 1996, Morphological reorganization within the Pacific-Antarctic Discordance. *Earth and Planetary Science Letters*, 137, 157-173.
- Schellart, W.P., Lister, G.S. and Toy, V.G., 2006, A Late Cretaceous reconstruction of the Southwest Pacific region: Tectonic controlled by subduction and slab rollback processes. *Earth-Science Reviews*, 76, 191-233.
- Speight, J.M. and Mitchell, J.G., 1979, The Permo-Carboniferous dyke-swarm of northern Argyll and its bearing on dextral displacements on the Great Glen Fault. *Journal of Geological Society of London*, 136, 3-11.
- Spence, D. A., 1993, Tectonics of the Higher and Tethyan Himalaya, Upper Kaghan Valley, NW Himalaya Pakistan: Implications of an early collisional, high pressure (eclogite facies) metamorphism to the Himalaya belt. Ph.D. Diss., ETH Zurich.
- Steiger, R.H. and Jäger, E., 1977, Subcommission on geochronology conversion on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359-362.
- Stern, R.J. and Bloomer, S.H., 1992, Subduction zone infancy: Examples from the Eocene Izu-Bonin-Mariana and Jurassic California arcs. *Geological Society of American Bulletin*, 104, 1621-1636.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle compositions and processes. In *Magmatism in ocean basins* (ed. A.D. Saunders and M.J. Norry), *Geol. Soc. London. Spec. Pub.* 42, 313-345.
- Tapponnier, P. and Molnar, P., 1976, Slip-line field theory

- and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264, 319-324.
- Uto, K., Ishizuka, O., Matsumoto, A., Kamioka, H. and Togashi, S., 1997, Laser-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating system of the Geological Survey of Japan: System outline and preliminary results. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, 48, 23-46.
- 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 and Planetary Science Letters*, 50, 11-30.
-
- (2007년 4월 25일 접수; 2007년 5월 28일 채택)