

한반도 남동부 제3기 암맥군과 화산암류의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대

김종선¹ · 손문^{1,*} · 김진섭¹ · 김정민²

¹부산대학교 지질환경과학전공, ²한국기초과학지원연구원 동위원소 분석팀

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages of the Tertiary Dike Swarm and Volcanic Rocks, SE Korea

Jong-Sun Kim¹, Moon Son^{1,*}, Jin-Seop Kim¹ and Jeongmin Kim²

¹Department of Geology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²Isotope Research Team, Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

요약: 신생대 제3기 동안 지각변형과 화산활동이 활발하였던 한반도 남동부에 분포하는 제3기 암맥군과 화산암류를 대상으로 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 실시하였다. 선행연구에서 연일구조선을 중심으로 동서 양편의 염기성 암맥들이 각각 남북방향과 북동방향의 서로 다른 방향의 평균 관입면을 가지나, 동일한 마그마에서 기원된 것들을 밝혀 연일구조선이 제3기 마이오세 지각변형을 규제한 주요 지구구조선을 보고하였다. 이번 연구에서 연일구조선 동서 양편 염기성 암맥군의 관입연령이 각각 47.3 ± 0.8 Ma와 48.0 ± 1.3 Ma로써 매우 유사함이 밝혀졌다. 이 결과는 연일구조선이 제3기 지각변형 동안 지괴의 시계방향 수평회전운동을 규제한 주요 지구구조선을 확인시켜 주는 것이다. 또한 염기성 암맥들이 암맥군으로 빈번하게 산출되는 것은 약 48 Ma경에 한반도 남동부가 동서방향의 인장 응력장하에 놓여 있었음을 지시한다. 이 시기는 인도와 유라시아 대륙의 충돌시기와 태평양판의 운동방향이 북북서에서 서북서방향으로 변화된 시기에 해당된다. 출현 빈도가 낮은 중성암맥과 산성암맥에서는 각각 55.9 ± 1.5 Ma와 53.0 ± 1.0 Ma의 연령을 구했다. 화산암류에 대한 연대측정 결과, 효동리화산암류 내 안산암질 용암과 용동리용회암류 내 데사이트질 용암은 각각 24.0 ± 0.5 Ma와 21.6 ± 0.4 Ma의 연령을, 추령각력암을 관입 및 피복하고 있는 데사이트질 암석에서는 각각 21.8 ± 0.1 Ma와 22.0 ± 0.5 Ma의 연령을 얻었다. 이들 연령 자료는 전기 마이오세 동안 현무암질 화산활동에 비해 안산암-데사이트질 화산활동이 먼저 발생하였다는 최근의 야외조사 결과와 부합된다.

주요어: 한반도 남동부, 암맥군, 연일구조선, 화산암류, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정

Abstract: We determined $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Tertiary dike swarms and volcanic rocks distributed in the SE Korea where the most prevalent crustal-deformation and volcanism occurred during the period. In previous study, it was disclosed that the mafic dike swarms on both sides (east and west) of the Yeonil Tectonic Line (YTL) were originated from a same magma although they are consistently aligned with different intrusion directions of NS and NE, respectively. Ages of the mafic dike swarms of this study are 47.3 ± 0.8 Ma and 48.0 ± 1.3 Ma, respectively and confirm such conclusion. These facts clarify that the YTL acted as a westernmost limit of the crustal deformation, especially clockwise crust-rotation, during the Miocene. Frequent occurrence of basic dikes indicate strongly that the southeastern part of the Korean Peninsula was under E-W extensional stress field at about 48 Ma, intimately related to the India-Asia collision and subsequent sudden change of the Pacific Plate motion. The ages of the uncommonly appearing intermediate and felsic dikes were determined as 55.9 ± 1.5 Ma and 53.0 ± 1.0 Ma, respectively. Ages of the andesitic lava of the Hyodongri Volcanics, the dacitic lava of the Yongdongri Tuff, and dacitic rocks intruding and covering the Churyeong Breccia were determined as 24.0 ± 0.5 Ma, 21.6 ± 0.4 Ma, 21.8 ± 0.1 Ma, and 22.0 ± 0.5 Ma, respectively. The ages from the volcanics agrees well with the stratigraphy established by the latest field survey, which confirms that the andesitic-dacitic volcanism was followed by the basaltic volcanism during the Early Miocene.

Key words: SE Korea, dike swarm, YTL, volcanic rocks, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages

*Corresponding author: moonson@pusan.ac.kr, Tel: 82-51-510-2248

서 론

경상분지 동부에는 특징적인 방향성을 갖는 수조의 단층선(모량, 양산, 동래, 울산단층 등)이 발달하는데 이들 단층의 운동사를 근거로 동해의 성인을 비롯한 신생대의 지각변형사에 관한 논의가 활발히 진행되고 있다(한중환 외, 1987; Yoon, 1991; 김인수, 1992; 손문, 1998). 제3기 동안의 지각변형 과정에서 한반도 남동부에는 화산활동(Yoon, 1991, 1997; 손문, 1998)이 빈번하게 발생하였으며 지각균열을 따라 일정한 방향성을 가지는 암맥군(dike swarm)들이 생성되었다. 암맥의 정착기구(emplacment mechanism)는 일반적으로 신장성 단열을 따라 마그마가 유입되는 수동형 관입(passive injection)과 마그마 압력에 의한 수압 단열작용(hydraulic fracturing)의 결과인 강제 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 신장(lateral extension)과 함께 일정한 방향성을 가진 암맥군을 형성시키는 것이 특징이다. 따라서 수동 관입의 결과인 암맥군의 우세 방향과 공간적 분포 특징은 광역 혹은 지역적인 지각 변형사와 고응력장을 해석하는 하나의 수단으로써 유용하게 사용되고 있다(Speight and Mitchel, 1979; Bussell, 1989; Glazner *et al.*, 1999; Borradaile, 2001).

이번 연구에 앞서 한반도 남동부 암맥군에 대한 선행 연구들(김진섭 외, 2002a, b)에서 얻어진 결론들을 정리하면 다음과 같다. 1) 연구지역의 암맥들은 염기성, 중성, 산성 암맥으로 분류되며, 다시 총 7가지 그룹으로 세분된다. 이중 염기성 암맥의 그룹(I)에 해당하는 암맥군들이 매우 흔히 산출된다. 2) 연일구조선을 경계로 서편과 동편지역의 화강암체 내에서 관찰되는 염기성 암맥군들은 암석기계적 양상, 특징적인 원소들의 함량과 구조조. 판별도에서 지판의 침강 섭입과 관련된 동일한 모마그마에서 파생된 암맥군들이나, 평균 관입면 주향 방향은 서편지역에 비해 동편지역에서 시계방향으로 회전된 양상이다($N06^{\circ}E \rightarrow N37^{\circ}E$). 이는 연일구조선이 마이오세 지각변형기 동안 지괴의 시계방향 수평 회전운동을 규제한 주요 지구조선임을 의미한다. 3) 연일구조선 동편 염기성 암맥의 주향방향은 동쪽해안에 가까워질수록 시계방향으로 보다 많이 회전된 특징을 보여주는데, 이는 동해의 확장으로 인하여 한반도 동남부에 가해진 우수향 전단력이 시간이 경과함에 따라 내륙쪽으로 전파되는 과정을 겪은 결과

로 해석된다. 4) 지괴 수평회전의 효과가 배제된 연일 구조선 서편 화강암체 내 염기성 암맥들의 관입면 평균 자세는 $N06^{\circ}E/89^{\circ}SE$ 인 것으로 보아 암맥이 관입될 당시의 한반도 남동부의 최소 주응력축은 동서방향에 가까웠다.

한편, 선행 연구에서 얻어진 결론들을 재검증하고 얻어진 동서방향의 최소 주응력의 시기를 결정하기 위해서는 암맥군들의 정확한 관입연대에 관한 체계적인 연구의 수행이 요구되었다. 또한 암맥군과 제3기 분지내에 분포하는 화산암류와의 상관성을 검토하고 현재까지 계속적인 논란이 되고 있는 제3기 층서의 확립을 위해서 열쇠층으로 판단되는 효동리화산암류, 용동리 응회암류, 추령각력암을 피복 및 관입한 데사이트에 관한 연대측정 자료가 요구되었다. 이번 연구에서는 이들 암맥군과 화산암류에 대한 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 연대측정을 실시하여 그 결과의 지구조학적 그리고 층서학적 의미에 관하여 논의하도록 하겠다.

지질학적 배경

연구지역의 지질은 하위로부터 백악기 경상누층군의 하양층군과 유천층군, 백악기~조세3기 불국사화강암류와 왕산석영안산암질화산암류, 전기 마이오세의 범곡리와 장기층군, 그리고 중기 마이오세초의 연일층군으로 구성된다(Fig. 1). 연구지역의 하양층군은 울산도폭의 울산층, 대구도폭의 대구층, 마산도폭의 함안층에 대비되며(박양대와 윤행대, 1968), 녹회색 및 암회색을 띠는 사암과 셰일 그리고 소량의 응회질 사암, 역암, 이회암층으로 구성된다. 유천층군은 대안안산반암으로 명명되나 있으며 백악기 유천층군 시대 말엽에 관입 분출한 안산암류로써 후기에 불국사화강암류에 의하여 관입당한 것으로 알려져 있다(박양대와 윤행대, 1968). 불국사화강암류는 울산단층을 따라 양편에 넓게 분포하는데 암상에 따라 흑운모화강암과 화강섬록암으로 구분되기도 한다(이미정 외, 1995). 윤선(1988)에 의해 명명된 왕산석영안산암질화산암류는 주로 용결구조가 발달하는 데사이트질 화산쇄설암으로 구성된다.

제3기 퇴적분지에는 전기 마이오세 동안에는 데사이트 내지 현무암질 화산쇄설물과 육성 퇴적물이 퇴적되었으며 이후 중기 마이오세초에는 화산 물질을 포함하지 않은 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 계속

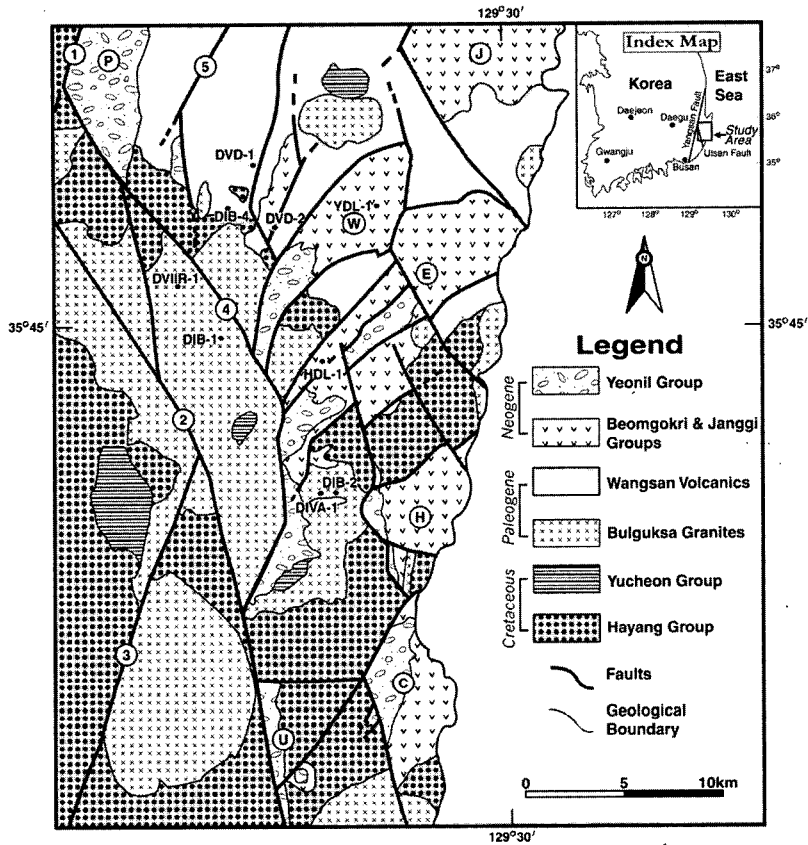


Fig. 1. Geological and sampling sites map of the study area (after Kim *et al.*, 2002b). Faults ①: Yansan Fault, ②: Ulsan Fault, ③: Dongnae Fault, ④: Yonil Tectonic Line (YTL), ⑤: Ocheon Fault. Tertiary Miocene basins ㉓: Ulsan Basin, ㉔: Chongja Basin, ㉕: Haseo Basin, ㉖: Eoil Basin, ㉗: Waup Basin, ㉘: Janggi Basin, ㉙: Pohang Basin.

되고 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 야외 조사에서 기존에 알려진 것보다 넓게 분포하고 있음이 보고되고 있는데 와음분지와 그 남쪽 연일구조선 인접부에는 주로 육성층이(손문 외, 2000, 2002), 그리고 포항분지, 어일분지, 하서분지, 그리고 정자분지 내에는 주로 내만성 기원의 해성층(윤선, 1988; Yun *et al.*, 1997)이 분포하고 있음이 알려져 있다.

제3기의 지각변형기 동안 한반도 동남부에는 지각 확장과 함께 북동방향의 정단층과 북북서방향의 우수향 주향이동단층들로 구획된 지구 내지 반지구형 퇴적 분지들의 만들어졌다(Fig. 1). 또한 분지 기반암과 충전물의 층리면이 체계적으로 북서방향으로 경사져 있으며 젊은 지층일수록 그 경사각이 얕아지고 있어(손문과 김인수, 1994; 손문, 1998; 손문 외, 2000, 2002), 단층으로 구획된 지괴들은 분지가 확장되는 동안 대부

분 북서방향으로 경동(tilting)되는 사건을 겪은 것으로 판단된다.

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 확장하는 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 지괴의 회전운동의 서쪽 한계선을 밝히기 위해 실시된 고자기학(Son *et al.*, 1997)과 구조 지질학 연구들(손문 외, 1999, 2002; Son *et al.*, 2001)은 이러한 지각 변형을 규제한 서쪽 한계선이 일반적

으로 알려져 왔던 울산단층 혹은 양산단층(한중환 외, 1987; 김인수, 1992; Yoon and Chough, 1995)이 아니라 울산단층보다 약 5 km 동쪽에 위치하는 새로운 구조선임을 주장하면서 이 구조선을 연일구조선으로 명명하였다. 연구지역에 분포하는 암맥들에 관한 야외산상과 암석학적 특징, 관입면의 방향성과 분포특성 등은 선행연구(김진섭 외, 2002a, b)를 참고하기 바란다.

연구방법

연구지역에 분포하는 제3기 암맥군과 화산암류의 연령을 측정하기 위하여 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 실시하였다. 일반적으로 암맥들은 큰 암체로서 분포하지 않기 때문에 분화의 산물들을 추정하기 어렵고, 때문에 Rb-Sr 연대측정법을 적용하기에는 문제점이 있다. 한편 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정은 기존에 이용되었던 K-Ar법이 가지고 있는 여러 가지 약점들을 보완할 수 있어 최근에 가장 많이 이용되고 있는 연대측정법 중의 하나이다. 그리고 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정법은 시료의 불균질성 문제를 해결할 수 있고 과잉 또는 손실 Ar에 관한 정보를 제공해 줄 수 있는 등 K-Ar 연대측정에 비해 많은 장점을 지니고 있다(김정민 외, 2001).

중성자 조사

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정을 위해 9개의 시료에 대해 중성자 조사를 실시하였다. 약 50-60 mg의 시료를 분리하여 99.5% 이상의 알루미늄 호일로 포장한 후 전체를 시판되는 알루미늄 호일로 다시 포장하여 중성자 조사용 표적을 제작하였다. 표적의 제일 바깥은 0.5 mm의 카드뮴(Cd) 호일로 감싸서 열중성자의 효과를 최소화하였다. 원자로 내부에서 생성되는 간섭 동위원소(interference isotope)의 영향을 측정하기 위한 K_2SO_4 와 CaF_2 및 중성자속 모니터(flux monitor)용으로 Fisher Canyon sanidine(28.02 ± 0.16 Ma, Renne *et al.*, 1998) 시료를 같이 포장하였다. 제작된 표적은 한국원자력 연구소 하나로 원자로 IP 5 조사공에서 3일간 조사시킨 후 실험실로 운반하여 방사능 양이 떨어지도록 약 2주간 대기한 후 실험을 실시하였다.

Ar 동위원소비 측정

방사능 양이 충분히 떨어진 시료들은 한국기초과학지원연구원에 설치된 VG5400 불활성기체 질량분석기를 통해 각 Ar 동위원소들의 비율이 측정되었다. 시료들을 유리로 만들어진 시료홀더에 넣은 후 약 150°C의 온도로 가열하면서 표면에 부착되어진 각종 불순물

들은 제거하고 진공도를 좋게 유지시켰다. 최고가열 온도에서의 배경값을 충분히 낮춘 후 시료들을 흑연계 전기로에 떨어뜨려 실험을 진행하였다. 가열은 650°C에서 시작하여 80-100°C 간격으로 9분씩 가열하여 단계적 가열(step heating)을 진행시키고 15분간의 가스정제 과정을 거친 후 질량분석기로 공급하였다. 자세한 전처리 과정은 김정민(2001)에 제시되어 있다. 질량분석기에서는 피크 점핑법(peak jumping method)을 이용해 Ar의 각 동위원소(^{36}Ar , ^{37}Ar , ^{38}Ar , ^{39}Ar , ^{40}Ar)의 신호를 측정하였다. 측정된 동위원소들의 신호는 Uto *et al.*(1997)의 계산방법을 응용한 스프레드시트 프로그램 이용해 최종적인 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 비를 구한 후 각 가열 단계의 연대를 계산하였다. 최종적인 플래토(plateau) 연대계산은 ISOPLLOT(Ludwig, 2001) 프로그램을 이용하였다.

결과 및 토의

염기성 암맥

측정된 시료에 대한 Ar 동위원소비의 결과는 Table 1과 같고, 현무암질 암맥군 시료의 연대 결과는 Fig. 2와 같다. (A)는 감산사 인근에서 47.3 ± 0.8 Ma, (B)는 건대마을 인근에서 48.0 ± 1.3 Ma, (C)는 황룡사 다리밑에서 52.4 ± 0.9 Ma로 관입연대가 도출되었다. (A)는 연일구조선의 서편 그리고 (B)는 연일구조선의 동편의 화강암을 관입한 암맥의 시료이며 각각 남북과 북동방향의 관입면을 가진다. 이번의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과는 이들 암맥들이 48 Ma 전후로 거의 동시기에 관입하였음을 지시하고 있다. 이는 선행 연구에서 얻은 결론인, 연일구조선 동편지역의 화강암체 내 염기성 암맥의 경우 관입 이후 시계방향으로 회전되었으며 연일구조선이 지괴의 시계방향 수평 회전운동을 규제한 주요 지구구조선을 지지하는 결과이다. 한편, (C) 암맥의 관입면 주향은 특이하게 서북서방향으로 관입면 주향 방향이 대부분 남북-북동방향인 연구지역 염기성 암맥군과는 시기를 달리하면서 관입한 것으로 판단된다. 또한 (C) 암맥의 모암에 해당하는 석영-장석 규장반암은 윤선(1988)에 의해 마이오세 장기층군에 속하는 것으로 알려진 바 있으나, 이번 연대측정 결과는 이 규장반암은 52.4 ± 0.9 Ma 이전의 암석임을 알려준다.

48 Ma의 의미: 선행 연구에서는 염기성 암맥들의 관입연령을 기존에 보고된 암맥과 마이오세 화산암류에 대한 연령(Kim *et al.*, 1986; 진명식 외, 1988, 1989; 김종열 외, 1991; 이현구 외, 1992), 암맥의 방향성 그리고 연일구조선의 활동시기(16.5-17 Ma; 손문 외,

Table 1. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analytical data from whole rock in the study area.

Sample No.	Temp (°C)	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	K/Ca	$^{40}\text{Ar}^*(\%)$	$^{39}\text{Ar}(\%)$	Age (Ma)	2s
(Type: Basaltic dike, Host rock: Granodiorite)								
DIB-1	710	4.80E-05	3.38E-03	0.56	0.1%	0.4%	16.8	120.3
	760	2.41E-04	3.23E-03	0.67	4.5%	0.7%	98.7	33.1
	830	8.45E-04	3.14E-03	0.69	7.1%	3.2%	45.0	9.2
	885	7.51E-04	3.17E-03	0.57	6.4%	3.7%	45.7	9.1
	945	1.31E-03	2.99E-03	0.46	11.8%	7.0%	47.8	5.6
	995	2.66E-03	2.59E-03	0.86	23.5%	6.2%	47.2	2.6
	1050	4.54E-03	1.91E-03	1.26	43.7%	6.8%	51.5	3.6
	1140	5.62E-03	1.69E-03	1.07	50.0%	17.0%	47.6	1.6
	1215	6.61E-03	1.46E-03	1.11	57.0%	22.8%	46.2	1.4
	1285	4.22E-03	2.10E-03	0.36	37.9%	22.0%	48.0	1.8
	1340	3.22E-03	2.35E-03	0.17	30.5%	7.6%	50.6	2.5
	1450	2.30E-03	2.49E-03	0.08	26.3%	2.6%	60.9	6.2
(Type: Basaltic dike, Host rock: Granodiorite)								
DIB-4	800	3.63E-04	3.35E-03	0.82	1.1%	0.9%	13.6	18.3
	850	1.14E-03	3.03E-03	1.02	10.6%	2.4%	42.0	5.6
	910	1.91E-03	2.60E-03	1.47	23.3%	5.2%	54.8	21.8
	960	1.21E-03	2.90E-03	2.18	14.2%	4.3%	52.9	5.8
	1010	4.06E-03	2.31E-03	2.44	31.7%	4.3%	35.2	5.1
	1090	3.83E-03	1.96E-03	2.40	42.1%	8.1%	49.5	1.7
	1160	5.82E-03	1.24E-03	4.69	63.3%	6.9%	48.9	1.7
	1220	6.08E-03	1.17E-03	3.60	65.5%	9.5%	48.5	1.5
	1280	5.91E-03	1.25E-03	2.50	63.1%	20.2%	48.2	1.3
	1350	5.22E-03	1.55E-03	1.32	54.1%	22.4%	46.8	1.5
	1390	3.42E-03	2.07E-03	0.77	38.8%	11.1%	51.1	2.3
	1450	3.11E-03	2.18E-03	0.72	35.7%	4.6%	51.6	2.2
(Type: Basaltic dike, Host rock: Quartz-feldspar porphyry)								
DIB-2	720	4.94E-05	3.30E-03	0.57	2.4%	0.4%	209.9	108.7
	800	2.85E-04	3.25E-03	0.44	3.8%	2.6%	60.7	17.5
	860	3.28E-04	3.23E-03	0.35	4.6%	5.0%	62.7	16.4
	900	1.08E-03	2.95E-03	0.29	12.7%	4.6%	52.8	5.2
	960	1.20E-03	2.91E-03	0.56	13.9%	8.4%	52.3	4.2
	995	2.34E-03	2.43E-03	1.28	28.2%	5.9%	54.3	4.7
	1060	4.21E-03	1.75E-03	1.71	48.3%	10.6%	51.7	2.0
	1145	4.42E-03	1.59E-03	1.77	53.0%	21.6%	53.9	3.5
	1250	4.69E-03	1.55E-03	0.63	54.3%	20.2%	52.1	1.5
	1320	3.25E-03	2.11E-03	0.20	37.5%	10.1%	52.0	2.3
	1390	3.66E-03	1.91E-03	0.33	43.5%	6.8%	53.4	3.5
	1450	3.99E-03	1.65E-03	0.48	51.4%	3.7%	57.8	4.6

2002) 등을 고려하여 동해가 활발히 확장되던 시기인 전기 마이오세(18~20 Ma)일 것으로 추정할 바 있다. 그러나 이번 연구에서 앞선 예상과는 달리 이들 암맥의 관입연령이 약 48 Ma임이 드러났다. 이는 한반도 남동부가 이 시기에 동서방향의 인장 응력장하에 있었음을 의미한다.

이번 연구에서 새로이 부각되는 48 Ma경의 동서방향 인장응력의 원인을 토의해보기 위해 백악기말에서 제3기초의 한반도 일원 지구조 상황을 살펴보기로 하겠다. 먼저 Lonsdale(1988)과 Cottrell and Tarduno(2003)는 초기 예오신(57 Ma경)에 쿨라판은 이미 상당히 북진하여 쿨라-태평양판의 해령이 현재의 시베리아 반도

Table 1. Continued.

Sample No.	Temp (°C)	³⁹ Ar/ ⁴⁰ Ar	³⁶ Ar/ ⁴⁰ Ar	K/Ca	⁴⁰ Ar*(%)	³⁹ Ar(%)	Age (Ma)	2s
(Type: Andesitic dike, Host rock: Granodiorite)								
DNA-1	680	7.05E-05	3.26E-03	4.29	3.7%	0.0%	264.6	207.0
	800	2.21E-04	3.26E-03	3.20	3.7%	0.3%	88.3	40.8
	860	7.06E-04	3.14E-03	0.70	7.2%	0.5%	54.9	23.4
	915	1.71E-03	3.00E-03	0.64	11.3%	1.1%	35.4	7.9
	965	1.09E-03	3.04E-03	0.45	10.3%	1.2%	50.5	10.1
	1010	2.11E-03	2.51E-03	0.47	25.9%	1.5%	65.1	5.8
	1060	6.97E-03	7.15E-04	0.72	78.9%	3.4%	60.3	2.5
	1110	8.27E-03	3.21E-04	1.67	90.5%	11.0%	58.4	2.0
	1150	9.70E-03	1.74E-05	1.32	99.5%	6.2%	54.8	2.0
	1205	9.25E-03	5.98E-04	1.72	82.3%	6.5%	47.6	1.8
	1270	9.24E-03	3.32E-06	1.29	99.9%	12.2%	57.7	2.1
	1330	9.78E-03	5.84E-05	1.45	98.3%	18.7%	53.7	2.0
	1400	9.16E-03	1.42E-04	2.79	95.8%	29.0%	55.9	1.9
	1450	7.60E-03	3.39E-04	0.50	90.0%	5.9%	63.1	2.9
	1500	5.26E-03	9.43E-04	0.27	72.1%	2.7%	72.9	4.0
(Type: Dacitic dike, Host rock: Churyeong Breccia)								
DVD-2	770	3.44E-04	3.25E-03	4.75	4.0%	0.6%	62.6	18.7
	830	4.48E-04	3.22E-03	5.21	4.9%	1.4%	57.9	14.4
	880	1.00E-03	3.20E-03	4.96	5.4%	4.4%	29.1	6.0
	920	2.19E-03	3.07E-03	4.19	9.4%	7.5%	23.2	2.8
	960	4.18E-03	2.74E-03	3.08	18.9%	13.1%	24.4	2.1
	1000	8.52E-03	2.06E-03	1.32	39.0%	10.3%	24.6	4.3
	1050	1.32E-02	1.59E-03	0.87	52.9%	10.5%	21.6	2.6
	1105	1.49E-02	1.44E-03	1.52	57.4%	8.0%	20.8	1.9
	1180	1.34E-02	1.57E-03	6.36	53.5%	7.4%	21.5	3.6
	1260	1.18E-02	1.81E-03	8.07	46.6%	10.6%	21.4	2.2
	1330	1.05E-02	2.00E-03	6.35	41.0%	12.1%	21.1	2.3
	1330	2.16E-03	3.00E-03	3.21	11.2%	8.1%	27.9	5.4
	1490	1.97E-03	3.08E-03	1.87	9.1%	5.8%	24.9	4.0
(Type: Rhyolitic dike, Host rock: Granodiorite)								
DVIIR-1	870	7.77E-04	3.22E-03	42.30	4.7%	1.1%	27.5	10.2
	925	2.98E-03	2.43E-03	79.71	28.1%	2.7%	42.6	4.5
	1000	4.59E-03	11.64E-03	1103.80	51.5%	10.3%	50.6	2.9
	1060	4.10E-03	1.75E-03	1029.00	48.2%	12.3%	52.9	2.8
	1105	7.65E-03	2.53E-04	542.67	92.5%	15.3%	54.4	2.9
	1170	7.85E-03	2.32E-04	2087.69	93.1%	18.2%	53.4	2.6
	1235	7.84E-03	2.47E-04	1829.56	92.7%	14.0%	53.2	3.9
	1305	7.26E-03	5.04E-04	820.51	85.1%	12.6%	52.7	2.7
	1390	6.25E-03	9.34E-04	148.21	72.4%	9.0%	52.1	2.8
	1440	5.25E-03	1.21E-03	12713.59	64.3%	3.0%	55.1	2.9
	1500	3.41E-03	1.91E-03	20.00	43.5%	1.4%	57.3	7.3

의 끝부분에 위치한 것으로 보고한 바 있다. 따라서 한 반도에 영향을 줄 수 있는 응력은 주로 태평양판과 인도판의 활동과 관련될 것으로 판단된다. 인도-유라시아 대륙 충돌에 의한 영향을 살펴보면, 김인수(1992)는

동해의 성인에 관한 논의에서 Tapponnier와 Molnar (1976)의 논문을 인용하여 지판간에 충돌이 일어날 때 봉합선지역에서는 압축력이 작용하지만 충돌현상으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 압축방향에 수직으로 장력

Table 1. Continued.

Sample No.	Temp (°C)	$^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$	K/Ca	$^{40}\text{Ar}^*(\%)$	$^{39}\text{Ar}(\%)$	Age (Ma)	2s
(Type: Andesitic lava in the Hyodongri Volcanics)								
HDL-1	650	2.08E-05	3.36E-03	1.31	0.8%	0.5%	207.4	265.2
	720	4.26E-05	3.33E-03	1.46	1.7%	0.5%	206.0	132.9
	760	2.07E-04	3.35E-03	0.81	1.1%	2.2%	29.1	25.6
	810	4.82E-04	3.24E-03	0.59	4.2%	3.1%	46.4	14.4
	860	1.77E-03	3.06E-03	0.77	9.5%	7.3%	29.0	3.3
	915	3.82E-03	2.73E-03	1.08	19.2%	9.7%	27.1	1.6
	980	6.92E-03	2.33E-03	1.44	31.1%	19.4%	24.2	0.8
	1045	6.83E-03	2.38E-03	1.63	29.7%	19.5%	23.4	1.0
	1100	6.08E-03	2.49E-03	1.70	26.5%	12.4%	23.4	1.1
	1185	7.35E-03	2.26E-03	1.38	33.2%	7.5%	24.4	1.6
	1270	4.89E-03	2.62E-03	1.04	22.7%	7.8%	24.9	1.4
	1360	2.96E-03	2.88E-03	0.97	14.8%	6.6%	26.9	3.3
	1450	3.68E-03	2.73E-03	0.89	19.3%	3.5%	28.3	3.3
(Type: Dacitic lava in the Girimsa Dacites)								
DVD-1	650	1.07E-05	3.34E-03	6.57	1.3%	0.0%	477.7	491.6
	740	8.35E-05	3.33E-03	3.55	1.6%	0.3%	86.7	54.4
	800	4.26E-04	3.31E-03	4.04	2.1%	1.5%	22.3	20.1
	865	1.34E-03	3.16E-03	4.51	6.7%	5.2%	22.7	4.1
	920	2.14E-03	3.03E-03	4.18	10.5%	11.0%	22.2	3.3
	980	4.66E-03	2.58E-03	3.79	23.7%	19.4%	23.1	1.9
	1100	1.36E-02	1.11E-03	5.11	67.2%	13.1%	22.4	0.8
	1200	1.15E-02	1.52E-03	4.69	55.1%	19.9%	21.8	1.0
	1310	9.72E-03	1.84E-03	4.70	45.7%	19.3%	21.3	1.0
	1450	8.00E-03	2.09E-03	2.27	38.2%	8.9%	21.7	1.5
	(Type: Dacitic lava in the Yongdongri Tuffs)							
YDL-1	650	2.16E-04	3.34E-03	9.08	1.4%	0.5%	35.8	81.9
	740	5.60E-04	3.35E-03	8.23	0.9%	2.9%	8.9	35.3
	800	1.86E-03	3.16E-03	7.18	6.7%	4.4%	19.4	8.0
	860	6.81E-03	2.34E-03	6.54	31.0%	8.3%	24.5	3.3
	910	1.30E-02	1.53E-03	5.41	54.8%	10.6%	22.8	0.7
	960	1.33E-02	1.54E-03	4.43	54.6%	13.0%	22.1	0.6
	1010	1.90E-02	8.10E-04	3.63	76.1%	18.7%	21.6	0.7
	1070	1.99E-02	7.63E-04	2.69	77.5%	20.3%	21.0	0.6
	1130	1.61E-02	1.18E-03	1.75	65.1%	8.1%	21.8	1.7
	1210	1.27E-02	1.63E-03	1.31	51.8%	5.2%	21.9	1.5
	1310	8.03E-03	2.26E-03	0.81	33.3%	6.2%	22.3	1.4
Correction factors for interfering isotopes								
							2s	
	$(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}$	4.676E-05	6.655E-06					
	$(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}$	1.172E-03	3.648E-04					
	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}$	2.270E-01	2.938E-02					
	J factor	0.00025305	6.382E-06					

Notes: Isotopic ratios corrected for blank, radioactive decay, and mass discrimination, whereas 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 $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}$.

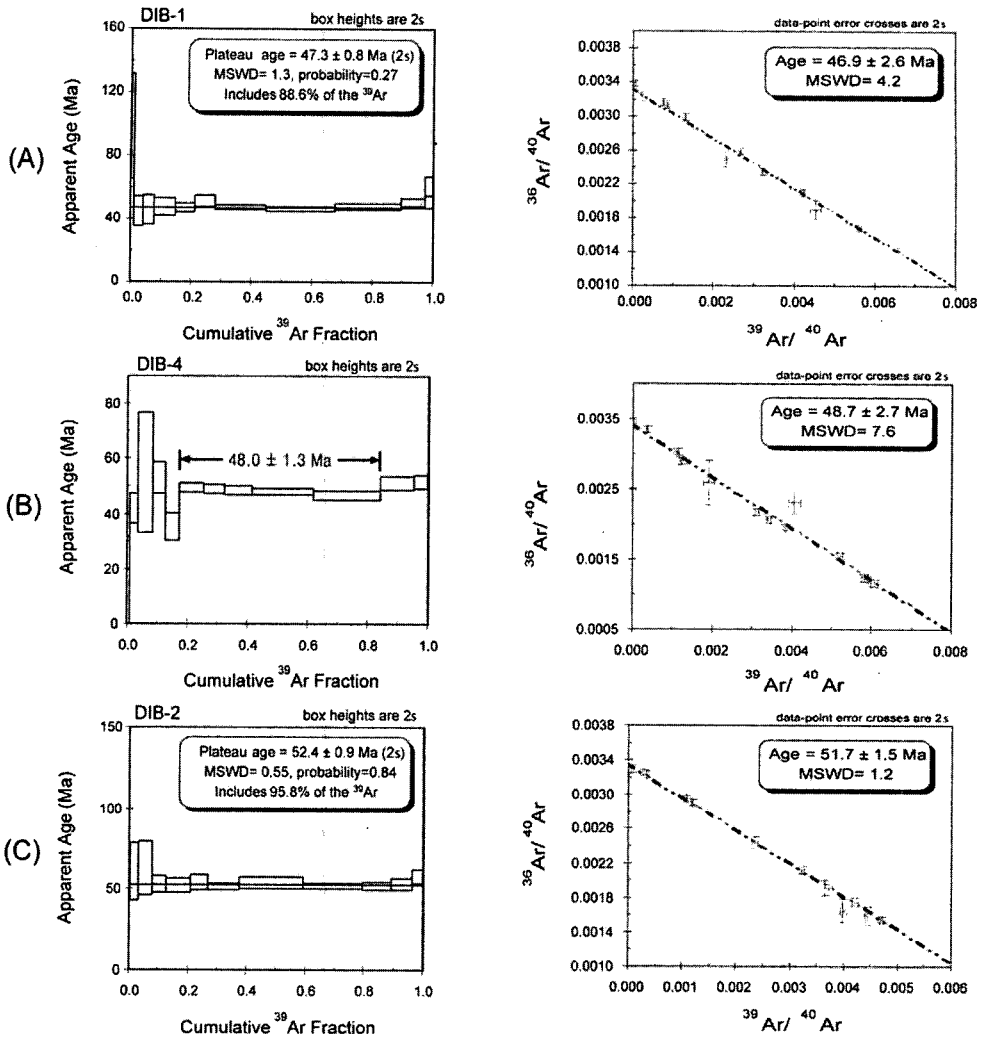


Fig. 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ release spectra and isochron diagrams from basaltic dikes.

이 작용하며 이러한 장력이 바로 동해의 확장을 시작시킨 근본적이며 직접적인 힘임을 주장한 바 있다. 한편, 인도판은 곤드와나 대륙에서 중기-후기 백악기에 분리되어 약 4,000 km의 거리를 15~20 cm/yr의 속도로 북상하여 고제3기에 이르러 아시아 대륙과 충돌한 것으로 알려져 있다. 이동 속도는 해저 자기이상대 자료를 통하여 밝혀져 있는데 약 55~50 Ma에는 그 이동속도가 5 cm/yr 이하로 급격히 감소하고 있어 이때가 대륙의 충돌이 시작된 시기로 해석될 수 있다(Patriat and Achache, 1984; Besse and Courtillot, 1988). 암석학자들은 히말라야 북서부에 존재하는 약 49Ma 연령의 고압형-에코러자이트상 변성암을 근거로 인도-아시아 대륙의 충돌 시작은 이 변성암의 연령보다는 먼저였을

것으로 보고한 바 있으며(Spencer, 1993), 최근 Hall (2002)은 다양한 지질 및 지구물리학적 자료들을 이용한 전산 시뮬레이션을 통하여 충돌의 시작은 약 50 Ma 경인 것으로 보고하였다. 또한, Patzelt *et al.*(1996)의 티벳 남부 퇴적암에 관한 고지자기학적 연구에서는 인도판과 유라시판의 충돌은 이미 65~60 Ma경에 시작되었으며 55~50 Ma경에 통합이 완료되었다고 주장하였다. 현재로서는 두 대륙의 정확한 충돌 시기를 결정하기에는 논란의 여지가 있으나 앞서 여러 자료들을 근거할 때 늦어도 약 50 Ma에는 이미 충돌이 시작되었을 것으로 판단되며, 48 Ma경에는 인도-유라시아의 충돌에 의한 응력이 한반도 일원까지 전파되었을 가능성이 높다.

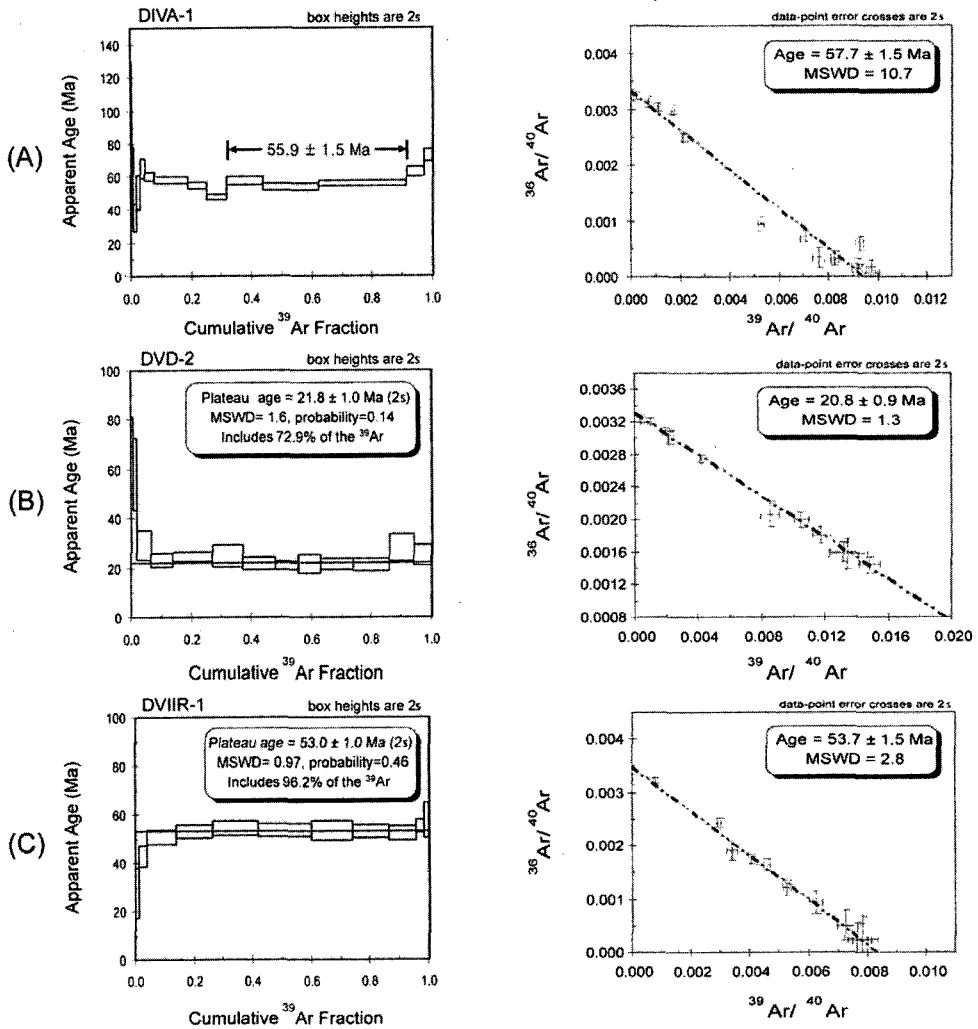


Fig. 3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ release spectra and isochron diagrams from intermediate and felsic dikes.

태평양의 하와이-앰페리 군도 배열 방향의 급변이 43 Ma경에 있었다는 것은 잘 알려진 사실이다(Koppers *et al.*, 2001). 이러한 43 Ma경에 있었던 태평양판 운동의 변화에 대하여 Richards *et al.*(1996)은 섭입의 시작, 해령의 섭입, 인도와 아시아의 충돌을 그 메카니즘의 후보로 논한 바가 있다. 섭입의 시작은 이즈-보닌-마리아나 호상열도계를 따라 48 Ma경에 태평양판의 섭입이 있었음(Stern and Bloomer, 1992)을 지적하고, 이러한 섭입의 시작에 의한 빠른 해구의 퇴각이 일어나 북으로 진행하던 태평양판에 서쪽방향으로 슬랩부력을 야기 시켜 5 Ma 후에 태평양판의 운동에 변화를 주었다는 것이다. 그리고 해령의 섭입은 태평양판과 북 뉴기니아판의 경계는 해령으로 보고 있는데 이 해령의

섭입이 50~45 Ma경에 있었으며(Hall, 2002), 이 해령이 섭입에 의해 사라짐으로써 태평양판의 북으로 진행을 약화시켰다는 것이다. 한편, Sahabi *et al.*(1996)에 의한 태평양판과 남극판의 해령의 형태를 조사한 결과, 48 Ma를 경계로 중요한 형태의 변화가 인지된다고 보고 하였다. 이러한 점들은 48 Ma를 전후하여 전 세계적인 판구조환경의 변화가 발생하였음을 의미하며, 이 시기에 관입한 한반도 동남부 염기성 암맥군은 이러한 전 세계적인 지구조환경 변화를 알려주는 하나의 주요 결과물일 가능성이 높다.

중성~산성 암맥

중성~산성 암맥들에 관한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과는

Fig. 3과 같다. (A) 건대마을의 토함산화강섬록암을 관입한 안산암질 암맥에서 55.9 ± 1.5 Ma, (B) 추령각력암을 관입한 데사이트질 암맥에서 21.8 ± 1.0 Ma, (C) 광산마을 일원에서 토함산화강섬록암을 관입한 유문암질 암맥에서 53.0 ± 1.0 Ma에 해당하는 결과를 얻었다.

(A) 암맥에서 얻어진 연령과 관련하여 그 모암에 해당하는 토함산화강섬록암의 관입연령에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면, 진명식 외(1988)의 흑운모 K-Ar 연대 $52.3 \pm 4.7 \sim 57.3 \pm 4.6$ Ma, 이종익 외(1997)의 흑운모 K-Ar 연대 50.0 ± 1.1 Ma, Kim and Kim(1997)의 Rb-Sr 전암연대 49.7 ± 0.1 Ma, 고정선(2001)의 Rb-Sr 전암연대 57.6 ± 5.6 Ma, 황병훈(2004)의 Rb-Sr 전암연대 59.6 ± 4.5 Ma가 제시된 바 있다. (A) 안산암질 암맥의 연령과 이러한 기존 결과들과 비교해 볼 때, 토함산화강섬록암의 정치시기는 적어도 56 Ma 이전의 결과들이 신뢰성을 가질 것으로 판단된다. 한편, 화강섬록암내에는 염기성 미립 포유암(MME-mafic microgranular enclave: 김중선 외, 2004)이 혼하게 관찰되는데, 이는 마그마 혼합의 증거로 알려져 있다. 그리고 안산암질 암맥의 경하 관찰에 의하면 염기성 미립 포유암보다 더 세립인 점을 제외하고, 반정을 거의 포함하고 있지 않으며 전체적으로 MME와 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다. 더구나 안산암질 암맥의 연령이 현재까지 보고된 화강섬록암과의 관입시기와 크게 차이가 나지 않는 점 등은 이 안산암질 암맥이 마그마 혼합시 염기성 마그마의 단성분일 가능성이 있다. (B) 시료는 시대미상의 추령 각력암을 관입한 데사이트질 암맥으로 윤선(1988)에 의해 기립사데사이트로 명명된 것들에 해당된다. 이에 관한 자세한 논의는 다음절의 충서적 논의에서 하겠다.

(C) 시료는 토함산화강섬록암을 관입한 유문암질 암맥으로 선행연구(김진섭 외, 2002a)에서 지화학적인 특징이 남산화강암과 아주 유사함을 지적한 바 있다. 경주 일원에는 토함산화강섬록암, 흑운모(또는 등립질)화강암, 남산알칼리화강암으로 구별되는 세 가지 암상의 화강암이 분포한다(이종익 외, 1997, 고정선, 2001, 황병훈, 2004). 특히, 남산알칼리화강암의 성인에 관해서는 다양한 의견이 제시되고 있다(이미정 외, 1995, 이준동과 황병훈, 1999, 고정선, 2001, 황병훈, 2004). 이 중 최근 들어 고정선(2001)은 흑운모화강암 마그마가 형성되어 빠져나간 뒤에, 같은 기원암으로부터 고온의 적은 정도의 재용융의 과정에 의해 남산 A-형 화강암이 형성된 것으로 해석하였다. 반면, 황병훈(2004)은 흑운모화강암과 남산화강암은 동일한 근원물질에서 형성된 마그마가 서로 다른 진화과정을 겪은 산물로 해석

하였다. 이러한 견해들은 남산화강암의 성인 문제의 해결을 위해서는 남산화강암과 흑운모화강암 정치의 시간 차이를 밝히는 작업이 선행되어야 함을 보여준다.

남산화강암의 관입시기에 대한 기존의 Rb-Sr 연대 측정 결과를 살펴보면, 주승환 외(1982)에 의한 Rb-Sr 전암-흑운모 연대가 51.0 ± 1.4 Ma, Kim and Kim(1997)의 Rb-Sr 전암 연대가 49.8 ± 0.1 Ma, 고정선(2001)에 의한 Rb-Sr 전암 연대가 49.0 ± 2.0 Ma를 보고한 바 있다. 그리고 황병훈(2004)은 Rb-Sr 전암 연대로 48.6 ± 1.2 Ma를 보고했지만, Sm-Nd 동위원소비로 근원물질을 추정하는 과정에서 48.6 Ma로 계산하면 자체의 근원물질이 상당히 분산된 결과를 초래하므로, 50.1 Ma가 보다 타당할 것이라 밝힌 바 있다. 이상의 결과를 살펴보면 남산화강암의 정치연령은 50 Ma 부근에 수렴한다.

한편, 흑운모화강암의 관입시기에 대한 Rb-Sr 연대 측정 결과를 보면 주승환 외(1982)에 의한 Rb-Sr 전암-흑운모 연대가 55 ± 0.7 Ma, 고정선(2001)에 의한 Rb-Sr 전암 연대가 51.4 ± 6.5 Ma, 황병훈(2004)은 Rb-Sr 전암 연대를 50.1 ± 4.7 Ma로 보고하였다. 이상의 결과는 흑운모 화강암의 연령은 오차범위가 크며 55~50 Ma의 범위에 해당된다.

이번 연구에서 측정한 유문암질 암맥의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대 측정 결과는 53.0 ± 1.0 Ma로서, 고정선(2001)과 황병훈(2004)이 제시한 남산화강암보다는 오래된 결과를 보이나, 흑운모화강암과는 오차범위 내에서 비슷한 결과를 보였다. 한편, 앞서 논의한 약 48 Ma의 염기성 암맥군들은 일정한 방향성을 가지면서 수동관입의 형태로 화강섬록암뿐만 아니라 흑운모화강암도 관입하고 있다. 화강암질 마그마의 냉각속도를 고려한다면, 흑운모화강암의 연령은 현재 제시된 결과보다 고기일 가능성이 있다. 이와 관련하여 이종익 외(1997)도 경주일원의 화강암체에 대한 K-Ar 연대 측정 결과에서 후기의 열적 영향에 의해 상당히 변화되었을 가능성을 제시한 바 있다.

화산암류

충서적인 논의: Tateiwa(1924)는 한반도 남동부 마이오세 분지 충진물을, 지질시대에 따라 장기통과 연일통으로 구분하였다. 장기통은 전기 마이오세의 것으로 데사이트와 현무암질 화산암류가 대부분이며 하성 및 호성퇴적물들이 교호된다. 반면, 연일통은 중기 마이오세의 것으로 화산물질을 포함하지 않은 해성퇴적물로 대부분 구성된다(윤선, 1988; Yoon, 1991). 장기통은 다시 장기충군과 범곡리충군으로, 연일통은 연일충군으로 모두 3개의 충군으로 구분되고 있다. 그러나 이들

Table 2. Classification of the Basin-fills in the study area.

Tateiwa(1924)	Chwae. et. al.(1988)	Yoon(1988)	This study(2005)	
Yeonil Basalt	Yeonil Basalt	Yeonil Basalt	Songjeon Formation	Yeonil Group
Cheonbuk Conglomerates	Songjeonri Formation	Sinhyeon Formation Gangdong Formation	Eoil Formation	Janggi Group
Beomgokri Andesite and its tuffs	Hoamri Formation	Eoil Basaltic Volcanics	Gampo Conglomerates	Beomgokri Group
Galpyeongdong Breccias	Andesitic tuffs and its tuffaceous conglomerates	Intrusion	Beomgokri Volcanics	
Yongdongri Tuffs	Conglomerates	Girimsa Dacites	Yongdongri Tuffs	
Andongri Conglomerates	Yongdongri Tuffs	Jeondong Formation	Andongri Tuffs	Beomgokri Group
Waeupri andesitic tuffs	Andongri Conglomerates	Janghang Formation	Waeupri Tuffs	
Eoil Formation and Eoil Basalt	Waeupri Tuffs	Yongdongri Member	Hyodongri Volcanics	
Hyodongri volcanic rocks	Buntonggol Volcanics Hyodongri Volcanics	Andongri Conglomerates	Basement rocks	
Gampo Conglomerates	Eoil Formation and Eoil Basalt	Waeupri Tuffs		
Basement rocks	Gampo Conglomerates	Basement rocks		
	Basement rocks			

층군들의 상대적인 지질시대에 관한 견해는 크게 2가지로 상반되어 논란이 계속되고 있다. 즉, 먼저 Tateiwa(1924)를 시작으로 장기층군 상부에 부정합적으로 범곡리층군이 놓인다는 견해가 있으며, 이와는 반대로 Tateiwa(1924)의 장기층군과 범곡리층군을 새로이 구분하면서 범곡리층군 상부에 장기층군이 부정합으로 놓인다는 의견이 주장되었다(윤선, 1988; Yoon 1992, 1997). 한편, 최근에는 범곡리층군과 장기층군이 시간적인 선후관계가 없이 서로 지교(interfinger)하고 있을 가능성도 거론되고 있다(Yun *et al.*, 1997)(Table 2).

필자들은 이러한 논란의 주요 원인을 범곡리층군과 장기층군에 관한 객관적이고 명확한 정의가 세워져 있지 않는데 있다고 판단한다. 암층서적으로 지층을 구분 지을 때는 암석학적 특징이 명확하여야 하나 아직까지 두 층군을 쉽게 구분할 만한 암상 혹은 암석학적 특징들이 정리되어 있지 않아 연구자에 따라 지층이 속한 층군이 달라지는 경우가 있어왔다. 범곡리층군과 장기층군은 주로 화산쇄설암으로 구성되어 있으므로, 층서수립을 위한 중요한 선결 과제는 각 층군에 포함된 화산물질의 기원과 성분을 알아내는 일이다. 세계적으로, 화산기원 물질을 포함한 지층을 층 대비나 지층 분대의 수단으로써 유용하게 사용되고 있기 때문이다(예를 들어 화산회층서학: tephrostratigraphy, Miall, 1990). 손문 외(2002)에 의하면 범곡리층군과 장기층군 각각에 포함된 화산물질의 성분이 서로 확연한 차이를

보이고 있다. 즉, 범곡리층군 내에 포함된 화산물질은 대부분 데사이트질 마그마 기원이며 부분적으로 안산암질 기원물질들이 포함되어 있다. 반면, 장기층군의 화산물질은 현무암질의 것이 절대적으로 우세하다. 따라서 이러한 특징은 두 층군을 정의하고 구분하는 유용한 기준이 된다.

한편, 한반도 동남부 일원에 분포하는 제3기 화산암류에 대한 연대측정은 대부분 장기층군에 해당하는 열기성 화산암류에서 주로 수행되었으며, 측정 방법들은 대부분 K-Ar법 또는 피션트랙(fission-track)법 위주로 이루어졌다. 그 결과들을 종합하면, 포항분지 내에 소규모로 분포하는 알칼리 현무암을 제외하고 현무암질 암석들은 대부분 17~20 Ma에 해당하는 연령을 지시하고 있다(김진섭 외, 2002b). 그러나 범곡리층군에 해당하는 산성-중성 화산암류에 대한 결과는 몇 개의 자료(진명식 외, 1989)를 제외하고는 찾아보기 어렵고, 방법에 있어서도 피션트랙법 위주로 수행되었으며, 그 결과들도 야외 선후관계를 고려하면 신뢰하기 힘든 것이 많다.

이번 연구에서는 신뢰할만한 연대측정이 부족하고 층서 문제에 있어서 이견이 많은(손문, 1998)(Table 2) 산성-중성 화산암류에 속하는 효동리화산암류, 시대미상의 추령각력암을 피복하는 데사이트질 용암, 용동리 응회암 내에 협재된 데사이트질 용암에 대한 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대측정을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다.

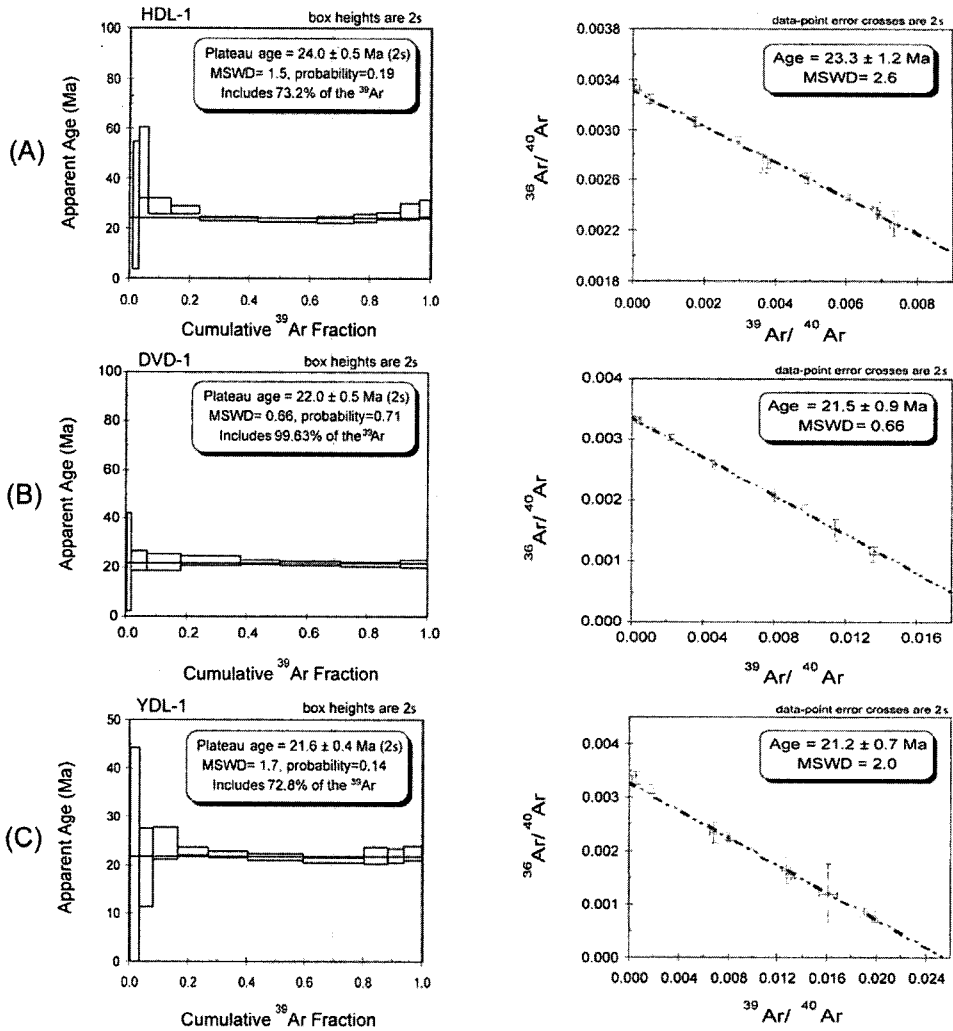


Fig. 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ release spectra and isochron diagrams from the Tertiary volcanic lavas.

(A) 효동리화산암류의 중부층에 해당하는 안산암질 용암 시료에서 24.0 ± 0.5 Ma, (B) 추령각력암을 피복하는 데사이트질 용암에서 22.0 ± 0.5 Ma, (C) 용동리응회암 내 데사이트질 용암에서 21.6 ± 0.4 Ma의 연령 결과를 얻었다.

효동리화산암류: Tateiwa(1924)에 의하면 효동리화산암류는 장기층군에 속하며, 조면암 및 안산암질 용암 그리고 안산암질 응회암으로 구성된다. 조면암은 반정의 종류에 따라 흑운모조면암 및 각섬석조면암으로 구분되며, 안산암은 휘석안산암, 흑운모안산암, 각섬석안산암 등으로 세분하였다. 류춘길(1996)의 하서분지의 연구에 의하면, 효동리 화산암류는 안산암질의 화산쇄

설암과 용암류로 구성된 독립된 안산암질 화산활동의 산물이며, 이는 상위의 전동층에 의해 정합적으로 피복되고 어일현무암류에 의해 관입되어 있다. 손문(1998)에 의하면, 어일분지와 장항분지 연구결과 효동리화산암류를 범곡리층군 내지 장기층군에 선행하는 기반암에 포함시켰다. 고려지질(1999)의 보고서에 의하면, 효동리화산암류는 하부에 산성질의 응회질 퇴적암과 응회암이 존재하며 중부 및 상부에서 안산암질 화산암류를 데사이트질 화산암류가 정합적으로 피복하고 있다. 정혜윤(2000)에 의하면, 효동리 화산암류는 효동리 일대에서 기반암과 단층경계 및 부정합 관계로 접촉하고 있고 연일층군의 강동층/신현층에 의해 부정합으로 피복되어 있다.

이상의 연구결과들의 중요한 논점은 효동리 화산암류를 (1) 장기층군에 포함시킬 것인가, (2) 범곡리층군에 포함시킬 것인가, (3) 범곡리층군과 장기층군에 선행하는 기반암에 포함시킬 것인가 하는 것이다. 이번 연구에서는 효동리화산암류 내 중부대의 안산암질 용암으로부터 24.0 ± 0.5 Ma의 연대를 측정하였다. 이 자료는 현재까지 보고된 마이오세 화산암류에 대한 연령 측정결과들 중 가장 오래된 시기를 지시한다.

기림사테사이트: 기림사 테사이트는 시대미상의 추령각력암을 관입 및 피복하는 테사이트질 암석으로 윤선(1988)에 의해 명명되었다. 윤선(1988)에 따르면 이 암석은 장기층군에 속하며, 전동층 이후로 판단하였다. 앞선 절에서 밝힌 추령각력암을 관입하는 테사이트 암맥의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 결과가 21.8 ± 1.0 Ma이며, 한편 추령각력암을 피복하는 테사이트 용암은 22.0 ± 0.5 Ma이다. 선행연구(김진석 외, 2002a)에서 테사이트 용암과 암맥은 거의 동일한 암석기재적, 지화학적 특징을 보임을 보고한 바 있다. 두 암석의 연대측정 결과도 이와 부합한다. 한반도 동남부의 제3기 분지에서 마이오세 초에 해당되는 시기는 주로 분지 충진물들이 퇴적되던 시기(손문, 1998)인 점을 감안하면, 시대미상의 추령각력암과 이를 관입 및 피복하는 테사이트와는 시기적으로 큰 차이가 없을 것으로 판단된다. 손문(1998)에 의한 와음분지의 연구에서 범곡리층군 내에 기림사테사이트와 유사한 암상의 암석이 포함되어 있음이 보고된 바 있다. 또한 이번 연구에서 밝힌 약 22 Ma에 해당하는 연령을 감안한다면 기림사테사이트는 범곡리층군에 포함되어야 할 것으로 판단된다.

용동리옹회암류: 용동리옹회암은 최하부에 존재하는 최대 약 10 m 두께의 테사이트질 화산집괴암과 그 상부의 낙회암 그리고 옹회질 사암으로 구성된다. 화산집괴암은 사장석, 각섬석, 흑운모의 반정인 우세한 동종의 각력들로만 구성되며 그 기질 또한 각력과 유사하다. 화산집괴암 직하부의 안동리층 사암대에는 대규모 함몰사태(slump)와 불꽃(flame) 구조가 만들어져 있다. 이는 호성환경에서 급작스런 화산활동의 발발로 화산집괴암이 빠른 속도로 안동리층 사암대를 피복하였음을 지시해 주는 것이다(손문, 1998). 상부의 옹회암은 대체로 층리의 발달이 미약한 비반상(aphyric) 옹회암이 주를 이루고 있으며 상부로 갈수록 층리가 발달하는 옹회질 사암으로 변해간다. 이러한 용동리옹회암의 퇴적 순서는 호소형 분지에서 발생한 한번의 대규모 화산활동과 관련된 일련의 퇴적활동을 지시하는 것

으로 판단된다. 즉, 중성-산성질 화산활동의 초기에 폭발성 화산쇄설물의 분출, 화산회의 낙하, 화산회의 낙하량 감소 그리고 다시 퇴적활동의 우세로 이어지는 연속적인 일련의 사건들의 산물인 것이다. 한편, 용동리옹회암은 같은 테사이트질 마그마 성분의 범곡리화산암류의 최하부 지층인 화산집괴암에 의해 다시 피복된다. 이 화산집괴암은 용동리옹회암의 최하부 화산집괴암과 암상이 매우 유사하다. 때문에 윤선(1988)은 용동리옹회암을 그 상위층에 해당하는 '장항층'의 최하부 아층으로 규정하였으며, 최위찬 외(1988)는 범곡리화산암류의 최하부층인 화산집괴암을 용동리옹회암에 포함시켜 용동리옹회암을 보다 두꺼운 층으로 정의하기도 하였다. 그러나 손문 외(2000)에서는 용동리옹회암을 단 한번의 대규모 테사이트질 화산활동에 의한 연속적인 퇴적 사건을 지시하는 층으로 한정하여 재정의 하였다. 따라서 용동리옹회암은 시간 및 사건 층서학적 개념에서 하나의 열쇠층이 될 수 있다. 이번 연구에서 측정된 시료는 용동리옹회암(손문 외, 2000)중 하부에 협재된 테사이트질 용암에 해당된다. 연령 결과는 21.6 ± 0.4 Ma로서 범곡리층군이 장기층군에 선행할 것이라는 견해(윤선, 1988; 손문, 1998)를 지지한다.

이상의 제3기 화산암류에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정으로, 효동리화산암류에서 약 24 Ma, 기림사테사이트에서 약 22 Ma, 용동리옹회암에서 약 21.6 Ma의 결과를 얻었으며, 선행된 야외조사와 이번 결과들로부터 Table 2와 같은 층서적인 결론에 도달하였다. 그러나 한반도 남동부의 보다 확고한 제3기 층서설정을 위해서는 보다 세밀한 야외조사와 더불어 장기층군을 포함하는 보다 많은 지층들에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대측정 작업이 수행되어야 함이 과제로 남아있다.

사 사

이 논문을 읽고 여러 가지 유익하고 건설적인 비평을 해주신 부경대학교 박계현 교수님과 경상대학교 좌용주 교수님께 감사드립니다. 이 연구는 부산대학교 교내학술연구비(4년과제)의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 고려지질, 1999, 경주 양남면 상라리 46호 광산, 서동리 41호 광산 지질조사 보고서. 39 p.
 고정선, 2001, 경상분지내 남산 A-형 화강암과 경주 I-형 화강암류에 대한 광물학적, 지화학적 및 Sr-Nd 동위원소 연구. 부산대학교 박사 학위논문, 173 p.
 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 고자기학적 연구. 지질학회지, 25, 273-293.
- 김정민, 2001, 한국기초과학지원연구원에 도입된 K-Ar 연대 측정 시스템: 개요 및 성능. 한국 암석학회지, 10, 172-178.
- 김정민, 정창식, 한현수, 조운갑, 2001, 하나로 원자로와 불활성 기체분석기를 이용한 ^{40}Ar - ^{39}Ar 연대측정. 2001년도 한국광물학회/한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 60-64.
- 김종열, 정차연, 윤선, 1991, 장기반도의 마이오세 전기-중기의 암맥군과 광역지구조용력장(I). 지질학회지, 27, 330-337.
- 김종선, 김건기, 좌용주, 이준동, 2004, 경상분지 화강암류에서 발견되는 엔클레이브(포유암)에 대한 암석기재적 연구. 암석학회지, 13, 1-15.
- 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.
- 류춘길, 1996, 양남분지 하서지역의 제3기층. 부산대학교 석사 학위논문, 56 p.
- 박양대, 윤형대, 1968, 한국지질도(1:50,000), 울산도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 20 p.
- 손문, 1998, 한반도 동남부 제3기 마이오세 분지의 형성과 발달: 구조지질학 및 고자기학적 고찰. 부산대학교 박사 학위논문, 233p.
- 손문, 김인수, 1994, 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질구조와 분지발달. 자원환경지질, 27, 65-80.
- 손문, 정혜윤, 김인수, 2002, 한반도 동남부 연일구조선 남부 일원의 지질과 지질구조. 지질학회지, 38, 175-197.
- 손문, 정혜윤, 김승현, 김인수, 문태현, 장태우, 1999, 한반도 동남부 신생대 지각변형과 연일구조선. 제54차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 대한지질학회, 50.
- 손문, 김인수, 이동호, 이준동, 김진섭, 백인성, 2000, 울산단층일원에 대한 지역지질 특성연구: 제3기 마이오세와 읍분지의 지질구조와 대자율비등방성(AMS). 지질학회지, 36, 195-216.
- 윤선, 1988, 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 25 p.
- 이미정, 이종익, 이민성, 1995, 경주지역의 A-형 알카리장석 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31, 583-607.
- 이종익, 이미정, 두경택, 이민성, Keisuke Nagao, 1997, 경상분지 중동부 울산-경주 지역의 화강암체에 대한 K-Ar 연대 측정. 지구과학회지, 18, 379-389.
- 이준동, 황병훈, 1999, 경주 남산-토함산 일원의 화강암류에 관한 암석학적 연구. 한국지구과학회지, 20, 80-95.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤희수, Tetsumaru Itaya, 1992, 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조 연구: 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25, 337-349.
- 정혜윤, 2000, 경주시 양남면 일원의 지질 및 신생대 지각 변형에 대한 고찰. 부산대학교 석사 학위논문, 110 p.
- 주승환, 진명식, 윤현수, 김동학, 1982, Rb/Sr 연대측정연구(서산화강편마암 및 화강암, 평해 온정리 화강암, 기타 지역의 화강암). 한국동력자원연구소 연구보고서 KR-82-13, 193-208.
- 진명식, 김성재, 신성천, 1988, K-Ar 및 플렉트릭법에 의한 포항-감포 일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 한국동력자원연구소 동위원소 지질연구 KR-87-27, 51-88.
- 진명식, 김성재, 신성천, 이주연, 1989, K/Ar 및 플렉트릭법에 의한 한국동남부 지역 화강암 및 화산암의 암석 광물연령 측정연구. 한국동력자원연구소 연구보고서 KR-88-6D, 53-84.
- 최위찬, 황재하, 윤옥, 김동학, 1988, 한국지질도(1:25,000), 어일도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 42 p.
- 한종환, 광영훈, 손진담, 손병국, 1987, 한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체구조발달 및 퇴적환경 연구(II). 한국동력자원연구소 연구보고서 KR-86-2(B)-4, 109 p.
- 황병훈, 2004, 경상분지 남부지역의 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인. 부산대학교 박사 학위논문, 306 p.
- 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.
- 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.
- Kim, C.S. and Kim, G.S., 1997, Petrogenesis of early Tertiary A-type Namsan alkali granite in the Kyeongsang Basin, Korea. *Geoscience Journal*, 1, 99-107.
- 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.
- 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, Y.S., Ishikawa, N. and Kim, W.K., 1999, Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: tec-

- tonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, 304, 131-149.
- 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, 56 p.
- Miall, A.D., 1990, Principles of Sedimentary Basin Analysis. 2nd ed., Springer-Verlag, 668 p.
- 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.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, Analysis of Geological Structures. Cambridge University Press, Cambridge, 502 p.
- Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D.B., Owens, T.L. and DePaolo, D.J., 1998, Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Chemical Geology*, 145, 117-152.
- 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., Roullet, G., Ondreas, H., Beuzart, P. and Aslanian, D., 1996, Morphological reorganization within the Pacific-Antarctic Discordance. *Earth and Planetary Science Letters*, 137, 157-173.
- 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. 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.
- 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.
- 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.
- Tapponnier, P. and Molnar, P., 1976, Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264, 319-324.
- Tateiwa, I., 1924, 1:50,000 Geological Atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kuryuho and Choyo sheets. *Geol. Surv. Chosen* (in Japanese).
- 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.
- 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., 1992, Paleoenvironmental change of the Tertiary Yangnam and Pohang basins of the southern Korea Peninsula. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 37, 117-124.
- 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.
- 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.
- Yun, H., Yi, S. and Byun, H., 1997, Tertiary system of Korea. *Paleont. Soc. Korea Special Publication*, 3, 1-30.

(2005년 3월 30일 접수; 2005년 4월 13일 채택)