

## 한반도 남동부 제3기 암맥군과 지구조적 중요성

김진섭\* · 손문 · 김종선 · 김인수

부산대학교 지질학과

## Tertiary Dyke Swarms and their Tectonic Importance in the Southeastern Part of the Korean Peninsula

Jin-Seop Kim\*, Moon Son, Jong Sun Kim and In-Soo Kim

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

**요약:** 한반도 남동부의 울산단층 동편에는 염기성~중성 암맥군들이 우세하게 발달한다. 이 암맥들은 대부분 동해가 활발히 확장되었던 전기 마이오세(약 17 Ma 이전)의 지각 변형기 동안 동서방향의 지각 신장에 의해 만들어진 남북방향의 인장 균열을 통로로 관입하였다. 연일구조선을 경계로 서쪽지역과 인근지역 그리고 동쪽지역의 화강암체에서 관찰된 염기성 암맥의 평균 관입면 주향 방향은 동쪽으로 갈수록 시계방향으로 회전된다(N06°E→N15°E→N37°E). 또한 연일구조선 동편의 염기성 암맥의 주향 방향은 동쪽 해안에 가까워질수록 시계방향으로 보다 많이 회전된 특징(구룡포반도에서 N75°E)을 보여주었다. 이는 이들 암맥들이 정치 이후 연일구조선 동쪽의 것들만 시계방향 수평 회전운동을 겪었으며, 이들 중 동쪽 해안에 가까운 것일수록 보다 많은 양의 회전운동을 겪었음을 의미한다. 또한 동해의 확장으로 인해 대륙연변을 따라 발생한 북북서방향 우수향 전단력이 시간이 경과함에 따라 동에서 서로 전파되는 과정을 겪었으며, 연일구조선이 마이오세 분지 지역에서 흔히 관찰되는 지괴의 수평 회전운동을 규제한 주요 서쪽 한계선임을 지시하고 있다.

**주요어:** 한반도 남동부, 암맥군, 연일구조선, 동해 확장, 시계방향 회전

**Abstract:** Basic-intermediate dike swarms are pervasively developed in the east of the Ulsan Fault, SE Korea. Most of them intruded initially along the NS-trending extensional fractures which developed under EW extension during the East Sea opening in the Early Miocene (before about 17 Ma). The mean-strikes of the basic dikes intruding into the granites are more clockwise rotated in farther eastern side, i. e. N06°E, N15°E, and N37°E in the western side, in the just vicinities, and in the eastern side of the Yeonil Tectonic Line (YTL), respectively. And the mean-strike of the basic dikes nearby shoreline is also most clockwise rotated (N75°E in the Guryongpo Peninsula). The spatial variance indicates that the dikes, located only in the east of the YTL, experienced horizontal-clockwise rotation, and that the dikes in farther east from the YTL experienced more clockwise rotation. It is, thus, supported that the NNW dextral shear stress, generated by the spreading of the East Sea, was propagated toward inland from eastern continental margin of the Korean Peninsula, and that the YTL is an westernmost limit of the clockwise crustal rotations which are pervasively observed in the vicinities of the Miocene basins, SE Korea.

**Key words:** SE Korea, Dike swarm, Yeonil Tectonic Line, Spreading of East Sea, Clockwise rotation.

### 서 언

암맥의 정치기구(emplacement mechanism)는 일반적으로 기존 단열을 따라 마그마가 유입되는 수동형 관입(passive injection)과 마그마 압력에 의한 수압 단열

작용(hydraulic fracturing)의 결과인 강제형 관입(forceful injection)으로 구분된다(Price and Cosgrove, 1990). 강제 관입은 1% 내외의 미약한 지각 신장을 발생시키며 개개 암맥들이 고립되어 산출되는 것이 일반적인 반면, 수동형 관입은 대부분 수십 % 이상의 지각 측방

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

신장과 함께 일정한 방향성을 가진 암맥군(dike swarm)을 형성시키는 것이 특징이다. 따라서 수동 관입의 결과인 암맥군의 우세한 방향과 공간적 분포 특성은 광역 혹은 지역적인 지각 변형사와 고응력장을 해석하는 하나의 수단으로써 유용하게 사용되고 있다(Speight and Mitchell, 1979; Nicholson and Pollard, 1985; Bussell, 1989; Glazner *et al.*, 1999; Borradaile, 2001).

동해의 확장과 관련한 제3기 동안의 지각변형(한중환 외, 1987; Yoon, 1991; 김인수, 1992; Yoon, 1997; 손문, 1998) 과정에서 한반도 남동부에는 데사이트와 현무암질 암석으로 대표되는 이원성(bimodal) 화산활동(Yoon, 1991, 1997; 손문, 1998)이 빈번하게 발생하였으며 지각 균열을 따라 일정한 방향성을 가지는 암맥군들이 생성되었다. 이들 암맥군의 암석학적 특성과 방향성 그리고 분포 특성 등은 한반도 남동부에서 발생한 당시의 지각 변형과 고응력장을 해석하는 하나의 수단으로써 사용될 수 있다. 그러나 이러한 연구는 현재로서는 미미한 실정이다.

이번 연구에서는 마이오세 지각변형이 활발하게 진행되었던(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon, 1997; 손문, 1998) 울산단층(최현일 외, 1980)에서 동편 해안선까지의 지역(Fig. 1)을 대상으로 총 287개 암맥의 암석기재학적 특성과 관입면의 자세를 측정하여 시간과 공간적으로 분류하고 그 특징을 밝히고자 하였다. 이러한 결과를 기존 연구들에서 밝혀진 이 지역의 지각 변형 특성들과 비교 종합함으로써 암맥군 관입과 관련된 고응력장과 이후의 지각 변형사를 해석해 보고자 하였다.

## 지질학적 배경

연구지역의 지질은 하위로부터 백악기 경상누층군의 하양층군과 유천층군, 백악기~고제3기 불국사화강암류와 왕산석영안산암질화산암류, 전기 마이오세 범곡리 및 장기층군, 그리고 중기 마이오세 초 연일층군으로 구성된다(Fig. 1). 연구지역의 하양층군은 울산도폭의 울산층, 대구도폭의 대구층, 마산도폭의 함안층에 대비되며(박양대와 윤형대, 1968), 녹회색 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 윤형대, 1968). 불국사화강암류는 울산단층을 따라 양편에 넓게 분포하는데 암상에 따라 흑운모화강암과 화강섬록암으로 구분되기도 한다(이미정 외, 1995; 이준동과 황병훈, 1999). 윤선(1988)에 의해 처음으로 명명된 왕산석영안

산암질화산암류는 주로 용결구조가 발달하는 데사이트질 화산쇄설암으로 구성된다.

제3기 퇴적분지에는 전기 마이오세 동안에는 데사이트 내지 현무암질 화산쇄설물과 육성 퇴적물이 퇴적되었으며 이후 중기 마이오세 초에는 화산 물질을 포함하지 않는 육성 혹은 해성 퇴적물로 충전되었다(윤선, 1988; Yun *et al.*, 1997; 손문, 1998). 전기 마이오세의 분지 충전물은 범곡리층군과 장기층군으로 구분되고 있으나 연구자에 따라 각 층군의 정의가 다르며 현재까지 두 층군의 상대적 지질시대에 관한 논란이 계속되고 있어(Tateiwa, 1924; 윤선, 1988; Yun *et al.*, 1997; 손문 외, 2000) 이번 연구에서는 두 층군을 묶어 지질도를 작성하였다(Fig. 1). 중기 마이오세 연일층군은 최근의 야외조사에서 기존에 알려진 것보다 넓게 분포함이 밝혀졌는데, 와읍분지와 그 남쪽 연일구조선 인접부에는 주로 육성층(손문 외, 2000, 2002)이 그리고 포항분지, 어일분지, 하서분지 그리고 정자분지 내에는 주로 내만성 기원의 해성층(윤선, 1988; Yun *et al.*, 1997)이 분포한다.

제3기 지각변형기 동안 한반도 남동부에는 지각 확장과 함께 북동방향의 정단층과 북북서방향의 우수향 주향이동단층들로 구획된 지구 내지 반지구형 퇴적분지들이 만들어졌다(Fig. 2: 손문과 김인수, 1994; 손문, 1998; Son *et al.*, 2000; 손문 외, 2000, 2002). 또한 분지 기반암과 충전물의 층리면이 대부분 북서방향으로 경사져 있으며 젊은 지층일수록 그 경사각이 얕아지고 있어, 단층으로 구획된 지괴들은 분지가 확장되던 동안 대부분 북서방향으로 경동(tilting)되는 사건을 겪은 것으로 해석되고 있다.

한편, 제3기 분지 일원에 분포하는 약 16 Ma 이전 암석들의 잔류자기 편각 방향이 시계방향으로 평균 약 30° 이상 회전된 특징을 보인다(Kim *et al.*, 1986; 김인수와 강희철, 1989; 김광호와 도성재, 1994; Lee *et al.*, 1999). 이러한 잔류자기 편향 현상은 마이오세에 동해가 활발히 확장되었던 동안 한반도와 동해의 울릉해분을 나누는 동한단층(East Korea Fault; 김인수, 1992) 혹은 해저 절벽(Basement Escarpment; Yoon and Chough, 1995)을 따라 발생한 북북서방향 우수향 전단력에 의해 지괴들이 시계방향으로 회전된 결과로 해석된다(김인수, 1992; 손문, 1998; 손문 외, 2002). 이와 관련하여 분지의 형성과 지괴 회전운동의 서쪽 한계선을 밝히기 위해 실시된 고자기학(Son *et al.*, 1997; 김인수 외, 1998)과 구조지질학 연구들(손문 외, 1999, 2002; Son and Kim, 2001)은 이러한 지각 변형을 규제한 서쪽 한계선이 일반적으로 알려져 왔던 울산단층

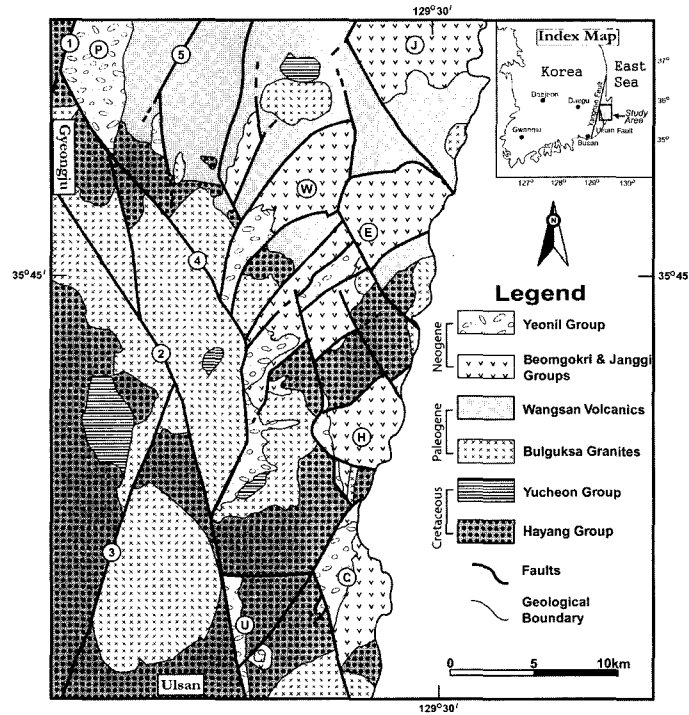


Fig. 1. Geological map of the study area. Faults ①: Yangsan Fault, ②: Ulsan Fault, ③: Dongrae Fault, ④: Yeonil Tectonic Line (YTL), ⑤: Ocheon Fault. Tertiary Miocene basins, ⑩: Ulsan Basin, ⑪: Jeongja Basin, ⑫: Haseo Basin, ⑬: Eoil Basin, ⑭: Waeup Basin, Janggi Basin, ⑮: Pohang Basin.

혹은 양산단층(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995)이 아니라 울산단층보다 약 5km 동쪽에 위치하는 새로운 구조선임을 밝히면서 이 구조선을 연일구조선으로 명명하였다.

### 암석기재학적 특징

연구지역 내의 암맥들은 풍화에 약하며 육안으로 구별하기 어려운 정도의 세립질 혹은 유리질인 기질부가 대부분을 차지하고 있기 때문에 야외에서 정확한 암상 분류는 현실적으로 어려운 점이 많다. 따라서 야외에서는 암석의 색지수 그리고 육안으로 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, 그 조직과 구성 광물들을 관찰하였다. 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

### 염기성 암맥

염기성 암맥은 연구지역에서 가장 광범위하고 빈번

히 출현하는데, 이번 조사에서 총 266개가 관찰되었다. 이들 암맥은 제3기 분지의 기반암인 하양층군, 유천층군, 불국사화강암류와 분지 충전물인 전기 마이오세 지층을 관입하고 있으며 특히, 화강암류에서 가장 빈번히 산출된다. 그러나 중기 마이오세초의 연일층군에서는 전혀 관찰되지 않는다. 이들은 전기 마이오세 지층의 것을 제외하고는 분지 기반암에서 대부분 암맥군의 형태로 산출되는데(Fig. 3A-1, 3B-1) 대체로 풍화, 변질되어 있으며 야외에서 짙은 암녹색 혹은 암회색을 띤다. 관입 폭은 수 cm에서 15 m까지로 다양하나 1 m 내외의 것이 가장 우세하다. 관입 폭에 따라 냉각 속도가 달라지므로 대체적으로 암맥의 폭이 큰 경우에 기질부의 입자 크기가 커지는 경향이 있다.

경하에서 관찰하면 대부분 사장석, 감람석, 단사휘석(cpx), 각섬석의 반응을 가지고 오피틱 또는 서브오피틱 조직을 보이는 현무암 내지 현무암질 안산암 계열의 암석인 것으로 판단된다(Fig. 3). 분지 기반암을 관입하고 있는 암맥들은(Fig. 3A-2, 3B-2) 대부분 사장석(0.5~2 mm 정도의 크기)이 약 70%로 가장 우세하며 감람석, 단사휘석, 각섬석 등의 반응을 보여준다. 0.1~

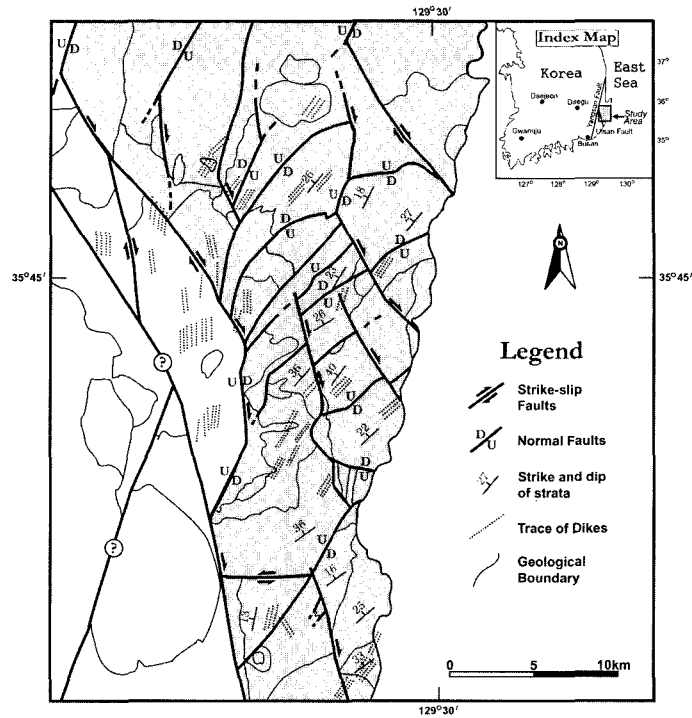


Fig. 2. Structural map of the study area showing the traces of major faults, bedding, and dikes. Shaded area indicates the only area in which the Tertiary Miocene basins are developed, and in which the clockwise deflections of remanent magnetizations are observed.

1 mm 크기의 휘석, 각섬석, 흑운모 등의 유색광물들은 대부분 변질되어 있다. 또한 0.1 mm 이하의 불투명 광물이 점문상으로 관찰되기도 한다. 일반적으로 사장석 반정은 결정 크기가 가장 크며 장방형의 외형을 보이고 누대는 관찰되지 않는다. 변질광물로는 녹니석, 녹염석, 견운모, 방해석 등이 나타난다. 이들 암맥들은 연일구조선을 경계로 하여 서편과 동편에서 동일한 조직과 광물 조합을 보여주는데(Fig. 3A-2, 3B-2), 이는 연일구조선의 양편 암맥들이 유사한 마그마로부터 기원되었음을 지시한다. 한편, 경주시 개곡리 일대의 일부 암맥에서는 석영의 반정이 산출되기도 하는데(Fig. 3C) 유색광물의 함량과 반정의 비율도 상대적으로 높은 특징을 보여주었다.

전기 마이오세 화산암류를 관입한 암맥들은 야외에서 장방형의 사장석이 관찰되나 그 외 반정은 식별하기 어려웠다. 와읍분지에서 피더 암맥(feeder dyke) 산상을 보이며 범곡리층군 용동리용회암(손문 외, 2000)을 관입한 암맥의 경우에는 사장석, 감람석, 휘석 반정과 함께 극세립 내지 유리질 기질부를 보이는 전형적인 반상 조직을 보여주었다(Fig. 3D). 이 암맥은 유색

광물의 함량이 낮으며 기반암을 관입한 것들에 비해 반정의 양이 상대적으로 적은 인터서털(intersertal) 조직을 특징적으로 보여주었다.

### 중성 암맥

연구지역 내에서 중성 암맥은 연일구조선 동편에서만 8곳에서 관찰되었다. 하서분지 서쪽 경주시 양남면 상계리의 불국사화강암류와 양북면 범곡리 추령고개의 전기 마이오세 추령각력암(윤선, 1988)에서 폭 1~3 m 내외로 산출된다. 불국사화강암류 내의 것은 치밀하고 세립질이며 간혹 사장석 반정이 관찰되나 추령각력암의 것은 자형의 사장석, 흑운모 그리고 타형의 석영 반정이 뚜렷한 반상 조직을 보여준다. 경하 관찰에서 불국사화강암류의 것은 사장석, 휘석, 각섬석 등이 반정으로 산출되고 취반상 조직이 관찰되며 기질부는 주로 사장석과 휘석으로 구성되어 있어(Fig. 4A), 이 암맥은 안산암질 암석인 것으로 판단된다. 한편, 추령각력암의 것은 기질부는 풍화로 인해 광물의 식별이 어려우나 사장석, 석영, 흑운모의 반정들이 대부분을 차지하는 것으로 보아(Fig. 4B) 이 암맥은 데사이트질 암석으로

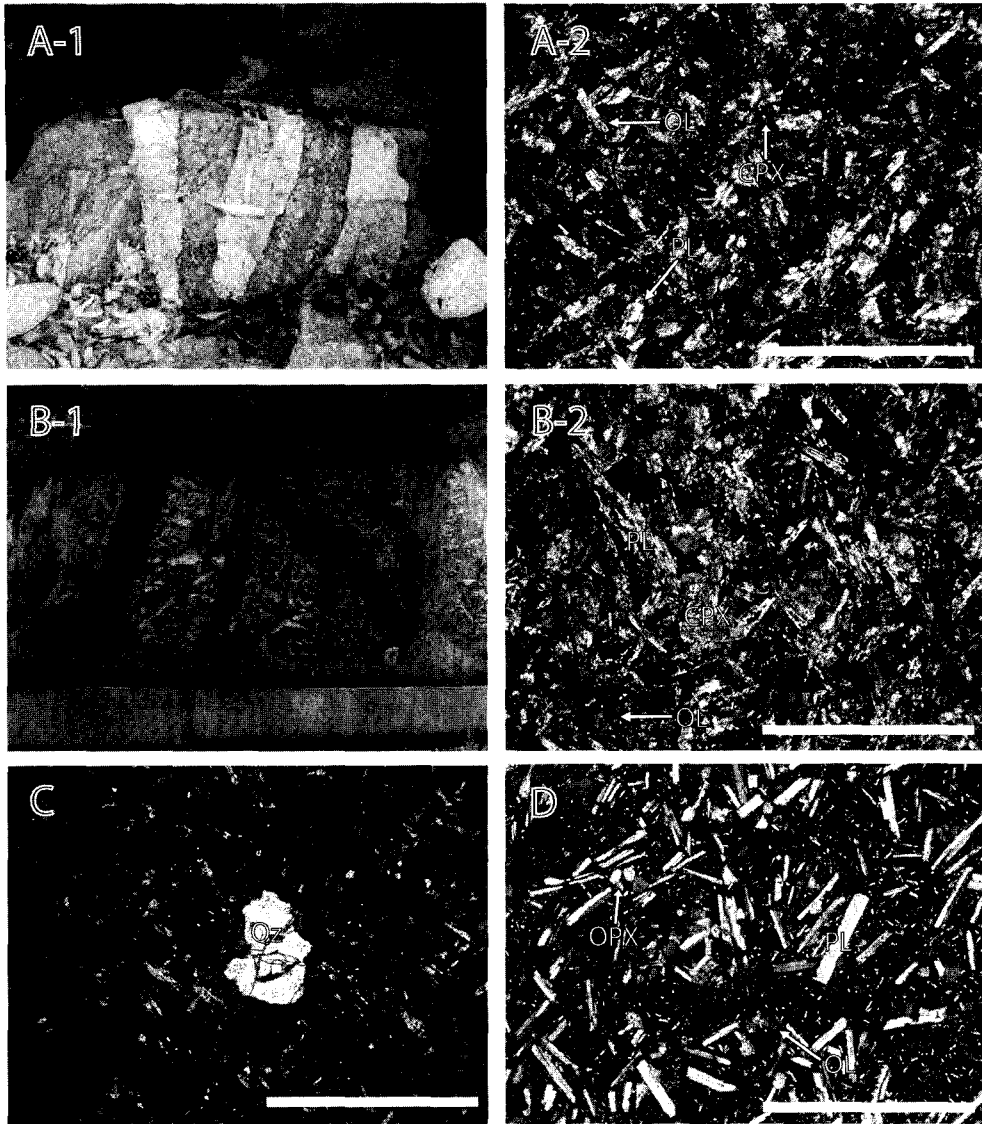


Fig. 3. Mafic dikes in the study area. A-1) Outcrop of mafic dyke in the west of the Yeonil Tectonic Line (YTL). A-2) Photomicrograph of mafic dyke with phenocrysts of plagioclase (PL), clinopyroxene (CPX), and olivine (OL) in the west of the YTL (under crossed polars, X40, white bar in plates=1 mm length). B-1) Outcrop of mafic dyke swarm in the east of the YTL. B-2) Photomicrograph of mafic dyke with subophitic texture in the east of the YTL (X40). C) Photomicrograph of mafic dyke with phenocrysts of quartz (Qz) (X40). D) Photomicrograph of mafic dyke with phenocrysts of plagioclase, olivine, and orthopyroxene (OPX) and intersertal texture in Early Miocene volcanics (X40).

판단된다.

#### 산성 암맥

연일구조선 동편과 서편에서 13개의 산성 암맥이 관찰되었다. 이들은 불국사화강암류와 그 이전의 암석들을 관입하고 있으며 마이오세 암석들에서는 관찰되지

않는다. 야외에서 장석과 석영 반정들이 관찰되었으며 일부는 풍화된 표면에서 유동 구조가 나타난다. 경하 관찰을 통해볼 때, 산성 암맥은 유문암질 암석인 것으로 판단된다. 대부분 정장석, 석영, 사장석의 반정이 우세하게 관찰되며 사장석 반정의 양이 상대적으로 적다. 반정 주위로 석영과 유사한 입자가 선상 배열을 하고

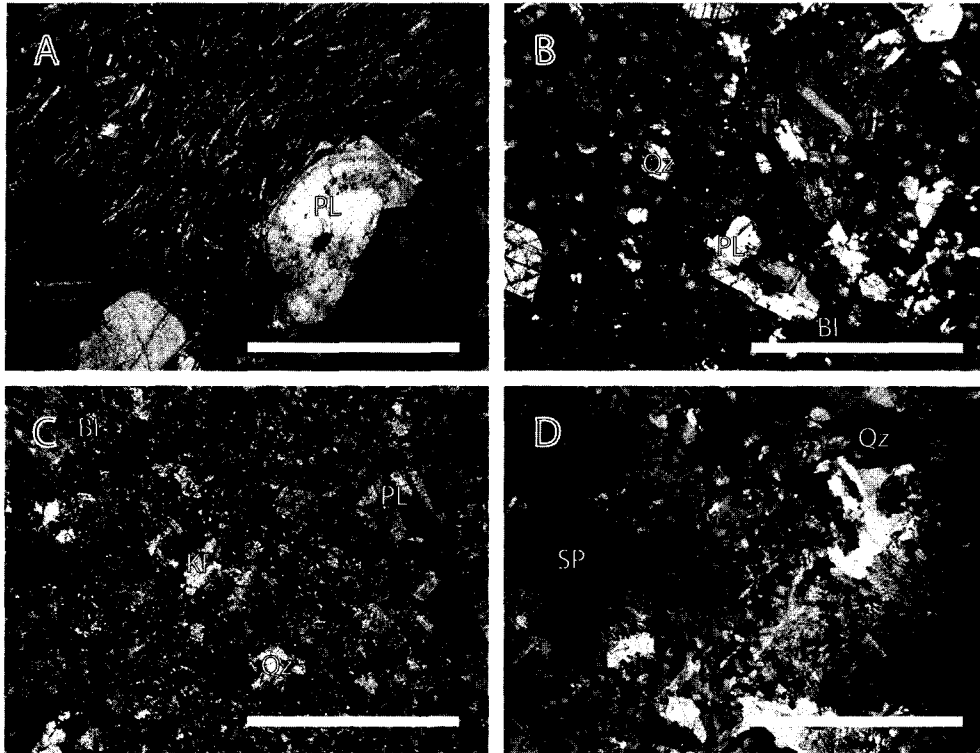


Fig. 4. A) Photomicrograph of intermediate dyke with phenocrysts of plagioclase (PL) and trachytic texture (under crossed polars, X40, white bar in plates=1 mm in length). B) Photomicrograph of intermediate dyke with phenocrysts of plagioclase (PL), biotite (BI), and quartz (Qz) (X40). C) Photomicrograph of felsic dyke with phenocrysts of plagioclase, K-feldspar (KF), biotite, and quartz (X40). D) Photomicrograph of felsic dyke with phenocrysts of quartz and spherulitic texture (SP) (X40).

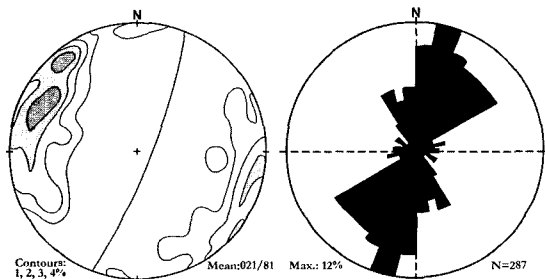


Fig. 5. Contoured  $\pi$ - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the attitudes of intrusions of all dikes in the study area. A great circle indicates the mean attitude. Mean: Strike/dip is measured according to the right-hand rule.

있으며 기질부가 특히 풍화를 많이 받은 양상이다(Fig. 4C). 한편, 일부 암맥의 경우에는 유동 구조가 잘 발달하는데 석영과 장석의 구과조직이 관찰되며 직경 1

mm 내외의 구과가 전체 면적의 70% 이상을 차지하고 있다(Fig. 4D).

### 관입면의 방향성

염기성, 중성 그리고 산성 암맥을 포함한 모든 암맥들의 관입면 자세를 등면적투영망과 장미도표에 표시하면(Fig. 5), 평균 N21°E의 주향에 81°SE의 경사를 보여준다. 이들을 다시 야외에서 구분된 암상별로 분류해 보면(Fig. 6), 먼저 이번 연구에서 관찰된 암맥 중 대다수를 차지하는 염기성 암맥은 관입면의 평균 주향과 경사가 N20°E와 81°SE이며 N20°W~N60°E 범위 내에서 주향 방향이 비교적 고루 분포함이 특징이다(Fig. 6a). 중성 암맥의 경우에는 평균 관입면의 자세가 N47°E와 81°SE로써 북동방향의 것이 우세한 양상이다(Fig. 6b). 마지막으로 산성 암맥은 북북동과 서북서방향의 것들로 양분된 특징을 보인다(Fig. 6c).

염기성 암맥의 방향성을 모암별로 살펴보면 다음과

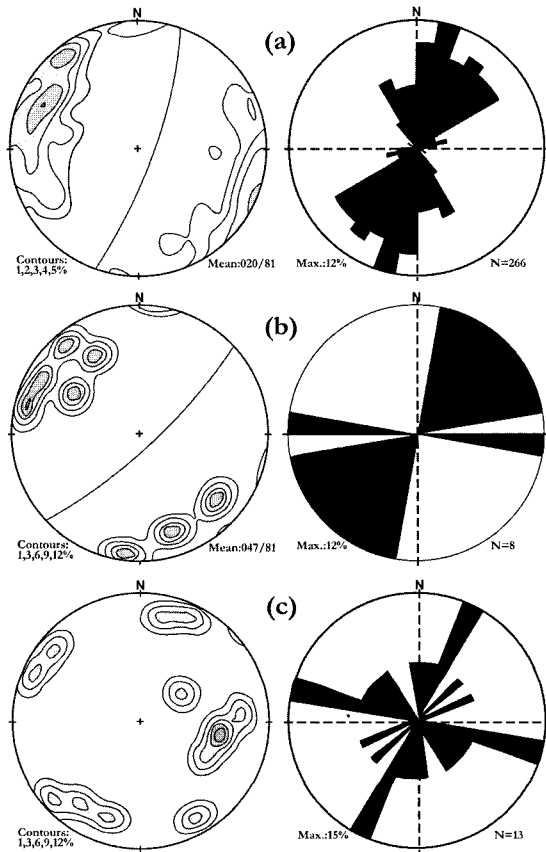


Fig. 6. Contoured  $\pi$ - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the attitudes of intrusions of (a) basic dikes, (b) intermediate dikes, and (c) felsic dikes. Great circles in (a) and (b) indicate the mean attitudes. Mean: Strike/dip are measured according to the right-hand rule.

같다(Fig. 7). 먼저 하양층군을 관입한 암맥의 경우에는 그 관입면이 평균 N45°E, 81°NW의 자세를 보여주는데 북동방향의 것이 탁월하며, 일부는 북서방향의 것도 관찰된다(Fig. 7a). 유천층군에서는 특이하게 관입면의 평균 자세가 N37°W, 83°SW인데 분포도 역시 북서방향의 것이 절대적으로 우세한 양상이다(Fig. 7b). 총 233개로 이번 연구에서 관찰된 염기성 암맥의 대부분을 차지하고 있는 화강암류에서 관찰된 것들은 그 평균 자세는 전체 염기성 암맥의 경우(Fig. 6a)에서와 유사한 N19°E, 80°SE이며, N20°W~N60°E 범위 내에서 주향 방향이 고루 분포하고 있다(Fig. 7c). 마지막으로 전기 마이오세 분지 충전물 내에서 관찰된 염기성 암맥들은 평균 N46°E, 75°SE의 자세를 가지며, 북동방향

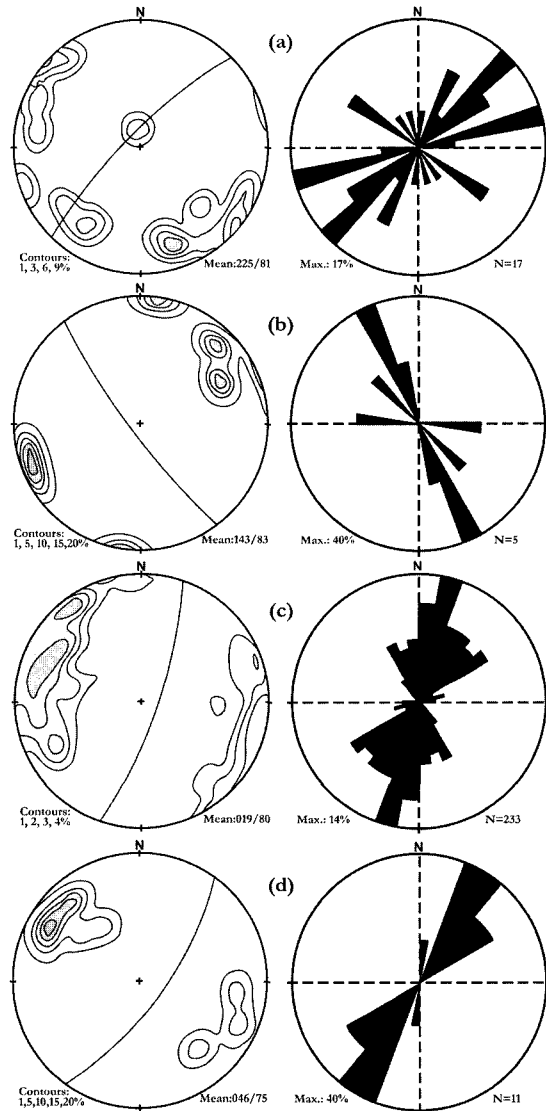
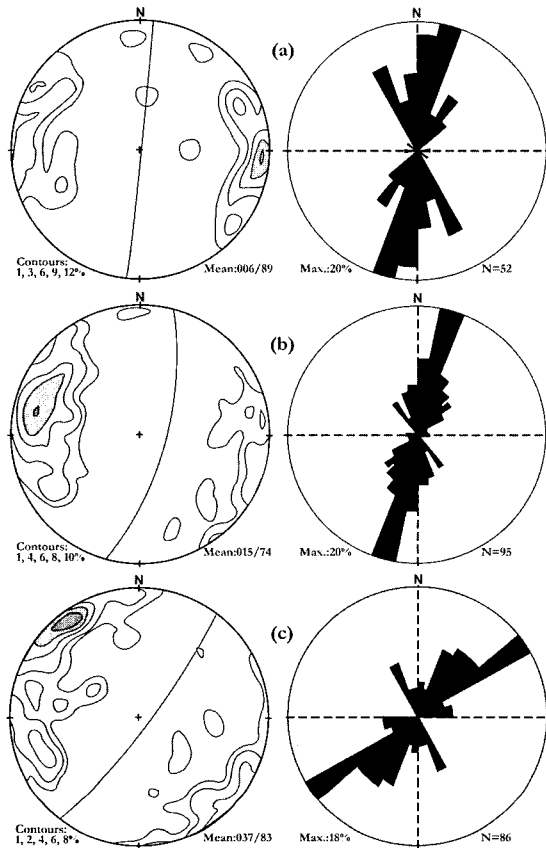


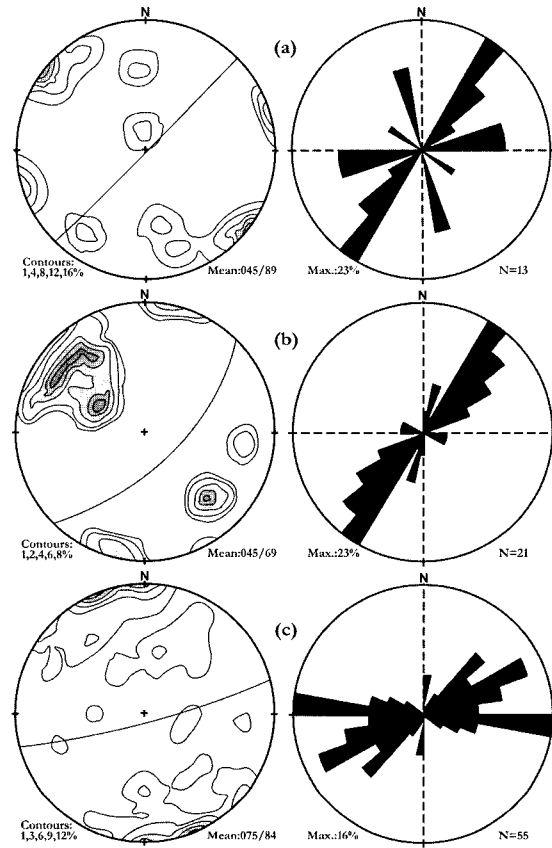
Fig. 7. Contoured  $\pi$ - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the attitudes of intrusions of basic dikes (a) in the Hayang Group, (b) in the Yucheon Group, (c) in the Bulguksa Granites, (d) in the Early Miocene volcanics. Great circles indicate the mean attitudes. Mean: Strike/dip are measured according to the right-hand rule.

의 것들이 절대적으로 우세하다(Fig. 7d).

불국사화강암류에서 관찰된 염기성 암맥을 연일구조선을 중심으로 서편과 인접부(단층 파쇄대 주변) 그리고 동편으로 나누어 그 방향성을 살펴보면 흥미로운 사실을 발견할 수 있다(Fig. 8). 먼저, 연일구조선 서편



**Fig. 8.** Contoured  $\pi$ - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the attitudes of intrusions of basic dikes within the Bulguksa Granites (a) in the west of YTL, (b) adjacent to it, and (c) in the east of it. Great circles indicate the mean attitudes. Mean: Strike/dip are measured according to the right-hand rule.



**Fig. 9.** Contoured  $\pi$ - (lower hemisphere, equal-area projection) and rose diagrams of the attitudes of intrusions of basic dikes (a) in the vicinity of the Ulsan-Jeongja-Haseo Basins, (b) in the Eoil-Waeup Basins, (c) in the Guryongpo Peninsula. Great circles indicate the mean attitudes. Mean: Strike/dip are measured according to the right-hand rule.

의 염기성 암맥의 경우(Fig. 8a)에는 관입면이 평균 N06°E의 주향과 89°SE의 경사를 보여주며 북북서~북북동방향에 밀집되어 산출된다. 연일구조선 단층 파쇄대 내 혹은 인접부에서 관찰된 암맥의 경우(Fig. 8b)에 관입면의 자세는 평균 주향이 N15°E, 경사가 74°SE로서 서편의 것들에 비해 약 10° 시계방향으로 수평 회전되어 있으며 약 15° 북서로 경동된 양상이다. 한편, 연일구조선보다 동편의 암맥의 경우(Fig. 8c)에는 보다 시계방향으로 회전되어 평균 N37°E의 주향을 가리키고 있으며 83°SE로 경사져 있다. 이곳에는 북동방향의 것들이 절대적으로 우세하며, 일부 북북서방향의 것들이 균집을 이루고 있음이 흥미롭다.

화강암의 주 분포지인 연일구조선 인접부보다 동쪽의 제3기 마이오세 분지들 내 그리고 분지 인근의 기

반암에서 관찰된 염기성 암맥들의 관입면의 방향성을 살펴보면(Fig. 9), 남쪽의 울산-정자-하서분지 일원의 것들(Fig. 9a)은 평균 N45°E, 89°SE의 자세를 보이고, 그 북쪽의 어일-와읍분지 일원의 것들(Fig. 9b)은 평균 N45°E, 69°SE의 자세를 보여준다. 이는 연일구조선 동편의 화강암 내에서 관찰된 염기성 암맥들의 평균 관입면(Fig. 8c)에 비해 약 10° 가량 시계방향으로 더 회전된 양상이다. 한편, 김중열 외(1991)에 의해 구룡포반도에서 수집된 염기성 암맥들의 관입면 방향을 살펴보면 평균 N75°E, 84°SE의 자세를 보이는데(Fig. 9c), 이는 연일구조선 동편 화강암 내의 것들에 비해 약 40° 시계방향으로 더 회전된 양상이다. 구룡포반도는 어일-와읍분지의 북쪽에 위치하고 있으며 한반도 남동부에



**Table 1. K/Ar whole-rock age of the basic dikes in the study area.**

| Locality (Basin)    | Lithology              | Age (Ma)   | Reference                 |
|---------------------|------------------------|------------|---------------------------|
| Guryongpo Peninsula | Hornblende<br>Andesite | 18.1 ± 0.6 | Kim <i>et al.</i> (1991)  |
|                     |                        | 18.2 ± 0.6 |                           |
|                     |                        | 18.8 ± 0.5 |                           |
|                     |                        | 17.9 ± 0.6 |                           |
| Pohang Basin        | Basalt                 | 15.2 ± 0.4 | Lee <i>et al.</i> (1992)  |
|                     |                        | 14.8 ± 0.4 |                           |
| Waeup Basin         | Basalt                 | 18.4 ± 0.6 | Lee <i>et al.</i> (1992)  |
| Haseo Basin         | Andesite               | 20.9 ± 0.5 |                           |
| Jeongja Basin       | Basalt                 | 14.6 ± 0.7 |                           |
| Gyryongpo Peninsula | Basic rocks            | 13.4       | Choi <i>et al.</i> (2001) |
|                     |                        | 24.4       |                           |
|                     |                        | 54.2       |                           |
| Janggi Basin        | Basic rocks            | 13.6       | Choi <i>et al.</i> (2001) |
|                     |                        | 12.1       |                           |

서 가장 동쪽에 위치해 동해와 가장 인접한 육지에 해당한다.

**절대연령**

연구지역에서 암맥들을 암석학적으로 분류하고 이에 따라 체계적으로 관입 연령을 측정한 연구가 현재까지 수행된 적은 없으나 몇몇 기존 연구들에서 현무암-안산암질 암맥을 대상으로 총 14곳의 K/Ar 전암 연령이 보고된 바 있다. 이들 결과를 종합하여 살펴보면, Choi *et al.*(2001)에 의해 얻어진 연령들의 일부가 12-13 Ma 전후의 다소 젊은 연령을 지시하기는 하나 관입 연대가 대체로 18-20 Ma에 집중된다(Table 1: 김종렬 외, 1991; 이현구 외, 1992). 연구지역 염기성 암맥의 경우 대부분 심하게 풍화를 받아 있으며 야외에서 신선한 것으로 판단되었던 암석들도 현미경 관찰에서 유색광물의 많은 부분이 변질되어 나타남을 감안한다면 이들 연령은 암맥의 실제 관입 연령에 비해 다소 젊을 가능성이 크다. 한편, 현재까지 전기 마이오세 화산암을 대상으로 수행된 절대연령 결과들을 종합하면 Table 2와 같다. 이들 중 퇴적분지 내 현무암 및 현무암질 안산암의 용암류에서 얻어진 절대 연령들도 대부분 18-23 Ma에 집중되고 있어(Kim *et al.*, 1986; 진명식 외, 1988, 1989; 이현구 외, 1992) 이 연령은 앞선 현무암-안산암질 관입암의 연령과 대체로 일치하는 경향이다.

**토 의**

연구지역 염기성-중성 암맥들의 관입은 동해의 확장에 기인하여 한반도 남동부에서 진행되었던 신생대 마이오세 지각변형과 밀접한 관련성이 있는 것으로 판단된다. 이는 암맥에서 얻어진 K/Ar 전암 연령이 대부분 전기 마이오세를 지시하고 있고(Table 1), 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 일치하기 때문이다(Table 2). 또한, 관입면의 평균 주향은 당시에 지각 변형이 활발하였던 연일구조선 동편에서 북동-동북동방향으로써(Fig. 8, 9) 마이오세 퇴적분지들의 확장을 주도한 분지 경계단층인 북동-동북동방향 정단층의 것과 일치한다(Fig. 2). 따라서, 이들 암맥들은 마이오세 동안 이들 정단층(손문과 김인수, 1994; 손문 외, 2000, 2002; Son *et al.*, 2000) 과 함께 한반도 남동부에 집중적으로 만들어진 인장 균열을 통로로 하여 관입하였던 것으로 판단된다.

연일구조선을 경계로 서부지역과 인근지역 그리고 동부지역의 화강암체에서 관찰된 염기성 암맥은 암석 기재학적 측면에서 대부분 동일한 기원의 마그마에서 유래된 것으로 밝혀졌으나(Fig. 3) 관입면의 주향 방향은 동쪽으로 갈수록 시계방향으로 회전된다(Fig. 8: N06°E→N37°E). 이러한 사실은 최근 고자기학과 구조지질학 연구들(Son *et al.*, 1997; 김인수 외, 1998; 손문 외, 2000, 2002)에서 신생대 마이오세 지각변형의 서쪽 한계선으로 그 중요성이 밝혀지고 있는 연일구조선의 존재를 입증하는 것이며, 또한 연일구조선이 그 동쪽 분지 지역에서 흔히 관찰되는 지괴의 시계방향 수평 회전운동을 규제한 주요 지구조선임을 강력히 지시하고 있다. 연일구조선의 형성과 지괴회전 운동의 종결 시기는 고자기학 및 구조지질학 연구를 통해 각각 17 Ma와 16 Ma 전후임이 밝혀져 있다(김인수와 강희철, 1989; 손문, 1998; Lee *et al.*, 1999; 손문 외, 2002). 따라서 연구지역 염기성 암맥의 관입 시기는 대부분 17 Ma 이전일 것이다.

암맥의 평균 주향은 동쪽 해안으로 갈수록 시계방향으로 보다 많이 회전되어 가장 동쪽의 구룡포 반도의 것들은 평균 약 N75°E이다. 이는 동해가 확장되는 동안 육지와 동해의 울릉해분을 가르는 동한단층(김인수, 1992)을 따라 발생한 우수향 전단력이 해안선과 인접한 지괴를 먼저 회전시켰으며 시간이 지남에 따라 지괴 회전이 서쪽의 내륙으로 점진적으로 전파되었기 때

Table 2. Previous age data of the Tertiary volcanic rocks in SE Korea.

| Locality (Basin) | Stratigraphic Unit    | Lithology             | Dating Method                 | Age (Ma)                 | Reference                |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Janggi Basin     | Perlitic Dacite       | Two pyroxene andesite | *K/Ar                         | 22.5 ± 0.8               | Kim <i>et al.</i> (1986) |
|                  |                       | Trachyte (Dacite)     |                               | 22.7 ± 1.3               |                          |
|                  | Andesite              | Andesite              |                               | 22.7 ± 0.8               |                          |
|                  | Yeonil Basalt         | Basalt                |                               | 20.5 ± 0.8               |                          |
|                  | Perlite               | Perlite               |                               | 20.7 ± 1.2               |                          |
| Pohang Basin     | Daljeon Basalt        | Basalt                | *K/Ar                         | 21.8 ± 2.8               |                          |
| Waeup Basin      | Waeupri Tuff (?)      | Trachytic tuff        | **Ft. zircon                  | 15.9 ± 1.9               | Jin <i>et al.</i> (1988) |
|                  |                       |                       |                               | 15.2 ± 3.6               |                          |
|                  | ?                     | Basalt                |                               | K/Ar                     |                          |
| Eoil Basin       | Eoil Basalt           | Basalt                | K/Ar                          | 17.2 ± 6.0               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 19.6 ± 0.3               |                          |
| Janggi Basin     | ?                     | Trachytic tuff        | **Ft. zircon                  | 15.8 ± 4.1               |                          |
| Waeup Basin      | Hb-Qz-Fd Feldsophyre  | Trachytic tuff        | **Ft. zircon<br>**Ft. apatite | 20.6 ± 1.9               | Jin <i>et al.</i> (1989) |
|                  |                       |                       |                               | 19.1 ± 5.4               |                          |
|                  | Waeupri Tuff          | Trachytic Tuff        |                               | 18.5 ± 1.2<br>22.1 ± 4.1 |                          |
| Eoil Basin       | Hyodongri Volcanics   | Andesitic Tuff        | **Ft. zircon<br>**Ft. apatite | 21.0 ± 1.3               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 24.4 ± 5.7               |                          |
| Janggi Basin     | Upper Coal-bearing F. | Trachytic Tuff        | **Ft. zircon<br>**Ft. apatite | 18.9 ± 1.5<br>22.1 ± 5.0 |                          |
| Eoil Basin       | Eoil Basalt           | Basalt                | *K/Ar                         | 18.0 ± 1.1               | Lee <i>et al.</i> (1992) |
|                  |                       |                       |                               | 18.4 ± 0.6               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 18.7 ± 0.6               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 19.2 ± 0.6               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 19.3 ± 0.5               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 20.4 ± 0.5               |                          |
| Janggi Basin     | Yeonil Basalt         | Basalt                | *K/Ar                         | 19.9 ± 0.5               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 22.1 ± 0.7               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 20.6 ± 0.5               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 20.4 ± 1.7               |                          |
| Jeongja Basin    | Dangsari Andesites    | Basalt<br>Andesite    |                               | 16.2 ± 0.8               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 20.8 ± 0.5               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 21.1 ± 0.5               |                          |
|                  |                       |                       |                               | 20.9 ± 0.5               |                          |

\*K/Ar: K/Ar whole-rock age, \*\*Ft.: Fission-track age.

문인 것으로 해석된다. 즉, 보다 동쪽에 위치한 지괴일 수록 시계방향의 수평 회전운동을 보다 오랜 시간 동안 겪어 결과적으로 보다 많은 양의 회전량을 보이는 것이다. 한반도 남동부의 마이오세 퇴적분지들은 공통적으로 북북서방향의 우수향 주향이동단층들과 이들의 운동에 의해 만들어진 북북동~동북동방향의 정단층들 즉, 주향이동단층들 사이에 형성된 인장 균열에 의해 확장된 당겨열림형(pull-apart) 분지들이 밝혀져 있다

(손문과 김인수, 1994; Son *et al.*, 2000; 손문 외, 2000, 2002). 세계적으로 우수향 주향이동단층 지역에서 지괴가 시계방향으로 회전됨은 잘 알려진 사실이다 (Beck, 1980; Kissel and Laj, 1989). 한편, 한반도 남동부의 제3기 분지들은 북동에서 남서쪽으로 갈수록 젊은 지층들로 충전되고 있어 분지가 일시에 확장된 것이 아니라 열개(rift) 축이 시간이 지남에 따라 북동에서 남서로 전파되는 일종의 전파 열개 과정을 겪은

것으로 밝혀져 있다(손문 외, 2000, 2002). 이번 연구 결과는 이러한 기존 연구 결과들과 잘 부합된다.

취성변형요소들의 운동 자료를 이용하여 한반도 남동부에서 최근 실시된 신생대 고응력장 복원 연구 결과들(문태현 외, 2000; 손문 외, 2000; Son *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2001)은 분지가 확장되던 마이오세 동안 공통적으로 북서-남동방향의 최소 수평응력( $\sigma_{Hmin}$ )이 작동되었음을 보고하고 있다. 그러나 이번 연구에서 지괴의 수평 회전운동이 거의 미미하였던 것으로 판단되는 연일구조선보다 서편 암맥의 평균 자세(Fig. 8a)를 근거하면 당시의 최소 수평응력 축은 거의 동서방향에 가까웠음을 의미한다. 즉, 암맥을 비롯한 연일구조선 동편의 취성변형 산물들은 지괴회전운동과 함께 대부분 시계방향으로 회전되었으며 이 때문에 실제로는 동서방향인 최소 수평응력 축이 북서-남동방향으로 편향되었을 가능성이 있다.

한반도 동남부는 마이오세의 분지 확장과 함께 지괴들이 북서방향 경동운동을 겪었음을 앞서 지적한 바 있다. 염기성 암맥 관입면의 경사각은 연일구조선을 경계로 서부 지역에서는 수직(89°)한 반면, 연일구조선의 경계 지역과 동편 지역은 대부분 남동쪽으로 약 80°~70° 경사진 양상이다(Fig. 8, 9). 이는 암맥들이 처음에는 대부분 수직한 자세로 관입하였으나 이들 중 연일구조선의 경계 지역과 동편 지역 대부분의 암맥들은 이후 지각변형 동안 북서방향으로 경동되었음을 지시한다. 이러한 북서향 지괴 경동운동은 마이오세 동안 만들어진 주요 북동-동북동방향의 정단층들이 남동방향으로 경사진 서가(domino) 혹은 점완(listric) 단층인 것(손문과 김인수, 1994; Son *et al.*, 2000; 손문 외, 2000)에 원인이 있는 것으로 판단된다.

한편, 제3기 분지 기반암인 하양층군과 유천층군 그리고 불국사화강암류 내에서 관찰되는 염기성 암맥들 중에서 일부는 주향이 서북서-북서방향으로 밀집되어 나타남이 흥미롭다(Fig. 7a, b, c). 그러나 전기 마이오세 지층 내에는 오로지 북동방향의 것들만 관찰된다. 따라서 이들 서북서~북서방향의 것들은 연구 지역에서 우세하게 나타나는 남북~북동방향의 염기성 암맥들과는 관입 시기가 달랐을 가능성이 크다. 더불어 분지 기반암 내에서만 관찰되는 산성 암맥들도 주향 방향이 서북서방향인 것들이 관찰된다(Fig. 6c). 이러한 점들은 전기 마이오세 이전에는 한반도 남동부가 마이오세의 것과는 다른 응력장하에 있었음을 암시하는데, 연일구조선 동편 지괴들이 마이오세 동안 평균 약 30° 시계방향으로 회전되었음을 감안한다면 이 응력장은

남북 내지는 북북동 방향의 최소 수평응력 축을 가졌을 것으로 추론할 수 있다. 그러나 이러한 추론은 현재로서는 확정적이지 않으며 차후 관입암에 관한 보다 면밀한 암석기재와 암석화학적 연구가 요구될 뿐만 아니라, 이를 통해 구분된 암상과 관입면의 방향성에 따라 결정된 각 암맥군의 정치 연령에 관한 체계적인 연구가 수행됨으로써 더욱 명확해질 것으로 기대된다.

## 결 론

한반도 남동부에서 얻어진 총 287개 암맥의 암석기재학적 특징과 방향성 자료를 수집하여 기존 연구들에서 밝혀진 제3기 마이오세의 지각변형 특징들과 종합적으로 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 암맥과 마이오세 화산암류에 대한 연령 그리고 암맥의 방향성을 근거로 하면, 연구지역 염기성과 중성 암맥의 관입은 대부분 동해가 활발히 확장되던 시기인 전기 마이오세(약 17 Ma 이전)의 지각 변형기 동안 만들어진 인장 균열들을 따라 일어났다.

2) 연일구조선을 경계로 서부지역과 경계지역 그리고 동부지역의 화강암체에서 관찰된 염기성 암맥의 평균 관입면 주향 방향은 동쪽으로 갈수록 시계방향으로 회전된다(N06°E→N37°E). 이는 연일구조선이 마이오세 지각변형기 동안 지괴의 시계방향 수평 회전운동을 규제한 주요 지구조선임을 의미한다.

3) 연일구조선 동편 염기성 암맥의 주향 방향은 동쪽 해안에 가까워질수록 시계방향으로 보다 많이 회전된 특징을 보여주었다. 이는 동해의 확장으로 인하여 한반도 동남부에 가해진 우수향 전단력이 시간이 경과함에 따라 내륙쪽으로 전파되는 과정을 겪은 결과로 해석된다.

4) 지괴 수평 회전운동을 겪지 않은 연일구조선 서편의 화강암체에서 관찰된 암맥들은 관입면의 평균 자세가 N06°E/89°SE이다. 따라서 암맥이 관입될 당시의 최소 수평응력축은 동서방향에 가까웠다.

## 감사의 글

이번 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R02-2001-00254)의 지원비에 의해 수행되었다. 이 논문의 심사과정에서 유익한 조언과 지적을 해주신 안동대학교 강지훈 교수와 서울대학교 김영석 박사에게 감사드린다.

## 참고문헌

- 김광호, 도성재, 1994, 양남분지에 분포하는 제3기 지층의 고지자기 연구. 지구과학회지, 15, 36-45.
- 김인수, 1992, 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28, 84-109.
- 김인수, 강희철, 1989, 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고지자기학적 연구. 지질학회지, 25, 273-293.
- 김인수, 손문, 정현정, 이준동, 김경진, 백인성, 1998, 경주-울산일원에 대한 지역지질 특성 연구: 울산단층주변 화강암류의 잔류자기와 대자율. 자원환경지질, 31, 31-43.
- 김종열, 정차연, 윤선, 1991, 장기반도의 마이오세 전기-중기의 암맥군과 광역지구구조응력장(I). 지질학회지, 27, 330-337.
- 문태현, 손문, 장태우, 김인수, 2000, 한반도 동남부 제3기 분지 지역에서의 신생대 고응력장 복원. 지구과학회지, 21, 230-249.
- 박양대, 윤형대, 1968, 한국지질도(1:50,000), 울산도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 20p.
- 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고지자기학 고찰. 이학박사 학위논문, 부산대학교, 233p.
- 손문, 김인수, 1994, 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질 구조와 분지발달. 자원환경지질, 27, 65-80.
- 손문, 김인수, 이동호, 이준동, 김진섭, 백인성, 2000, 울산 단층일원에 대한 지역지질 특성연구: 제3기 마이오세 와 읍분지의 지질구조와 대자율비등방성(AMS). 지질학회지, 36, 195-216.
- 손문, 정혜윤, 김승현, 김인수, 문태현, 장태우, 1999, 한반도 동남부 신생대 지각변형과 연일구조선. 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 대한지질학회, 50.
- 손문, 정혜윤, 김인수, 2002, 한반도 동남부 연일구조선(단층) 남부 일원의 지질과 지질구조. 지질학회지, 38, 175-197.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25p.
- 이미정, 이종익, 이민성, 1995, 경주지역의 A-형 알카리장석 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31, 583-607.
- 이준동, 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 지구과학회지, 20, 80-95.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷撤丸, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구; 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1988, K-Ar 및 쥘선트랙법에 의한 포항-감포 일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 연구보고서 KR-87-27 동위원소 지질연구, 한국동력자원연구소, 51-88.
- 진명식, 김성재, 신성천, 이주연, 1989, K/Ar 및 쥘선트랙법에 의한 한국동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정연구. 연구보고서 KR-88-6D, 한국동력자원연구소, 53-84.
- 최현일, 오재호, 신성천, 양문렬, 1980, 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적 연구. 연구보고서 KIGAM B-20, 자원개발연구소, 5-33.
- 한중환, 박영훈, 손진담, 손병국, 1987, 한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체구조발달 및 퇴적환경 연구 (II). 연구보고서 KR-86-2-(B)-4, 한국동력자원연구소, 109p.
- Beck, M. E., Jr., 1980, Paleomagnetic record of platemargin tectonic process along the western edge of North America. Journal of Geophysical Research, 85, 7115-7131.
- 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.
- Choi, P. Y., Kwon, S., Hwang, J., Lee, S. R. and An, G., 2001, Paleostress analysis of the Pohang-Ulsan area, Southeast Korea: Tectonic sequence and timing of block rotation. Geosciences Journal, 5, 1-18.
- 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.
- 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.
- 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  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  ages and Sr isotopic ratios for volcanic rocks of the Yamato Seamount Chain in the Japan Sea. Earth and Planetary Science Letters, 97, 195-204.
- Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W., 1986, Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks from Guryongpo area, Korea. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 19, 231-237.
- Kissel, C., and Laj, C. (Eds.), 1989, Paleomagnetic rotations and continental deformation. Kluwer, 516p.
- 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.
- Nicholson, R. and Pollard, D. D., 1985, Dilation and linkage of echelon cracks. Journal of Structural Geology, 7, 583-590.
- Price, N. J. and Cosgrove, J. W., 1990, Analysis of Geological Structures. Cambridge Univ. Press, 502p.
- Son, M. and Kim, I. S., 2001, Geological structures and evolution of the Miocene basins, southeastern Korea. In : Koh and Choi, eds., Tectonic Evolution of East Asia, The Third Joint Meeting of Japanese and Korean Structure

- and Tectonic Research Groups, 17-21.
- Son, M., Seo, H.-J., Jung, H.-J. and Kim, I.-S., 1997, Extension direction and tectonic boundaries of the Miocene basins, Southeast Korea. *Tectonic Evolution of Eastern Asian Continent: Short papers for the international symposium on the occasion of the 50th Anniversary of the Geological Society of Korea*, 104-109.
- Son, M., Seo, H.-J. and Kim, I.-S., 2000, *Geological Structures and Evolution of the Miocene Eoil Basin, Southeastern Korea*. *Geosciences Journal*, 4, 73-88.
- 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. *J. Geol. Soc. London*, 136, 3-11.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50,000 Geological Atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. *Geol. Surv. Chosen* (in Japanese).
- Yoon, S. H. and Chough, S. K., 1995, *Regional strike slip in the eastern continental margin of Korea and its tectonic implications for the evolution of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)*. *Geological Society of America Bulletin*, 107, 83-97.
- 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 7월 26일 접수, 2002년 9월 28일 채택)