

## 고지자기학적 관점에서 본 추가령단층곡의 생성과 진화

이윤수<sup>1\*</sup> · 민경덕<sup>2</sup> · 황재하<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원, <sup>2</sup>연세대학교 지구시스템학과

## The Geodynamic Evolution of the Chugaryeong Fault Valley in a View Point of Paleomagnetism

Youn Soo Lee<sup>1\*</sup>, Kyung Duck Min<sup>2</sup> and Jae Ha Hwang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Yonsei University, Department of Earth System Sciences, Seoul 120-749, Korea

The dynamic evolution of the Chugaryeong fault valley is studied by paleomagnetic works on 163 samples at 16 sites from Late Cretaceous and Quaternary volcanic rocks in the valley. Conglomerate test and stepwise thermal/alternating field demagnetization indicate that all the characteristic directions are of primary origin. Paleomagnetic pole position (216.8°E/71.6°N;  $dp=7.1^\circ$ ,  $dm=10.0^\circ$ ) for the upper part of the Jijangbong Volcanic Complex is indistinguishable from the coeval reference pole position from the Gyeongsang Basin, which further substantiates the reliability of the paleomagnetic data. This indicates the study area has not undergone any tectonic rotation since Late Cretaceous by any significant reactivation of the Chugaryeong fault valley. The Quaternary pole position (134.2°E/86.5°N;  $A_{95}=7.1^\circ$ ) from the Jeongog Basalt reflects the present geocentric axial dipole field for the area, supporting the above conclusion. Unlike the upper part, paleomagnetic directions of the lower part of the Jijangbong Volcanic Complex show random distribution between sites. We interpret that the early stage of the volcanic activity was created by sinistral strike-slip motion of the Chugaryeong fault during early Late Cretaceous. The creation and evolution of the Chugaryeong fault valley emphasize the significance of the kinematic FR (folding ruler) model in East Asia.

**Key words :** chugaryeong, paleomagnetism, strike-slip fault, rejuvenation

추가령 단층곡의 진화를 고찰하기 위하여, 철원-연천일원의 제4기 및 후기 백악기 화산암류로부터 채취한 총 16개 장소에서 163개 정향시료에 대하여 고지자기 연구를 실시하고 특성잔류자화를 구하였다. 후기 백악기의 지장봉 산성 화산암복합체의 상부 산성화산암류로부터 구한 고지자기극의 위치는 216.8°E/71.6°N( $dp=7.1^\circ$ ,  $dm=10.0^\circ$ )로써 경상분지의 동시기의 것과 일치하는데 이는 추가령 단층선이 후기 백악기 이래로 커다란 지구조 운동을 경험하지 않은 것으로 해석된다. 제4기 전곡 현무암에 대한 연구 결과(134.2°E/86.5°N;  $A_{95}=7.1^\circ$ )도 현재의 지구회전축과 통계적으로 일치함으로써 이를 지지한다. 그러나, 지장봉 산성화산암복합체의 하부의 고기 현무암류로부터 구한 특성잔류자화 방향은 장소간에 심하게 산포되어, 본 암체의 화산활동이 추가령 단층곡의 좌수향 주향이동단층에 기인하여 형성된 것으로 해석되었다. 이는 후기 백악기의 추가령 단층곡의 진화사를 밝혀주는 중요한 증거이며, 동아시아의 FR 조구조 모델에 의해 잘 해석된다. 이 논문은 FR 모델로 조명한 추가령 단층곡의 생성과 진화에 대한 논의와 해석을 제공한다.

**주요어 :** 추가령, 고지자기, 주향이동단층, 재활성

### 1. 서 언

원산에서 서울을 지나는 추가령 구조선 혹은 단층선(이하 추가령 단층선)은 한반도에서 가장 뚜렷한 선상

구조 중 하나로서, 이를 따라서 삼첩기말-쥬라기초의 퇴적분지, 쥬라기의 화강암류, 후기 백악기의 화산암류와 제4기의 현무암이 분포하며, 이는 추가령 단층 형성 이래로 최근까지도 재활성 운동 및 화성활동에 연계되어 있음을 시사한다.

추가령 단층선은 小藤(1903)와 木野崎(1937)가 지구

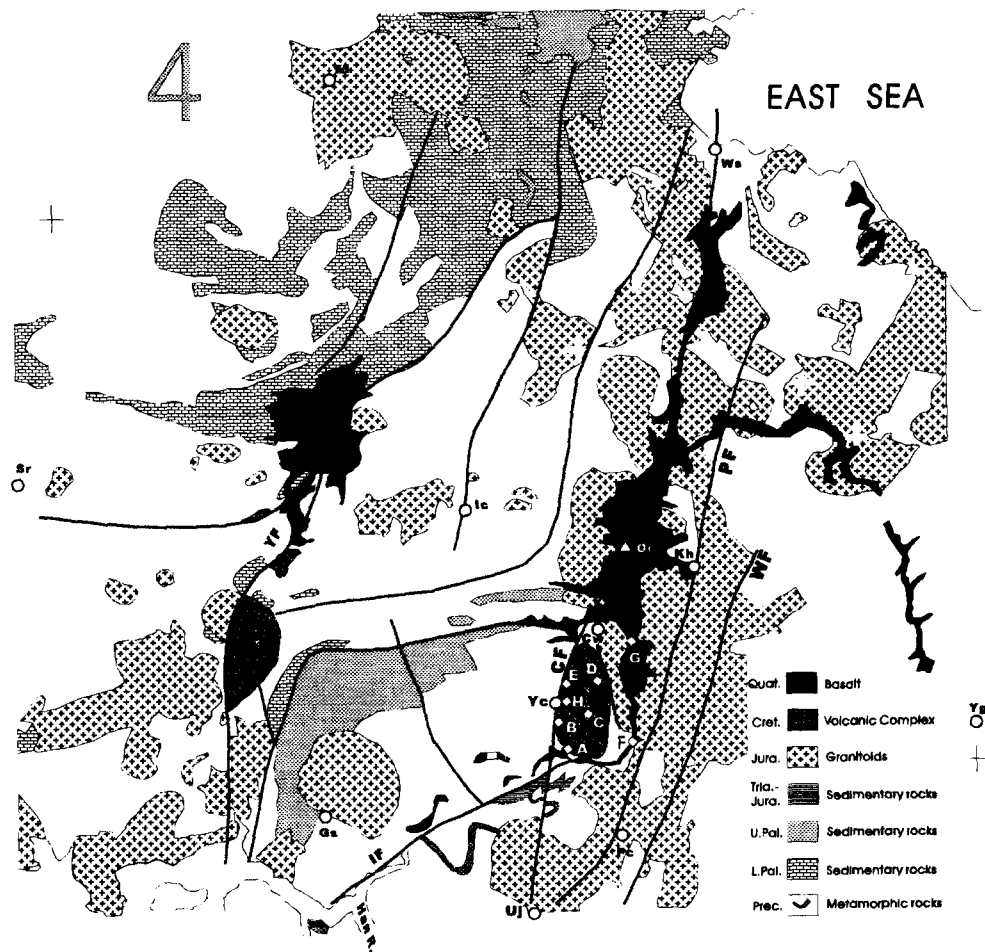
\*Corresponding author: leeys@ysgeo.yonsei.ac.kr

대로 보고한 이래로 최근까지 그 지질 구조적 특성과 형성 기원을 규명하기 위하여 많은 연구들이 이루어져 왔다. 이 견해는 Holmes(1965)에 의해 지지되었으며, 길주-명천 지구대와 Sikhote-Alin 단층과 연결된 큰 주향이동단층계에 속하는 것으로 보고되었다. 이대성 외(1983)는 암석학 및 고지자기학 연구에 의해 추가령지구대가 동해 확장의 초기 단계에 형성된 aulacogen의 failed-arm 중 하나로 보고 열곡대라고 제안하였다. 원종관 등(1990)은 제4기 현무암의 지화학 연구를 통하여, 대륙내에서 열점과 관련된 화산활동으로 해석하고, 이 구조선이 열곡대라는 데에 동의하였다.

한편, 김규한 등(1984)은 화산암류에 대한 암석학 및

고지자기학적 증거에 근거한 구조연구를 통하여, 추가령 단층선을 백악기 혹은 제3기 초에 생성된 주향이동 단층선으로 해석하였으며, Lee and Lee(1991)는 중력 자료 해석에서 지각 확장에 의한 증거는 보이지 않는다고 보고하였다.

Cluzel *et al.*(1991)은 구조 연구를 통하여 추가령 단층선이 후기 삼첩기의 충남분지의 형성과 관련되었을 것으로 제안하였으며, 최근의 동아시아 형성에 관한 조구조 연구(Lee *et al.*, 1992, 1997)에서는 전기 삼첩기의 대륙 충돌과의 연관성이 제시되기도 하였다. 최근에는 추가령구조선이 연천계의 구조적 진화와 연계되었을 가능성이 제안(Chwae, 1998)되기도 하였다.



**Fig. 1.** The geologic map of the Chugaryeong Fault area. The upper-left and lower-right crosses represent the locations of  $126^{\circ}\text{E}/39^{\circ}\text{N}$  and  $128^{\circ}\text{E}/38^{\circ}\text{N}$ , respectively. A, Jangtanri; B, Tonghyeonri; C, Gasansanseong; D, Ipyeongri; E, Daegwangri, F, Daehoisanri; G, Sangweolri; CF, Chugaryeong Fault; IF, Imjingang Fault; PF, Pocheon Fault; WF, Wangsugcheon Fault; YF, Yeseonggang Fault; Cw, Cheolweon; Gs, Gaeseong; Ic, Icheon; Kh, Keumhwa; Or, Orisan; Pc, Pocheon; Sr, Sariweon; Uj, Uijeongbu; Ws, Weonsan; Yd, Yangdeog; Yg, Yanggu.

지난 10년간 동아시아의 조구조 진화와 관련된 고지자기 연구가 Lee *et al.*(1992, 1996, 1997) 및 이윤수(1999a)에 의해 수행되어 왔는데, 그 층돌 및 봉합 과정에 탄루단층계와 함께 추가령구조선이 연관되어 있고, 특히 추가령 단층선은 오랜 기간에 걸쳐서 한반도의 형성을 밝히는데 매우 중요한 역할을 하였던 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 봉합 이후 추가령 단층선의 진화를 규명하기 위하여 추가령 단층선을 따라 분포하는 화산암류에 대한 고지자기 연구 결과를 보고하고, 이 연구와 이전의 연구 결과들을 면밀히 분석하여, 추가령 단층선의 생성과 진화 그리고 특성에 대하여 고찰하고자 한다.

## 2. 지질 개요

추가령 구조선은 원산에서 서울을 지나는 단층선(Cluzel *et al.*, 1991)으로, 한반도에서 평북지괴(낭림지괴)와 경기지괴를 관통하고 있다(Fig. 1). 이 지역에는 선캠브리아기의 변성암복합체를 기반으로 하며, 추가령 단층선의 서측에는 주로 두터운 석회암으로 이루어진 전기 고생대층(조선계)과 이를 부정합으로 피복하는 후기 고생대층(평안계와 임진계)이 분포한다. 개성 부근에 위치한 후기 고생대층은 임진계로 불리우며, 전기 삼척기의 고압변성대로 보고되어 왔다. 후기 삼척기에서 전기 쥬라기에는 임진강 단층을 따라 육성 퇴적암(대동계)이 발달하며, 그 후 쥬라기에 대규모의 대보 화강암류가 이 일대를 관입하고 있으며, 전체적으로는 북동-남서방향을 유지한다. 이와는 달리 추가령 단층선을 따라 분포하는 대보 화강암류는 한반도에서 북북동-남남서의 독특한 관입방향을 나타내고 있다. 이 일대의 지질은 高橋(1962), 이대성 등(1983), 김규한 등(1984), 원종관 등(1990), Chwae(1998)에 상세히 기술되어 있다. 이번 고지자기 시료 채취가 이루어졌던 백악기의 지장봉 화산암복합체와 제4기 전곡 현무암(혹은 추가령 현무암으로도 불림)은 추가령 단층과 예성강 단층을 따라서 분포하며, 이들에 대한 자세한 설명은 2.1. 절에 기술한다(Fig. 1, Table 1).

### 2.1. 지장봉 화산암복합체(후기 백악기)

#### (가) 고기 현무암

본 암은 경기도 연천군 장탄리의 자살바위, 통현리 남봉고개, 고문리, 백의리에서 발견되며, 현무암과 녹색 응회암으로 구성된다(Fig. 1). 고기 현무암류 중에서 장탄리에 분포하는 현무암(장탄리 현무암)은 약 100 m

**Table 1.** Geology in the Chugaryeong area.

Q	Jeongog Basalt ---extrusion---
K2	acidic/intermediate dyke ---intrusion--- Jijangbong Volcanic Complex ---extrusion & intrusion---
J	Daebo Granite ---intrusion---
Tr-J	Daedong System ~~~unconfirmitly~~~
D-P	Pyeongan & Imjin System ~~~unconfirmitly~~~
Є-S	Joseon System ~~~unconfirmitly~~~
PЄ	Sangweon & Yoncheon System ~~~unconfirmitly~~~ Gyeonggi Metamorphic Complex

높이의 절벽 노두로 노출되지만, 그 외의 것들은 수 m의 규모이다. 이들은 다공질의 암상으로, 방해석이 수 mm 직경의 기공과 석기를 이루는 사장석의 내부를 각각 2차적으로 충전하거나 부분적으로 치환하고 있다. 야외에서 제4기 현무암과 육안으로 구분하기 어려울 때도 있지만, 제4기 전곡 현무암내에는 방해석이 채워져 있지 않아 염산 반응을 하지 않는 반면에, 고기 현무암은 강렬한 염산 반응을 하여 주위의 제4기 현무암과 구별하는 열쇠가 된다.

장탄리 현무암은 녹색 응회암 사이에 놓이며, 그 관계는 분명치 않다. 이 암석은 편광 현미경과 지화학 분석에 의해 엄밀히 안산암에 속하지만(김규한 등, 1984), 여기에서도 초기 명명자(이대성)를 존중하여 장탄리 현무암으로 하였다. 이대성 등(1983)은 장탄리 현무암이 녹색 응회암에 미약한 열변질과 고대변질을 주었음에 주목하고, 이를 관입암체로 보았다. 하지만 자세히 보면, 그 경계부를 따라서는 작은 규모의 안산암 맥이 관입하고 있으며, 이것은 장탄리 현무암 형성 이후에 관입한 작은 암맥일 가능성이 있다(김용준과의 의견 교환). 녹색 응회암 내에서는 2개의 다른 관입암맥이 발견되는데, 장탄리 현무암과는 달리 다공질이 아니다. 이는 물론 장탄리 현무암 자체가 관입암체가 아니고 분출암이라는 것을 의미하지 않는다. 녹색 응회암은 장탄리 현무암과의 경계부에서 수직에 가까운 경사각을 보이나, 수십 m 남짓 떨어진 곳에서는 거의 수평에 가까운 층리를 보인다. 이 때문에 본 연구에서

는 현무암과 녹색 응회암의 경계부가 단층 관계를 갖는 것으로 해석하였으며, 본 단층을 따라서 다른 안산암맥이 관입한 것으로 해석하였다. 고기 현무암은 지장봉 화산암복합체의 하부에서만 발견되며, 이는 본 암체의 화산활동 초기에 녹색 응회암과 함께 고기 현무암류가 분출 혹은 관입했었다는 것을 시사하여 준다.

고기 현무암의 K-Ar 전암연대는 장탄리의 자살바위에서  $94 \pm 5$  Ma(이대성 미발표 자료)와  $73.1 \pm 1.6$  Ma(Lee, 1989), 통현리 남봉고개에서  $89.5 \pm 4.7$  Ma(이대성 미발표 자료)와  $78.6 \pm 2.5$  Ma(Lee, 1989)로 차이를 보인다. 이는 광물들의 변질작용 등에 기인하여 일부  $^{40}\text{Ar}$ 이 빠져나갔을 가능성이 많아, 이 연대들은 고기 현무암의 최소연대를 의미하는 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서는 장탄리와 통현리의 고기 현무암 연대를 각각  $94 \pm 5$  Ma와  $89.5 \pm 4.7$  Ma로 간주하였다(Table 2).

고기 현무암과 같이 지장봉 화산암복합체의 하부층을 구성하는 녹색 응회암에서  $52 \pm 2$  Ma의 저어콘 fission track연대가 보고(김규한 등, 1984)된 바 있다. 장탄리에서 채취한 이 시료는 편광현미경하에서 열수 변질을 심하게 받은 것이 확인되었고, 저어콘의 폐쇄 온도가  $200^\circ\text{C}$  내외인 점을 고려한다면, 이 연대는 열수변질된 시기를 나타낼 가능성이 많다. 또한 이 암석은 장탄리 일대에서 고기 현무암의 역 또는 암괴를 포획하고 있어서, 이 암석의 분출시기는 고기 현무암과 유사한 90 Ma 경일 것으로 판단된다.

#### (나) 산성 화산암류

지장봉 화산암복합체의 대부분을 이루며, 유문암질에서 유문-안산데사이트질의 응회암, 용암 및 응회질퇴적암으로 구성되며, 층후는 1000 m 정도로 추산된다. 지장봉 화산암복합체의 남쪽과 북쪽은 경기 편마암복합체 및 류라기 화강암과 부정합 관계를 이루고, 서쪽과 동쪽은 각각 연천계 및 류라기 화강암과 단층접촉(각각 추가령 단층 및 동송 단층)을 보이며, 지장봉 화산암복합체가 두 단층 사이에서 함몰된 구조를 하고 있다(김규한 등, 1984).

응회암 내에 포함된 각력의 크기는 보통 수 cm에서 수 mm 정도이지만, 연천군 동막리에서는 수십 cm 장경의 역도 포함한다. 현미경하에서 관찰한 결과에 따르면, 이들 역도 역시 각력질-라필리 응회암인데, 이는 다수의 격렬한 분출을 지시한다. Chwae(1998)는 화산암체 내에 소규모의 퇴적암류를 보고하고, 칼데라호에 일시적으로 퇴적된 것으로 해석하였으며, 그 직후 분

출된 유문암류와 응회암류의 분출로 칼데라가 붕괴되었다고 해석하였다. 일부 퇴적암에서는 개형층, 식물화석 파편들이 산출되었다.

화산암체 내에는 거의 남북방향으로 발달한 좌수향의 균열들이 관찰되며, 이는 지장봉 화산암복합체의 생성과 밀접한 관련성을 갖는 것으로 판단된다. Chwae(1998)도 동송읍 근처의 남북방향의 단층들로부터 좌수향의 주향이동을 한 흔적들을 보고한 바 있다.

## 2.2. 제4기 전곡 현무암

추가령 단층선에서의 제4기 전곡 현무암은 한탄강변을 따라 좁고 길게 분포한다(Fig. 1). 이 현무암은 남한에서는 철원평야를 지나 한탄강을 따라서 분포하며, 문산의 동파리까지 그 분포가 확인되고 있다(김규한 등, 1984). 또한 화천 동쪽 평화의 댐 인근의 북한강 상류에도 약 30~40 m 두께의 현무암이 시추되었으며, 철원 민통선 내에서의 현무암의 두께는 71 m로서, 다량의 현무암이 이 일대에 분출되었음을 알 수 있다. 木野崎(1937)는 평강 부근의 오리산(Fig. 1)과 680 m 고지가 이 현무암의 분출구라는 보고를 하였다. 두 분화구는 추가령 단층선에 나란히 놓이며, 이는 제4기 현무암이 추가령 단층선의 약한 틈을 따라서 분출하였음을 시사해 준다. 철원부근의 대북한 전망대에서 본 오리산은 지형도에서 추정되는 지세보다는 훨씬 웅장한 규모로 뒤편이 꽤 넓은 사다리꼴의 형태를 갖고 있어, 엄청난 양의 용암을 쏟아낸 곳이라는 것을 실감할 수 있다.

이 현무암에는 주상절리가 잘 발달되고, 다공질 구조가 수평층을 이루는 것으로 보아, 분출된 이래로 구조운동을 받지 않았음을 지시하는데, 이는 석동우(1982), 이대성 등(1983)과 김규한 등(1984)의 고지자기 연구 결과에서 규명된 바 있다. 김규한 등(1984)는 한탄강의 상류로 갈수록 용암의 흐름 매수가 증가한다고 지적하고, 본 암의 분출원은 철원보다 북쪽에 있을 것으로 보았으며, 이는 木野崎(1937)가 지적한 견해를 지지하여 준다. 김규한 등(1984)의 지적한 제3 용암층은 주상절리가 촘촘하고 길게 잘 발달되어 있고, 상부에 놓인 제4 용암층과의 사이에 틈틈이 풍화토가 배태되어 있어 특히 포천-연천군 일대에서는 건층(key bed)의 역할을 한다. 박계현 등(1996)은 대화산리에서 채취한 두 현무암 시료의 K-Ar 전암연대( $138.4 \pm 5.7$  ka,  $136.5 \pm 5.4$  ka)를 보고한 바 있다.

### 3. 고지자기 연구

#### 3.1. 정향시료 채취

이 연구에서는 콜리노 컴파스에 삼각발과 각도기가 한뭉치로 부착된 삼지나침반(tripod compass)를 사용하여 정향시료를 채취하였으며, 노두에 광화작용이나 변질작용을 받은 부분을 피하여, 가능한 신선한 부분을 선택하였다. 채취한 정향시료는 실내에서 직경과 높이가 각각 24 mm와 22 mm인 실린더형의 코아정향시

료를 제작하였다.

**지장봉 화산암복합체**: 본 암의 분포지 일대의 대부분은 군사작전지역에 속하며, 시료 채취를 위한 접근이 자유롭지 않은 곳이 많다. 무엇보다도 이 암체의 대부분을 구성하는 산성화산암류는 대자율이 약하여, 자성 광물의 양 자체가 적어 매우 약한 잔류자화를 갖는다. 따라서, 이러한 암석을 대상으로 시료를 채취할 때에는 대자율을 측정할 필요가 있다. 이 연구에서는 대자율 값이  $3 \times 10^{-4}$  SI 이상이고, 화산 암편을 포함하지

**Table 2.** Paleomagnetic result in this study of the Chugaryeong area.

Period	Formation (Age, Ma)	Site									
		No.(L)	Long. (°E)	Lat. (°N)	n(n)	D (°)	I (°)	$\alpha_{95}$	k	Demag.	Lithology
Q	Jeongog Basalt $0.138 \pm 0.0057(Kw)^1$ $0.136 \pm 0.0054(Kw)^1$ $0.27 \pm (Kw)^2$	D2(F)	127.2	38.1	10	6.6	60.7	1.6	983.2	10 mT	alkali basalt
		D3(F)	127.2	38.1	21	12.5	61.1	1.8	350.3	10 mT	
		D4(F)	227.2	38.1	18	11.2	60.2	1.5	477.1	10 mT	
		S1(G)	127.3	38.2	7	359.7	57.7	2.4	664.8	10 mT	
		mean (horizontal layer)				(4)	7.3	60.0	3.8	599.4	
K2	Acidic Volcanic Complex $52 \pm 2(Fz)^3$	Jt1(C)	127.1	38.1	7	37.9	60.9	5.8	109.9	PAFD	rhyolite/rhyodacite
		Jt2(C)	127.1	38.1	6	25.8	56.0	12.2	30.9	PAFD	lava and tuff
		Jt3*(C)	127.1	38.1	7	310.3	-15.4	49.7	4.6	PAFD	
		Jt4(D)	127.2	38.2	7	20.5	56.8	9.5	41.7	PAFD	
		Jt5(D)	127.2	38.2	8	8.9	51.7	9.3	36.6	PAFD	
		Jt7*(E)	127.1	38.2	8	31.5	35.8	8.0	49.2	PAFD	
		Jt7*(E)	127.1	38.2	8	131.5	35.8	8.0	49.2	PAFD	
		Jt8*(E)	127.1	38.2	5	3.3	-3.9	10.3	44.6	PAFD	
		mean (horizontal layer)				(5)	23.0	55.4	7.0	121.9	
K2	Jangtanri Basalt $94 \pm 5(Kw)^4$ $73.1 \pm 1.6(Kw)^5$	Ja1	127.1	38.0	7	220.5	34.3	10.6	33.2	PAFThD	vesicula
		Ja2	127.1	38.0	7	223.1	30.3	9.2	45.1	PAFThD	andesitic basalt
		Ja3	127.1	38.0	5	216.3	37.7	15.2	27.2	PAFThD	
		Ja4	127.1	38.0	7	228.4	28.3	10.0	37.9	PAFThD	
		Ja5	127.1	38.0	8	233.7	24.1	5.3	111.8	PAFThD	
mean (no tilt correction)				(5)	224.7	31.1	7.5	106.4			
K2	Tonghyeonri Basalt (no tilt correction) $89.5 \pm 4.7(Kw)^4$ $78.6 \pm 2.5(Kw)^5$	Tb1*	127.1	38.1	4	101.7	3.5	12.0	61.1	PAFThD	trachy basalt
		xenolith (no tilt correction)	Jx1*	127.1	38.0	5	16.8	-33.7	15.3	26.5	PAFThD

D, I,  $\alpha_{95}$ , and k denote declination, inclination, 95% cone of confidence, and best estimate of precision parameter. Asterisk attached on site No. was not included for the formation mean direction. (L) is the sampling location shown in Fig. 1: (A), Jangtanri; (B), Tonghyeonri; (C), Gasansanseong; (D), Ipyeongri; (E), Daegwangri; (F), Daehoisanri; (G), Sangweolri; n(n), number of sample(site); Kw, K-Ar method for whole rock; PAFD, progressive alternating field demagnetization level applied (unit: mT); PThD, progressive thermal demagnetization. Superscript attached in isotop age denotes the reference numbers: 1, Park *et al.* (1996); 2, Choi (1982); 3, Kim *et al.* (1984); 5, Lee (1989)

않은 시료를 선별하여 채취하였다. 이 때, 유난히 대자율 값이 큰 경우는, 흔히 2차적 광화작용 등에 의해 형성된 자류철석 등의 자형의 자성광물이 집중되어 있을 수 있어 피하였다. 기반암에 부정합으로 접하고 있는 장탄리와 백의리 일원의 산성화산암은 데사이트질 녹색응회암으로서 수 mm 정도의 압편을 포함하는 데다가 일부 열수변질까지 받고 있어 고지자기 연구 시료로서는 부적합하다고 판단되었다. 이번 연구에서 지장봉 화산암복합체의 하부층에 대해서는 고기 현무암류를 상부층에 대해서는 산성화산암류를 대상으로, 모두 16개 장소에서 105개 시료를 채취하였다(Table 2, Fig. 1). 이를 세분하여 볼 때, 하부의 고기 현무암류는 (1) 장탄리의 자살바위(A, Fig. 1)의 5개 장소에서 34개 시료, (2) 통현리 남봉고개(B)의 1개 장소에서 4개 시료, (3) 장탄리에 분포하는 녹색 응회암내의 현무암질 포획암의 1개 장소에서 5개 시료, 총 7개 장소에서 43개 시료를 채취하였다. 상부의 산성 화산암류는 (1) 지장봉 산성화산암복합체의 가산산성(C), 이평리(D), 대광리(E)에 노출된 용결응회암과 산성용암에서 8개 장소 53개 시료, (2) 역암실험을 위해 동막리(H)의 각력암에서 1개 장소 9개 시료, 총 9개 장소에서 62개 시료를 채취하였다(Table 2, Fig. 1).

**제4기 전국 현무암**: 경기도 포천군 영북면 대화산리의 비둘기낭 유원지(F)에서는 3매의 현무암 수평층이 인지되었다. 이를 김규한 등(1984)의 구분 기준에 의해 제2 용암층(약 5 m 두께), 제3 용암층(약 10.5 m), 제4 용암층(약 9 m)으로 구분하고 총 3매의 용암층으로부터 총 49개의 정향시료(각각 10개, 21개, 18개 시료)를 채취하였다. 또한 강원도 철원군 상월리(G)의 제1용암층에서는 1개 장소에서 7개 시료를 채취하였다. 따라서, 이번 연구에 있어서 채취한 제4기 현무암 시료는 총 4개 장소(용암층)에서 56개 시료이다(Table 2, Fig. 1).

### 3.2. 고지자기 실험

이 연구에서 수행한 실험은 지질자원연구원과 일본京都대학의 고지자기 실험실에서 병행하여 이루어졌으며, 잔류자화 측정, 교류/열 소자, 열자기 분석실험, 대자율 측정, 등온잔류자화(IRM, Isothermal Remanent Magnetization) 획득실험, Composite IRM 실험 등을 실시하였다. 사용한 실험기기는 스피너자력계, 초전도 자력계, 교류/열 소자기, 포화자화 balance, 순간 직류 자화기, 대자율 측정기 등이다.

각 장소에서 채취된 시료들은 1~3개의 표준시료를

택하여 각종 예비실험들을 실시하였으며, 이 결과를 통하여 남은 시료들에 대한 적절한 소자방법과 효율적인 소자단계설정이 결정된다. 매 단계별로 소자된 자료는 주성분 분석법(Kirschvink, 1980)을 이용하여 자화방향을 결정하였다(Table 2).

**지장봉 화산암복합체**: 추가령 구조선의 진화를 규명하는 고지자기 연구에 있어서, 지장봉 화산암복합체를 구성하는 자성광물에 대한 기초 물성 자료는 매우 중요하다. 자성광물이 기록하고 있는 특성잔류자화를 정확히 구하고, 올바르게 해석하기 위해서는 자성광물의 종류, 기원, 특성 등을 규명하는 일이 필요하다.

대부분의 화산암에 있어서, 1차잔류자화는 자철석에 의해 수행된다는 것이 보편적으로 받아들여지고 있다. 한반도의 백악기 역암층을 구성하는 화산암역에 대한 역암실험 결과에 따르면(전영수 등, 1999), 자철석과 적철석이 공히 역암실험을 통과하여, 1차자화로 인정되는 예도 있다. 특히 동아시아에 있어, 백악기의 적색층에 대한 자철석과 적철석의 특성자화는 매우 중요하며, 1차기원과 2차기원의 자성광물의 자화의 구분과 그 특성을 규명하고자 하는 연구들이 수행되어 왔다.

Fig. 2는 자성광물의 종류를 밝히기 위한 전형적인 열자기 분석실험의 예로써, 장탄리 현무암 시료의 포화등온자화의 열적 거동을 보여준다. 이 실험에서는 열을 가할 때 일어나는 산화작용을 방지하기 위하여, 아르곤 가스를 주입하였으며, 시료 중앙에서의 자기장의 세기는 0.85 T이다. Fig. 2의 실험 결과를 근거하여 볼 때, 시료에 포함된 자성광물은 약 570°C의 Curie 온도를 갖

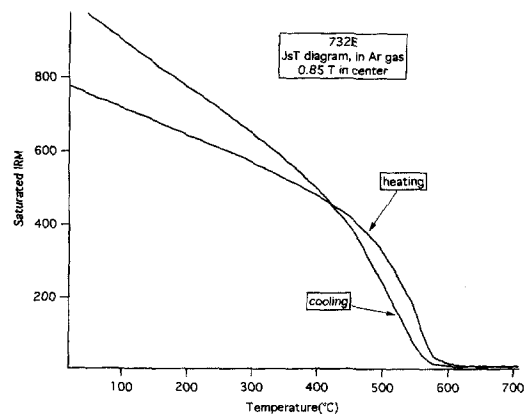
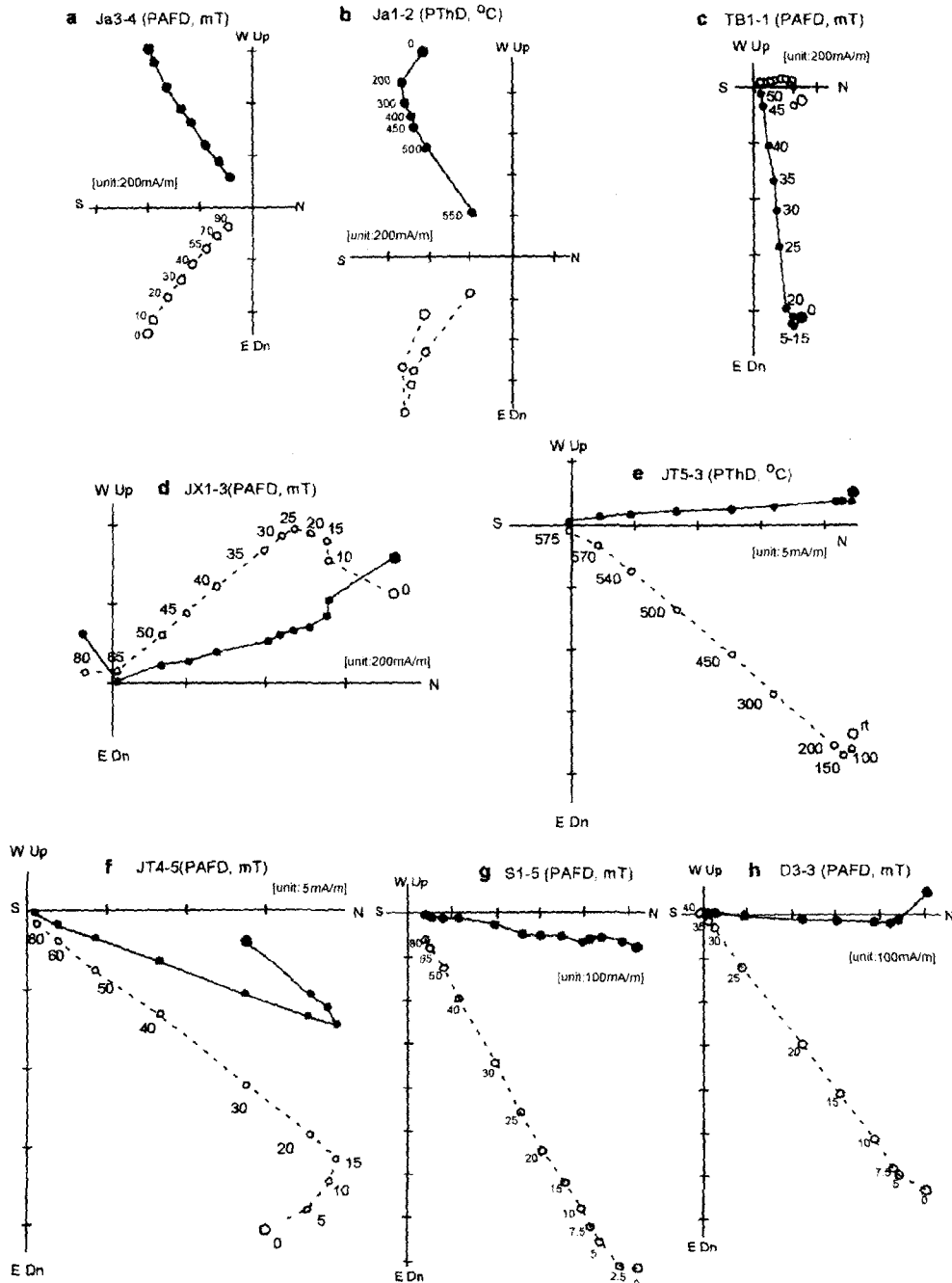


Fig. 2. Thermomagnetic balance curve analysis for the Jangtanri Andesite (High DC field of 0.85 T at the center and Ar-gas filling). Unblocking temperature of 580°C indicates the magnetic carrier is nearly pure magnetite.

는 자철석으로 약 450°C 부근에서 자화 강도의 변화가 보다 급격히 떨어지는 특성을 보인다. 또한 이 시료에서 적철석은 없거나 미미한 것으로 해석된다.

(가) 고기 현무암 :

장탄리 현무암 : 이 암석은 제한된 분포 면적임에도 불구하고, 고기 현무암의 존재의 중요성은 매우 크다.



**Fig. 3.** Typical demagnetization results (in situ) for the Jangtanri Basalt (a and b), Tonghyeonri Basalt(c), Basaltic xenolith(d), Acidic Volcanic Rocks (e and f), and Jeongog Basalt (g and h). Solid and open circles represent vector endpoints projected on the horizontal and vertical planes respectively.

편광현미경하에서 이 암석은 5% 미만의 불투명광물을 포함하며, cubic 형태의 자형을 나타낸다. 한편, 휘석 혹은 감람석으로 보이는 가상 광물이 전체 부피의 약 20%를 차지하며, 내부는 심하게 사문석화 되어 있고, 일부 가상물질의 벽개면이나 쪼개짐면의 일부에는 opacite화한 적색 pigment가 발견된다.

Fig. 3a와 3b는 각각 이 암석의 전형적인 단계별 교류소자 및 열소자 거동을 나타낸다. Fig. 3a의 단계별 교류소자 결과, 이 암석의 특성잔류자화는 자철석에 의해 수행되는 것으로 판명되었으며, insitu에서 남서방

향으로 약 30°의 복각을 갖는다. 이 성분은 중앙 파괴장(median destructive field)이 약 30 mT로써 외부 자기장에 대단히 안정한 자철석이 기여하는 것으로 판단된다. Fig. 3b의 단계별 열소자 결과는 저온성분과 고온성분이 공존하며, 450°C 이하에서 저온성분은 완전히 소거된다. 이후 고온성분은 원점을 향하며, 550°C 부근까지도 안정된 방향을 나타내고, 서남향에 중간 크기의 복각을 나타낸다. 본 시료에서 함유된 자성광물의 등온자화에 대한 큐리온도는 약 580°C로써, 주 자성광물의 종류는 Ti의 함량이 적은 비교적 순수한 자

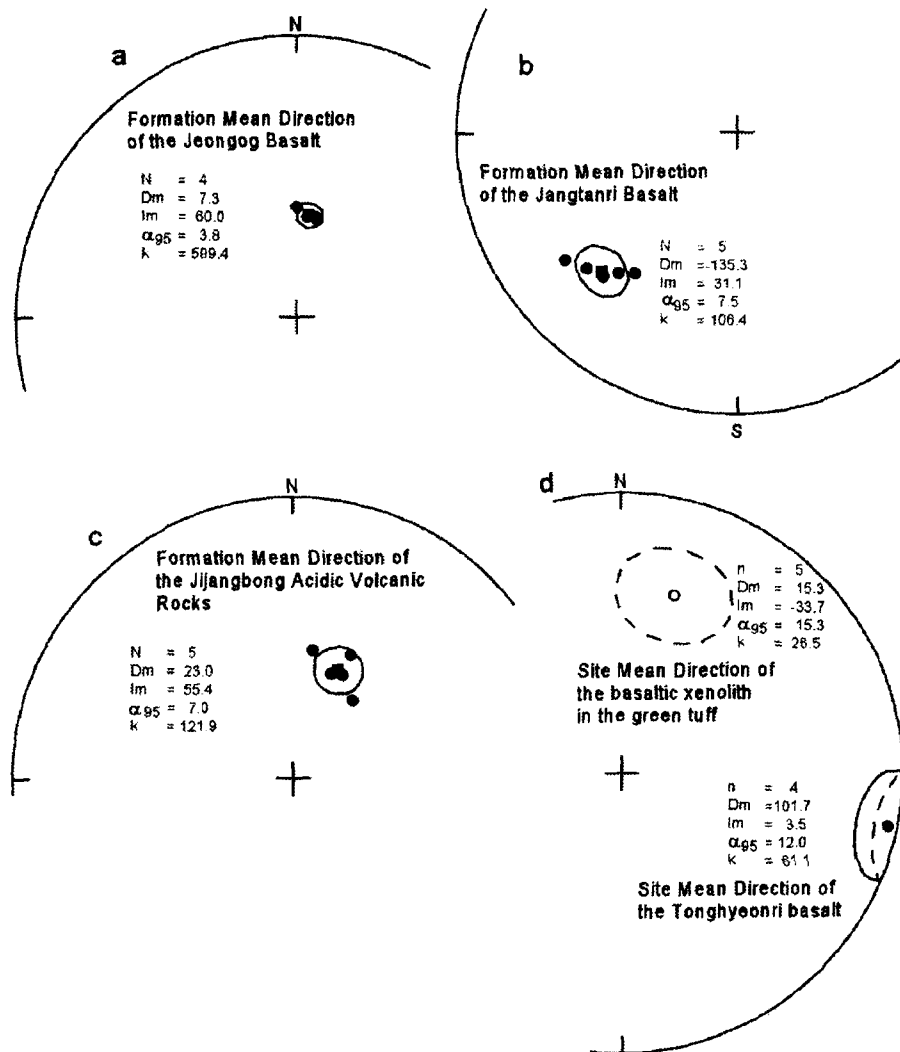


Fig. 4. Equal area diagram for the mean directions of the Jeongog Basalt(a), Jangtanri Basalt(b), Acidic Volcanic Rocks(c), and Tonghyeonri Basalt and basaltic xenolith(d). Solid and open circles are projection on the lower and upper hemispheres respectively.



철석임을 시사하며, 열자기 분석 결과(Fig. 2)와 일치한다. 이처럼 단계별 교류 및 열 소자 실험에서 나타난 고항자력성분과 고온성분의 방향은 단계별 열소자실험(Fig. 3a-b)에서 나타나는 고온성분의 자화방향과 같은 방향을 보인다. 이는 두 자화성분이 자철석으로서 동일한 특성잔류자화임을 지시한다.

이 암석의 나머지 시료에 대하여는, 450, 500, 530°C의 단계별 열소자를 가하여, 고지자기 결과를 구하였다. 이들로부터 주성분 분석법을 사용하여 특성잔류자화 방향을 구하였다. 장탄리 현무암의 5개 장소에 대한 평균방향은 224.7°E/31.1°(95=7.5°, k=106.4)을 나타낸다(Fig. 4b, Table 2).

**통현리 현무암과 현무암질 포획암** : 통현리 남봉고개에서 소규모로 노출되는 통현리 현무암은 육안으로도 풍화를 받아 신선한 시료를 구할 수 없었다. 통현리 현무암에 대한 단계별 교류소자 거동(Fig. 3c)은 20 mT 이후 원점으로 향하는 단일 특성잔류자화 방향을 나타내었으며, in situ에서의 자화방향은 동쪽으로 치우쳐 있으며, 북각이 거의 0°에 가까운 값을 나타낸다. 1 장소 4개 시료로부터 구한 통현리 현무암의 특성잔류자화 방향은 101.7°E/3.5°( $\alpha_{95}=12.0^\circ$ , k=61.1)을 나타낸다(Fig. 4d, Table 2).

한편, 현무암질암은 녹색응회암에 포획된 하나의 암체에서 5개의 시료가 채취되었으며, 대표적 단계별 교류소자 거동을 Fig. 3d에 도시하였다. 이 시료에 포함된 지항자력 성분은 25 mT에서 완전히 제거되었으며, 그 후 원점으로 향하는 단일 특성잔류자화 방향만이 검출되었다. in situ에서의 자화방향은 북북동으로 치우쳐 있으며, 북각이 약 -30°에 가까운 값을 나타낸다. 1 장소 5개 시료로부터 구한 통현리 현무암의 특성잔류자화 방향은 16.8°E/-33.7°( $\alpha_{95}=15.3^\circ$ , k=36.5)를 나타낸다(Fig. 4d, Table 2).

#### (나) 산성화산암류

이 곳의 산성화산암류는 야외에서 신선한 노두를 쉽게 볼 수 있지만, 고지자기 연구에 적절한 시료를 구하는 것은 쉽지 않았다. 대부분의 경우가 잔류자화를 나타내는 자성광물 자체가 너무 적은데다가, 당시의 수평면을 알 수 있는 야외 증거가 찾기 어려웠으며, 유문암질 용암의 흐름구조나 용결응회암의 용결구조가 나타내는 면에 대해서도 초기 지형경사의 영향을 알 수 없어서 당시의 수평면인지를 판단하기 어려웠기 때문이다. 이 연구에서는 흐름구조나 용결구조의 면이 현재 수평(경사각이 5° 이내)이 아니거나 그 연속성이 소규모로 발달되어 있는 것들은 연구에서 제외하였다. 따

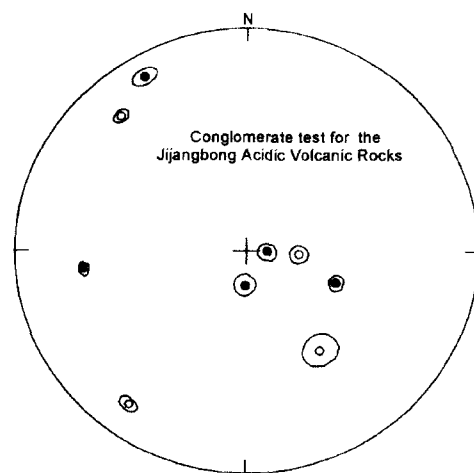
라서, 이 연구에서 구한 방향들에 대해서는 경사보정을 행하지 않았다.

Fig. 3e와 3f는 각각 산성화산암류의 잔류자화에 대한 전형적인 단계별 열소자와 교류소자 거동의 예를 도시한 것이다. 단계별 열소자의 경우(Fig. 3e), 150°C 이후 안정한 단일자화성분만이 검출되었고, 그 후 575°C까지 원점을 향한다. 이로부터 이 시료의 잔류자화를 나타내는 자성광물은 자철석임이 밝혀졌으며, 비교적 안정된 방향을 보여주었다. 이 시료는 흔히 300°C 이후의 단계에서 점성잔류자화가 나타났으며, 측정할 때 많은 시간이 소요되었다. 단계별 교류소자의 경우(Fig. 3f), 단계별 잔류자화 방향이 15 mT 이후 원점을 향하는 안정한 단일자화성분만을 보여주었다.

부분 단계별 열소자(200, 250, 300, 400°C) 및 교류소자(15, 20, 25, 30 mT)를 거쳐 주성분 분석법을 이용하여 구한 8 장소의 평균잔류자화 방향은 Table 2에 표시되었다. 이 중 장소 간(between sites)의 평균잔류자화 방향이 너무 떨어져 나타나거나(Jt7, Jt8), 장소 내(within site)의 잔류자화 값들이 산포되어 나타나는 경우(Jt3)에는 평균잔류자화 계산 시 제외(Table 2에서 장소 번호 뒤에 '\*' 붙임)하였다.

#### (다) 역암 실험

지장봉 화산암복합체에는 명확히 경계를 구분하기 어려운 화산암들이 다양한 상변화를 보이며 소규모로 발달하고 있고, 근작전 지역인 관계로 정밀 지질조사



**Fig. 5.** Equal area diagram for the agglomerate of the Acidic Volcanic Rocks. Solid and open circles are projection on the lower and upper hemispheres, respectively. The directions randomly distributed on the equal diagram indicate the passage of conglomerate test.

에 근본적인 어려움이 있어서 이들의 층서를 구분하는 것은 역부족이었다. 또한 몇몇 곳에서는 광화작용을 받은 노두들도 발견되어, 이 곳 일대의 재자화 작용을 조사하는 일은 긴요한 일이다.

이 연구에서는 연천군 동막리에 대량 노출되어 있는 agglomerate 층에서  $3 \times 10^{-4}$ SI보다 큰 대자율을 갖는 9개의 역들을 선택하여 정향시료를 채취한 후 잔류자화를 측정하였다(Fig. 1, Table 2). Fig. 5는 이들 시료에 20 mT 단계로 교류소자를 실시한 후 in situ에서의 잔류자화의 분포를 등면적도에 도시한 것으로, 각 방향 주위의 작은 원들은 측정 오차(95%)를 나타낸 것이며, 검은(靑) 원은 하(상)반구에 도시된 것이다. 이 역들은 대부분 산성화산암류 기원이며, 다량의 암편을 포함한다. 만일 이들의 방향이 집중되어 나타난다면, 이 일대가 광역적인 재자화작용을 받은 좋은 증거가 될 것이지만, 이 연구에서의 각 역들의 잔류자화 방향들은 모두 흩어져 분포한다. 따라서, 이 곳에서의 역암 실험은 성공(pass)하였고, agglomerate 형성 이후 이 지역에서 광역적인 재자화 작용의 증거는 없다고 할 수 있다.

#### 제4기 전국 현무암

##### (가) 상월리 지역

이 지역 현무암 내에는 용적비가 2~3% 정도의 불투명광물이 포함되어, 그 크기는 100  $\mu\text{m}$  내외이다. 이 크기는 다자구의 자철석임을 지시하지만, 면밀한 반사 현미경 관찰에 의하면, 광물 내의 자철석은 비대칭의 skeleton 구조를 보이며, 그 사이는 일베나이트로 격리되어 있다. 따라서, 비록 겉보기 입자의 크기보다 자구의 크기는 훨씬 작은 1  $\mu\text{m}$ 이하일 것으로 판단된다. Fig. 3g는 측정된 단계별 교류소자도로써, 2.5 mT 이후 단일 자화성분만이 검출된다. 이는 본 암석이 상당히 안정된 특성자화를 갖고 있으며, 2차 요인에 의한 재자화 작용은 없었음을 시사한다. 현미경 분석 결과에서도 본 시료는 열변질 등의 흔적이 발견되지 않아, 1차자화로 판단된다. 단계별 소자실험결과를 근거로 하여, 나머지 7개의 시료들은 모두 10 mT의 교류소자를 적용하였다.

##### (다) 회산리 지역

회산리의 비둘기낭 유원지에서 내려오면서 약 0.5 m 간격으로 시료채취가 이루어졌으며, 수평층을 이루고 있는 제2, 제3 및 제4 용암층으로 구분하여 평균을 취하였다. 본 암은 결정 순서에 따라 세립의 불투명광물, 감람석, 사장석 및 오자이트로 이루어져 있으며, 표층마다 급냉으로 인하여 저온 광물인 오자이트가 채 결

정하기 전에 굳어져 opaque glass를 이루고 있음이 관찰되었다. 이러한 결과는 흔히 야외에서 용암분출층을 구별하기 어려운 지역에서, 보완자료로써 흥미로운 것으로 사료된다.

대부분의 시료에서의 전형적인 단계별 교류소자 결과는 Fig. 3h에 나타내었다. 저항자력 성분은 10 mT 정도의 낮은 소자 level에서 제거되고, 실험과정 등에서 외부자기장에 의해 획득된 점성잔류자화(VRM, Viscous Remanent Magnetization)로 해석되었다. 10 mT 소자 이후 특성자화 성분이 나타나고 원점을 향하는 것으로 미루어, 본 암에는 단일성분만이 남아 있음을 알 수 있으며, 용암 내 함유된 합티탄 자철석이 식으면서 획득한 열잔류자화(TRM, Thermo Remanent Magnetization)로 사료된다. 이 열잔류자화 성분도 저항자력이 그다지 강하지 않으며, 30 mT 이후에는 거의 소자되어 버린다.

### 3.3. 결과 해석

#### 지장봉 화산암복합체

##### (가) 산성화산암

산성화산암 기원의 각력에 대하여 실시한 역암실험 결과는 이 지역의 격심한 화산활동과 열수변질작용에도 불구하고 산성화산암에 1차 특성잔류자화가 존재한다는 것을 시사해 준다. 이 연구에서 총 8개 장소의 산성화산암으로부터 특성잔류자화를 구하였다. 단계별 교류 및 열소자 거동에 근거하여, 이들 특성잔류자화는 모두 자철석에 의한 것으로 판명되었다. 5곳의 장소의 평균 잔류자화방향(site mean direction)은 북북동 방향에 집중되었고, 3곳의 장소의 것들은 이들로부터 산포되는 양상을 보여주었다(Table 2).

산성화산암 노두는 용결(welding)구조나 약한 유동(flowage)구조를 보여주는데, 이는 당시 용암이 흐르거나 쌓였던 고표면을 나타낸다. 본 암은 점성이 크기 때문에, 이 표면 중에는 당시 화산체의 지형 경사나 흐름방향에 영향을 받아 수평면과 일치하지 않는 것들도 있었을 것이며, 이를 야외에서 구별하는 것은 쉽지 않다. 이 연구에서 이들 화산암 시료를 채취할 때 당시의 수평면에 가까웠다고 판단된 노두들만 대상으로 하였음에도 불구하고, 3 장소에서 잔류자화 방향이 산포되었다. 그 원인은 분명치는 않지만, (1) 용결면이나 유동면이 분출 당시의 수평면이 아니었거나, (2) 용암 내의 자철석이 잔류자화를 획득한 후 뒤따르는 용암의 흐름에 의해 교란되었거나, (3) 국부적으로 재자화되었을 가능성 등이 있다.

본 암의 지층평균방향(formation mean direction)을 구할 때에는 5곳의 평균자화방향들만 적용하여 계산하였으며, 그 값은  $23.0^{\circ}\text{E}/55.4^{\circ}(\alpha_{95}=7.0^{\circ}, k=121.9)$ 이었다(Fig. 4c, Table 2), 이는 김광호와 송무영(1995)이 암석으로부터 구한 값( $35.2^{\circ}\text{E}/54.1^{\circ}; 95=6.2^{\circ}$ )과 비교하여 약간의 차이를 보인다. 이 차이는 암층의 평균을 추출하기에 측정 자료의 수가 아직 너무 적기 때문이기도 하지만, 노두에서 당시의 고수평면을 정확히 복원할 수 없다는 본질적인 문제점도 포함한다. 두 연구(21개 장소)에서 구한 본암의 잔류자화방향의 특성은 모두 정자화의 극성을 나타내는데, 이는 본 암의 주요 분출시기가 백악기의 KLNS(Cretaceous Long Normal Superchron; 124-84 Ma)에 속하였을 가능성을 시사하여 준다. 지질개요에서 논한 바와 같이, 하부의 고기현무암류의 K-Ar 전암연대가 90 Ma 전후임을 고려할 때, 산성화산암의 주요 분출시기는 90-84 Ma일 것으로 판단된다. 또한 두 연구에서의 평균잔류자화방향(result mean)들은 김광호와 송무영(1995)이나 경상분지의 동시기의 지층들의 기존 연구들(Kim and Jeong, 1986; 김광호와 김두수, 1991; 도성재 등, 1994; 도성재와 김광호, 1994)로부터 계산한 방향( $22.4^{\circ}\text{E}/53.8^{\circ}; \alpha_{95}=4.2^{\circ}$ )과 일치하거나 매우 유사하다. 이는 산성화산암류가 분출한 이후에 이 암체에 커다란 변형이나 지층의 수평 회전이 없었음을 지지하는 증거이며, 적어도 84 Ma 이후 추가령구조선은 주변 지층 구조에 별다른 영향을 미치지 않았음을 지지하여 준다. 이 연구에서 구한 고지자기극의 위치는  $216.8^{\circ}\text{E}/71.6^{\circ}\text{N}$  ( $dp=7.1, dm=10.0$ )을 나타낸다(Table 3).

#### (나) 고기 현무암류

**장탄리 현무암**: 본 연구 결과는 전 시료에 대하여 단계별 소자실험을 거쳐 검출된 것이기 때문에, 자료 하나하나의 신뢰도 높은 자료임에 틀림없다. 본 암에서 채취한 5개 장소는 커다란 하나의 노두(자살바위)에서 이루어졌으며, 그 평균 방향은 in situ에서  $224.7^{\circ}\text{E}/31.1^{\circ}(95=7.5^{\circ}, k=106.4)$ 로 나타났다(Fig. 4b).

이 특성잔류자화의 기원은 무엇일까? 이에 대한 다음의 증거들은 이 성분에 대한 논리적 해답을 제공한다. (1) 장탄리 현무암이 갖는 특성잔류자화는 명백히 자철석이 식으면서 획득한 열잔류자화이다. 따라서 자화를 획득하는 시기는 아무리 길어야 수년을 넘지 않으며, 그때의 지구자기장을 기록하게 된다. (2) 지구자기장의 영년변화의 범위는, 오늘날 관측 혹은 측정된 수백년의 자료로 볼 때,  $\pm 20^{\circ}$  정도의 범주에서 변화를 보인다. 장탄리 현무암의 특성잔류자화 방향은 백

악기의 한반도의 자화방향과 비교할 때 각거리는 약  $90^{\circ}$  가가우며, 분명히 영년 변화의 범주를 크게 벗어난다. (3) 상기한 전암 연대 측정 결과로 보아 장탄리 안산암은 KLNS 기간내에 형성된 것으로서, 지구자기장 천이기에 획득하였을 가능성도 희박하다. (4) 고기현무암 바로 상위에 놓인 산성화산암류(백악기말)의 잔류자화 방향은 정자화로서 한반도의 후기 백악기의 방향과 일치함을 보인다. 만약 고기현무암의 특성잔류자화 성분이 재자화 기원이라면, 그 시기는 약 84-90 Ma 사이일 것이며, 그 방향도 산성화산암류의 방향과 크게 다르지 않아야 하지만, 약  $90^{\circ}$  가까이 각거리의 차이를 보이는 것은 이 성분은 재자화된 것이 아님을 지시한다. 이로부터 이 연구에서는 장탄리 현무암의 특성잔류자화 성분을 1차자화로 간주하였다.

이 특성잔류자화 방향이 Table 3에 제시한 기존의 연구 결과들(이대성 등, 1983; 김규한 등, 1984)과 유사하지만, 한반도의 동시기의 값과 비교하여 볼 때, 특히 편각에서 심각한 차이를 보이는 것은 동아시아의 구조조 진화적 관점(이운수, 1999a)에서 볼 때, 한반도의 광역적인 방향으로 기대할 수 없으며, 자화 획득 이후 본 지역에 일어난 지질 사건이 있었음을 지지하여 주는 것이다.

고기현무암은 습곡을 받거나(장탄리현무암, 층리면 불확실), 포획체(그외 고기현무암)로 나타나는데, 고기현무암 바로 상위에 놓인 산성화산암류(백악기말)가 그러한 격심한 습곡운동을 받지 않은 것으로 보아, 고기현무암의 습곡시기는 산성화산암류가 분출하기 직전이라고 볼 수 있다. 이에 대해서는 다음과 같은 2가지의 가능성이 제안될 수 있다. (1) 만약 장탄리 현무암이 형성 이래로, 지괴의 회전없이, 한번의 이벤트에 의해 주요 지층 경동을 경험하였다고 가정하면, 장탄리 현무암은 원래 수평을 이루는 상태에서 NNE나 SSW 주향에  $90^{\circ}$  가까운 경사를 하고 있다고 유추할 수 있다. (2) 또 다른 하나는 추가령단층대의 움직임에 의해 반시계방향으로 회전되었을 가능성이 있다. 이것은 중한지괴가 유라시아대륙과 충돌을 일으킨 직후 동아시아에 형성된 남북방향의 압축 응력에 의해 기존의 단층선들이 재활성작용을 하면서 화산작용을 수반하는 소분지들이 형성되었다는 이른바 극동아변동(Lee Y.S. et al., 1997; Lee and Min, 1997; 이운수, 1999aa)의 기작에 의해 설명될 수 있다. 즉, 이 때의 추가령단층계들은 좌수향의 주향이동을 경험하게 되며, 단층 사이에 낀 작은 지괴들이 반시계방향으로 회전한 것으로 해석될 수 있다. 최근 기정석 등(2000)은 의정부-동두천 일

원의 유라기화강암으로부터 추가령단층대의 지구조 발달을 논한 지구물리학 연구 결과에서, 추가령 단층선이 백악기에 좌수향 주향운동을 경험하였음을 규명하였으며, 이를 극동아변동의 영향으로 해석한 바 있다. 본 연구의 해석에서는 두 번째의 가정의 사건과 첫 번째 가정의 사건은 수반되어 나타날 수 있기 때문에 어느 하나를 배제하지 않지만, 추가령 단층 주변 암석의 지질학적 증거는 두 번째의 좌수향에 기인한 지괴회전은 그다지 심각하지 않은 것으로 판단된다. 따라서, 이 연구에서는 주로 첫 번째 사건에 기인하여 장탄리 현무암의 잔류자화가 현재의 방향을 나타내게 되었다고 해석한다.

**통현리 및 백의리 현무암** : 통현리 현무암은 통현리 남봉고개의 두 곳에서 각각 폭 수 m 규모로 주변 응회암 내에 노출된다. 이번 연구와 기존의 연구(이대성 등, 1983; 김규한 등, 1984)에서 보고한 통현리 현무암에 대한 잔류자화 방향은 동쪽 혹은 남동쪽의 편각과 매우 낮은 북각을 나타내며(Table 3), 동 시기의 한반도의 잔류자화 방향과는 커다란 차이를 보인다. 한편 통현리에서 남동쪽으로 약 10 km 떨어진 곳에 노출된 백의리 현무암의 잔류자화방향은 기존의 연구자들(이대성 등, 1983; 김규한 등, 1984)에 의해 남남동의 편각에  $-10\sim-20^\circ$ 의 낮은 음의 북각을 나타내는 것으로 보고되었다. 이 방향 역시 백악기 이래의 한반도의 방향으로 기대할 수 없다.

**고기 현무암의 잔류자화방향의 지구조 해석** : 이상의 연구 결과에서 제시한 것처럼, 장탄리, 통현리 및 백의리에 분포하는 고기 현무암의 in situ 잔류자화방향들은 모두 한반도의 백악기의 방향과 크게 벗어나고 있는데, 이는 앞에 기술한 바와 같이 적어도 이들 암체가 당시의 수평면에서 경사져 있을 가능성을 지시해 주고 있다. 장탄리의 연천댐 부근에서 댐건설 전에 고기 현무암의 노두로 간주되었던 암체들이, 그 후 댐건설 중 바다가 드러난 상태에서 녹색응회암에 포획된 수 m 규모의 포획암 혹은 관입암이었던 것이 확인되었으며, 장탄리의 고기 현무암을 제외한 통현리와 백의리의 고기 현무암들은 녹색응회암에 포획된 암체일 가능성을 배제할 수 없다.

필자 중 이윤수는 김규한 등(1984)에서 고기 현무암의 잔류자화방향들이 지구자기장이 역전하는 천이기(Geomagnetic transition) 동안에 기록된 것으로 해석하였으나, 현 시점에서 이 해석에 큰 오류가 있었음을 인정한다. 그 이유는 (1) 서로 다른 암상조직을 갖는 것으로 보아 이들은 하나의 암체가 아니어서, 이들 여

러 고기 현무암류가 우연이 2000~3000년간의 짧은 지구자기장의 천이기에 이들 모두 형성되었다고 보기에는 무리가 있으며, (2) 이들의 분출 시기( $94\pm 5$  Ma와  $89.5\pm 4.7$  Ma; 이대성 미발표 자료)와 이를 부정합으로 덮고 있는 산성화산암류의 잔류자화의 정자극성 분포를 고려할 때, 그 하부에 놓인 이들 고기 현무암들의 자화 역시 KLNS에 획득되었을 것이며, 이에 가까운 천이기가 존재하는 84 Ma와는 시간적 차이가 있기 때문이다.

이대성 등(1983)은 이들 고기 현무암류들의 자화를 지구자기장의 역자극기에 분출한 것으로 본 바 있으며, 이를 장탄리와 내산리를 잇는 소위 추가령 지구대의 확장축에서 지각이 확장될 때 이들 현무암류가 형성된 것이라고 해석하였다. 이들은 소위 추가령지구대가 대륙 내 확장이 동해형성의 초기 단계에 형성된 aulacogen의 한 failed rift arm일 것으로 제안하였으며, 김광호와 송무영(1995)에 의해 지지되었다. 하지만 최근의 동해 확장에 관한 고지자기 연구(Otofuji and Matsuda, 1983; Lee et al., 1999b) 및 자력탐사 연구(Isejaki, 1986)들에 의하면, 동해는 마이오세에 형성된 것으로 판명되었으며, 이는 추가령 구조선 내의 고기 현무암류가 생성된 90 Ma 전후의 시기와 무관하다는 문제점이 있다. 또한, 그 근거로 사용한 고기 현무암류의 고지자기 방향은 역자극기에 형성되었다고 하였는데, 이들이 제시한 방향 자체가 매우 산포되어 보편적으로 받아들여지기 어렵다. 앞서 논의되었듯이, 에서 따라서 이 연구에서는 추가령 구조선이 동해확장과 관련하여 형성되었다는 견해에는 동의할 수 없으며, 고기 현무암류의 형성을 확장축에 대칭으로 발달된 현무암류라는 견해(이대성 등, 1983)에도 찬성할 수 없다. 다만, 추가령구조선이 동해의 확장 시에 재활성 되었을 가능성은 배제하지 않겠다.

본 역에 있어서, 추가령 단층선의 운동에 대한 또 하나의 중요한 연구관점은 지각변형의 증거가 나타나지 않았던 제4기보다는 단연 백악기의 재활성 단층운동 및 화산활동에 초점이 맞추어 져야 할 것으로 사료된다. 야외조사 결과에서, 중성에서 산성의 화산암류가 복잡하게 산출되는 지장봉 화산암복합체의 연구에 중요성이 확인되었다. 지장봉 화산암복합체에 있어서, 초기에 수회에 걸쳐 녹색 응회암과 현무암이 분출 및 관입되었던 것으로 인지되었으며, 이에 대한 암석학, 지구조학, 고지자기 등의 분야가 연계된 종합적인 연구가 병행되어야 할 것이다.

**Table 3.** Summary of this and previous paleomagnetic results in the Chugaryeong area.

Period	Formation	Site						Paleopole		dp dm <A <sub>95</sub> >		Ref.	
		Long. (°E)	Lat. (°N)	n (<n>)	Dm (°)	Im (°)	α <sub>95</sub> (°)	k	Long. (°E)	Lat. (°N)	(°)		(°)
Q	Jeongog Basalt	127.2	38.1	(4)	7.3	60.0	3.8	599.4	188.5	83.7	4.3	5.7	1
		127.1	38.0	17	7.	59.	1.8	350.3	197.	84.	2.0	2.7	2
		127.3	38.2	(9)	352.3	61.9	4.0	169.5	79.9	82.4	4.8	6.2	3
	result mean			<3>	2.5	60.5	6.8	333.9	145.8	86.2	<10.0>		
	site mean			(14)	357.9	61.3	3.1	162.2	107.5	85.4	3.7	4.8	
K2	Jijangbong	127.1	38.1	(5)	23.0	55.4	7.0	121.9	216.8	71.6	7.1	10.0	1
	Volcanic Complex	127.1	38.1	(16)	35.2	54.1	6.2	39.6	213.2	61.6	6.1	8.7	4
	result mean			<2>	29.2	54.9	15.7	256.9	214.6	66.6	<22.2>		
	site mean			(21)	32.7	54.7	4.6	49.5	213.2	63.7	4.6	6.5	
K2	Jangtanri Basalt	127.1	38.0	(5)	224.7	31.1	7.5	105.4	80.9	-21.0	4.7	8.4	1
		127.1	38.0	4	233.	33.	11.	75.	75.	-15.	7.1	12.5	2
		127.1	38.0	9	232.8	28.6	5.7	83.3	73.5	-17.3	3.4	6.3	3
	result mean			<3>	220.2	30.1	7.1	307.8	76.5	-17.8	<7.2>		
	site mean			(7)	227.1	31.1	5.5	120.5	79.0	-19.6	3.4	6.1	
K2	Tonghyeonri Basalt	127.1	38.1	4	101.7	3.5	12.0	61.1	208.4	-8.1	6.0	12.0	1
		127.1	38.1	6	149.	-11.	35.	5.9	176.	-49.	18.0	35.5	2
		127.1	38.1	(2)	100.8	6.0	28.3	80.2	208.0	-6.6	14.3	28.4	3
	result mean			<3>	116.6	-0.5	46.8	8.0	200.4	-21.5	<46.3>		
site mean			(4)	112.4	1.2	30.3	10.2	202.4	-17.1	15.2	30.3		
K2	Bacuiri Basalt	127.1	38.0	6	158.	-26.	11.	39.	173.	-59.	6.4	11.9	2
	Baeuiri Basalt	127.1	38.0	8	168.7	-14.3	21.9	7.4	148.5	-57.6	11.5	22.4	3
	result mean			<2>	163.6	-20.2	34.2	55.4	160.5	-58.9	<28.4>		
K2	basaltic xenolith	127.1	38.0	5	16.8	-33.7	15.3	26.5	288.4	31.4	9.9	17.4	1

D, I, α<sub>95</sub>, and k denote declination, inclination, 95% cone of confidence, and best estimate of precision parameter. n, number of sample; AFD, alternating demagnetization level applied (unit: mT). ref: 1, this study; 2, Lee *et al.* (1983); 3, Kim *et al.* (1984); 4, Kim and Song (1995)

**제4기 전곡 현무암 :** 이 연구에서는 상월리와 회산리에 분포하는 4개의 용암층에 대하여 각각 평균 값을 계산하였다. 그 평균 편각/복각(95/k)은 제1용암층이 359.7°/57.7°(2.4°/664.8), 제2 용암층이 6.6°/60.7°(1.6°/983.2), 제3 용암층이 12.5°/61.1°(1.8°/355.3), 제4 용암층이 11.2°/60.2°(1.5°/477.1)로써, 매우 높은 집중도를 나타내며, 각 층마다 다른 잔류 자화방향은 본 현무암이 분출할 당시의 영년변화를 반영한 것으로 보인다. 이로부터 구한 가상 고지자기극은 188.4°E/83.6°N를 나타낸다(Table 3). 이 결과를 기존의 자료들과 종합할 때(Table 3), 한반도 제4기의 가상 고지자기극은 134.2°E/86.5°N(A<sub>95</sub>=7.1°)로써 지구회전축을 포함하고 있어, 후기량 단층의 한 단강 인근 지역이 제4기 현무암류의 분출 이후인 13만년 이래로 변형 작용을 받았다는 증거는 나타나지 않았다.

## 4. 토론 및 결론

### 4.1. 후기량 단층선의 생성 기작

한반도는 크게 평북육괴, 경기육괴, 영남육괴의 3개의 선캄브리아기의 지괴로 구성되어 있으며, 이들 사이에 각각 임진대와 옥천대의 습곡대가 끼어 분포한다. Lin *et al.*(1985)은 중국 중앙부를 이루는 북중국판과 남중국판으로부터의 고지자기 이동 경로들을 구하고, 초기 중생대에 이들이 충돌을 일으켰다고 보고하였다. 이와 때를 같이하여 이들 사이의 경계인 Qinling-Dabi대에서 고압변성광물의 존재가 발견되었으며, 동측부에 위치한 탄루단층계를 경계로 Sulu대에서 그 연장부가 확인되었다(Okay and Sengor, 1992).

남중국과 북중국지괴 경계의 동측 연장부가 한반도에 존재하는 것일까? 이에 대한 실마리가 Lee *et al.*(1992, 1997, 1999a)에 의한 고지자기 연구와 Ree

et al.(1995)의 변성암 연구에서 제기되었다. Lee et al.(1992, 1997, 1999a)은 동아시아를 북중국지괴·평북지괴·영남지괴·서남일본으로 이어지는 북중한지괴와 양쯔지괴·경기지괴·히다대로 이어지는 남중한지괴로 구분하면서 초기 전기삼첩기에 있었던 이 두 지괴간의 충돌로 인하여 탄루단층계와 히다-호남전단대가 발생하였다(Yanai et al., 1985)고 하였으며, 추가령 단층을 탄루단층계의 아류라고 해석하였다(이윤수, 1999a).

상기한 지괴들간의 충돌 과정을 통하여, 강력한 전단작용(송림화강암, 송림변동)과 화성활동 및 조산작용(대보화강암, 대보조산운동)이 전 중한지괴에 일어나게 된다. 이로 인해 대륙 내부에 발생하는 주 전단대 사이에는 transtensional force가 작용하게 되고 좁고 깊은 함몰 분지가 형성된다. 한반도의 대동누층군은 이러한 과정을 통하여 형성된 것으로 해석되고 있다. Cluzel et al.(1991)은 암석내에 발달한 구조연구를 통하여, 단양지역에서 WNW-ESE 방향의 transpression 작용이 중기삼첩기에 작용하였고(송림I), 후기삼첩기에는 같은 방향의 transtension 작용이 충남단전의 암석으로부터 발견되었다(송림II)고 보고하였다. 그들은 이어 중기쥬라기의 옥천대는 NW-SE의 압축응력의 환경하(대보I)에 있었으며, 후기쥬라기의 묘곡층에서는 N-S의 transpression을 받았다(대보II)는 해석을 제공하였다. 그들이 조사하여 보고한 삼첩기-쥬라기의 고응력 방향 변이는 그 응력을 발생시킨 기작을 구조조적으로 설명하기에 매우 복잡하고 난해하여, 그 연구 결과는 잊혀져 갔다. 하지만, 그것들은 FR(Folding Ruler)-model의 동아시아 형성기구(Lee et al., 1997, 1999a; 이윤수, 1999b)에 의한 구조조 환경을 대입하면 매우 간명하게 설명된다. 즉, 송림I은 동-북중한지괴(영남육괴+서남일본)가 남중한지괴(양쯔+경기+히다)와 경사 충돌로 동북중한지괴가 시계방향으로 회전하면서 발생한 우수향의 호남-히다전단대가 옥천대 내에서 형성될 수 있고, 송림II는 서-북중한지괴(북중국+평북(양림))가 남중한지괴와의 충돌로 인하여 발생한 좌수향의 탄루단층계와 유사한 방향을 갖는 추가령단층계의 좌수향의 거동에서 형성된 것으로 해석할 수 있으며, 거의 비슷한 시기에 우수향과 좌수향의 거동이 각각 남중한지괴(경기육괴 포함)의 남쪽과 북쪽 경계부에서 일어날 수 있음은 FR-model에서 설명된 바 있다. 또한 대보I은 동-북중한지괴와 남중한지괴의 충돌이 마무리되는 과정으로 동-북중한지괴의 시계방향회전이 끝나고 두 지괴간의 통합되는 시점에서 발생하는 옥천대에 수직하는 방향(NW-SE의 압축응력)이며, 대보II는 탄루단층계

에서 나타나는 고응력 환경이 중기쥬라기에 완전히 연합된 중한지괴에 작용함으로써, 영남육괴 내에 이미 존재하고 있던 NNE-SSW의 단층계에 우수향의 거동을 유발하며, 이 단층계 내에서 만들어지는 N-S transpression 응력이 묘곡층의 습곡구조를 만들었다고 해석될 수 있다.

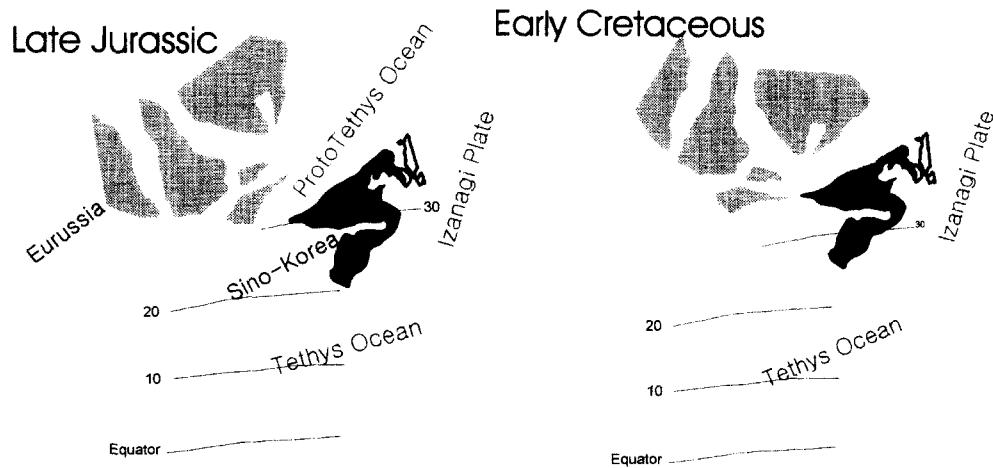
#### 4.2. 추가령구조선의 백악기 재활성 운동

후기 쥬라기 이래로 한반도에서 광역적 규모의 격심한 지구조 운동은 일어나지 않았으며, 이러한 경향은, 마이오세에 일어난 동해의 생성을 제외하면, 중한지괴 전반에 걸쳐 크게 다르지 않다. 이는 중한지괴가 후기 쥬라기에 형성되었다는 FR 모델의 가설에서 명확히 설명된다.

그러면, 오늘날의 모습과 근접한 유라시아대륙은 언제 형성되었을까? 후기 중생대의 동아시아의 고지자기 극들의 분석을 통한 FR 모델(Lee and Min, 1997; Lee et al., 1999a; 이윤수, 1999)은 후기 쥬라기에 완성된 중한지괴가 유라시아(초대륙 로라시아에서 북아메리카 대륙을 제외한 부분) 대륙과 전기 백악기에 충돌하여 후기 백악기 초에 하나로 통합된다는 설을 제안하였다. 이들은 면밀한 고지자기 연구 결과, 중한지괴와 유라시아(Besse and Courtillot, 1991)의 고지자기 극의 이동 경로가 약 1억년 전부터서야 계통적으로 일치한다는 것에 주목하고, 페름기 말에서 삼첩기 초부터 중한지괴(엄밀히는 서-북중한지괴)의 동쪽에서 시작된 반시계 방향의 회전 붕합이 약 1억년 전에 완전히 이루어졌다고 해석했다. 이는 시베리아 지괴 남부와 SKB의 북부 대홍안령 일원에 고생대 말에서 전기 백악기에 해당하는 해양지판의 섭입과 관련된 화산암류의 소멸에 관한 중요한 판구조론적 기구를 제공하여 준다.

한편 이즈음에는 시베리아의 동쪽에서 이동해 온 Kolima, Omolon 지괴들 및 습곡대들이 차례로 충돌 및 부가되어 현재와 비슷한 위치와 규모의 유라시아대륙을 이루었던 것으로 사료된다.

중한지괴(SKB)와 시베리아 지괴와의 접합은 한반도에 어떠한 영향을 미친 것일까? 시베리아 지괴가 속한 로라시아 대륙은 약 1억2천만년전부터 북아메리카 대륙과 유라시아 대륙으로 분리되기 시작하였다(Andrews, 1985). 중앙 해령이 그린랜드 동쪽을 지나 북극해로 이어지면서 유라시아 대륙 전체가 시계 방향으로 크게 회전하게 되며, 이로 인하여 대륙의 동쪽(시베리아) 부분이 남하하고 있었다. 연합된 중한지괴는 백악기에 이르러 유라시아와 충돌하게 되며(Lee et al., 1999a; 이



**Fig. 6.** The paleo-reconstruction map of East Asia in Late Jurassic(left) and Early Cretaceous(right) simulated by the FR model (Lee *et al.*, 1992, 1997, 1999a). The NS stress field are initiated from the collision of the Sino Korean Block to the Eurussian Plate, resulting in sinistral reactivation of the Chugaryeong fault.

윤수, 1999), 이 지질사건으로 한반도에는 남북방향의 응력이 발생한 것으로 해석된다. 북상하던 중한지괴와 남하하던 유러시아 대륙의 접합으로, 이들 경계부에는 지각의 수축과 함께 양쪽 지괴에 그 지질학적인 흔적을 남기고 있다.

Lee *et al.*(1997)과 Lee and Min(1997)은 경상분지에서 구한 특성간류자화의 복각이 현재보다 통계적으로 높다고 지적하고, 이는 한반도가 전기 백악기에는 지금보다도 약 100~200 km 북쪽에 위치하였을 것으로 보았으며, 중한지괴가 약 1억년전에 유러시아 대륙과 완전히 접합을 이룬 직후, 유러시아 대륙에 밀려 남하하였을 것으로 해석하였다(Fig. 6). 백악기 내내 지속된 그들의 접합 과정은 특히 한반도 및 만주 일원에서 남북방향의 압축 응력을 발생시키게 되며, 이로 인하여 중한지괴가 남쪽으로 밀려나면서 주로 기존의 북동에서 북북동방향의 구조선들을 따라 좌수향의 전단운동이 야기되었고 이들의 단층대를 따라 많은 백악기 소분지들이 생성되었다고 보았다. 이러한 남북방향의 압축 응력은 구조 연구에서도 보고되고 있다. 황재하(1994)는 경상분지의 고응력장 해석을 통하여 후기 백악기 동안 작용한 남북방향의 압축 응력장을 보고하고, 이 때 안동 및 일월 thrust의 생성과 관련이 있을 것으로 보았다.

백악기에 있었던 한반도의 남하는 해양지각의 섭입대의 상대적인 위치 및 방향에 변화를 가져오게 되었으며, 당시 왕성했던 해양지각들(이자나기판, 태평양판, 쿨라판)의 이동 및 성쇠에 따른 해저 확장방향의

변동이나 섭입대의 이동 등과 맞물려, 후기 백악기에 화성활동의 변환기를 맞게 되었다. Lee and Min (1997)은 중한지괴와 유러시아 대륙과의 충돌로 기인한 이러한 일련의 변동을 극동아 변동(Far-East Asia Disturbance, 그들은 초기에 고구려변동이라 불렀으나 개명함)이라 명명하였으며, 한반도에 있어서의 불국사 변동도 이에 속하는 것으로 보았다. 이 변동으로 추가령단층과 옥천대의 경계단층부를 따라 좌수향의 재활성 운동이 일어난 것으로 사료되며, 이 때 철원-연천 일원이 함몰되면서 화산활동이 뒤이어 일어나, 지장봉 화산암복합체를 이루게 된 것으로 해석할 수 있다. 이는 이 연구에서의 야외지질조사와 기존의 연구들(Chwae, 1998; 기정석 등, 2000)에서도 인지된다.

#### 4.3. 추가령 단층선의 특성

추가령 단층선은 뚜렷하고 길게 연장된 선상구조로써, 적어도 삼첩기 이래 여러번에 걸쳐서 활동하여 왔으며, 제4기에는 다량의 화산암 분출의 출구의 역할을 하고 있다. 또한 이번 연구에서 (1) 고기 현무암들은 동해의 형성과 무관하고, (2) 중한지괴와 유러시아 대륙과의 충돌로 인해 발생한 남북응력으로 추가령 단층이 좌수향으로 재활성되면서 화산암류들이 분출된 것이며, (3) 고기 현무암류들이 역자극기에 분출한 것이 아니라 포획암으로 확인되었거나 지층의 경동으로 해석되어야 한다는 것이 지적되었다. 이로부터 추가령 구조선의 확장과 관련된 어떠한 증거도 찾을 수 없었다. 추가령 단층선을 따라 연천-철원일원에서 일부 함몰되

면서 백악기 분지가 형성되었음은 분명 인지되지만, 그렇다고 이 단층대 전체를 지구대로 간주할 수는 없었다. 오히려, 본 구조선은 김규한 등(1984)과 Chwae (1998)가 제안한 대로 주향이동 단층선의 특성을 갖는다. 본 구조선에 대하여 조금 더 고찰해보자.

앞절의 추가령구조선의 생성 기작에서 전술하였듯이, FR-model의 관점에서 보면, 추가령구조선은 북중한지괴와 남중한지괴의 충돌과 관련하여 생성된 것으로 사료되며, 두 지괴에 걸쳐 발달한다는 점에서 탄루단층계와 유사한 특성을 갖는다(Lee *et al.*, 1992, 1997, 1999a; 이윤수, 1999). 또한 이를 따라서 삼첩기 말에서 주라기 초의 분지와 백악기 분지들이 분포하고 신생대의 화산활동의 무대가 된다는 점도 구조선의 진화의 측면에서 비슷한 점이 많다. 이러한 점에서 한반도에서 주목해야 할 또 하나의 구조선은 예성강 단층선이다(Fig. 1). 예성강 단층선은 함흥-신계-예성강-강화를 잇는 수조의 단층선이며, 서산까지 연장될 가능성이 많다. 이 단층선을 따라서 삼첩기 말에서 주라기 초의 김포층군과 황해도 급천군과 신계군에 분포하는 백악기 소분지와 제4기 현무암이 분포한다는 점도 유사하다. 이러한 유사성을 감안하여, 우리는 추가령 단층선과 예성강 단층선이 합쳐진 추가령 단층계(Fault System)를 제안하며, 이에 대한 긴밀한 연계성을 밝히기 위한 후속 연구가 절실하다고 판단한다.

한편, 추가령 단층선 등을 따라서 분포하는 백악기의 소분지의 퇴적물 내에 화산암편이 다량 발견되는데 비하여, 대동누층군이 퇴적된 분지들에는 그다지 나타나지 않는 것은 지질학계가 풀어내야 할 앞으로의 숙제이다. 어찌면, 전자의 분지는 천부에서 전단작용이 일어났던 것(brittle shear)에 비하여 후자의 분지는 지각 깊숙이 일어난 전단작용(ductile shear)에 기인하였기 때문일수도 있지만, 이를 단정지을 만한 근거 자료는 없다. 이러한 의미에서 이 두 시기의 분지에 대한 퇴적작용과 진화과정의 비교 연구는 매우 중요하며, 당시의 조구조 환경과 관련하여 재조명되어야 할 것이다.

## 사 사

이 논문을 숙독하여 주시고, 좋은 지적과 의견을 아끼지 않으신 김인수, 도성재 선생님께 깊은 사의를 표하며, 한국학술진흥재단에 의한 박사후 연구비 지원(KRF-96)에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 高橋英太郎 (1962) 추가령열선. Science Reports of Yamaguchi Univ., v. 13, p. 33-36.
- 기정석, 민경덕, 이윤수 (2000) 지구물리학적 방법에 의한 의정부-동두천 일원의 추가령단층대에서의 지구조 연구. 춘계공동학술발표회 논문집, p. 107-108.
- 김광호, 김두수 (1991) 대구-경주 일대에 분포된 채약산층, 건천리층 및 주사산층의 지자기 층서. 지질학회지, 27권, p. 40-51
- 김광호, 송무영 (1995) 한반도 중서부 지각구조와 물성연구 전국-연천일대에 분포하는 백악기 화산암류의 고지자기. 지구과학회지, 16권, p.65-73.
- 김규한, 김옥준, 민경덕, 이윤수 (1984) 추가령지구대의 지질구조, 고지자기 및 암석학적 연구. 광산지질, 17권, 215-230.
- 도성재, 김광호 (1994) 영양지역에 분포하는 백악기 지층에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27권, p. 263-279.
- 도성재, 황창호, 김광호 (1994) 밀양 소분지에 분포하는 백악기 퇴적암류에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 30권, p. 211-228.
- 박계현, 김윤중, 이인성, 박준범, 최만식, 이광식, 정창식, 한정희, 이석훈, 신형선 (1996) 지질 및 해양시료의 미량조성 및 구조분석법 연구(I). 기초과학지원연구소, UCPN00010-025-4, p. 34-37.
- 석동우 (1982) 전국 및 한반도 유역에 분포하는 현무암에 대한 고지자기 연구. 연세대 석사학위논문.
- 원종관, 김윤규, 이문원 (1990) 추가령 알카리 현무암에 대한 지구화학적 연구. 지질학회지, 26권, p. 70-81.
- 이대성, 유기주, 김광호 (1983) 추가령 열곡의 지구조적 해석. 지질학회지, 19권, p. 19-38.
- 이윤수 (1999) 고지자기학 관점에서 본 현생이연의 한반도 주변의 조구조 해석. 연세대학교 환경지질정보센터, 전자논문, 26pp.
- 황재하 (1994) 백악기 초 이후 한반도 남동부에 작용한 고응력 복원. 지질학회지, 30권, p. 27-34.
- 황재하 외 32인 (1999) 한반도 지각변형 연구. 한국자원연구소. KR-99(B)-01-01, 231pp.
- 小藤文次郎 (1903) An orographic sketch of Korea. Jour. coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo, v. 19, Art 1.
- 木野崎吉郎 (1937) 조선의 제4기 화산에 관하여. 조선박물학회지, 22호, p. 3-8.
- Andrews, J.A. (1985) True polar wander: An analysis of Cenozoic and Mesozoic paleomagnetic poles. J. Geophys. Res., v. 90, p. 7737-7750.
- Besse, J. and Courtillot, V. (1991) Revised and synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian Plates, and true polar wander since 200 Ma. J. Geophys. Res., v. 96, p. 4029-4050.
- Chwae, U. (1998) Does the Imjingang Fold Belt cross the mid-Korean Peninsula along the demilitarized zone (DMZ) as an extension of the Sulu Belt, China? J. Earth & Planet. Sci. Nagoya Univ., v. 45, p. 41-73.
- Ciuzel, D.J., Lee, B.-J., Cadet, J.-P. (1991) Indonesian dextral ductile fault system and synkinematic plutonism in the southwest of the Ogcheon belt(south Korea). Tectonophysics, v. 194, p. 131-151.
- Holmes, A. (1965) Principle of Physical Geology. Nelson.
- Jolivet, L., Huchon, P., Brun, J.-P. (1991) Arc deformation



- and marginal basin opening: Japan Sea as a case study. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 4367-4384.
- Kim, K.H., Jeong, B.I. (1986) A study on the paleomagnetism of southern Korea since Permian. *Jour. Korean Inst. Mining. Geol.*, v. 10, No. 1, p. 67-83.
- Kirschvink, J.I. (1980) The least-square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, v. 62, p. 699-718.
- Isejaki, N. (1986) A magnetic anomaly map of the Japan Sea. *J. Geomag. Geoelectr.* v. 38, p. 335-348.
- Lee, J.S. (1989) *Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic volcanics of Seoul, Korea: Geodynamic implication on the east Eurasian margin.* Ph.D. thesis, Orleans University, 349p.
- Lee, K. and Lee, Y.M. (1991) A gravity study of the Chugaryeong Rift Valley (I). *Jour. Geol. Soc. Korea.* v. 27, p. 309-318.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1992) Apparent polar wander path for southern part of the Korean Peninsula. 29th International Geological Congress Meeting, abstr. I-3-23, p.109.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1996) High unblocking temperature haematite magnetizations of Late Paleozoic red beds from the Okcheon zone, southern part of Korean Peninsula. *Geophys. J. Int.*, v. 125, p. 266-284.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1997) Paleomagnetotectonics of East Asia in the Proto-Tethys Ocean. *Tectonophysics*, v. 270, p. 157-166.
- Lee, Y.S. and Min, K.D. (1997) Paleomagnetic constraint of the amalgamation of the Sino-Korean Block to Laurasia. In: *Proceedings for the 4th Korea-China Joint Geology symposium on Crustal Evolution in northeast Asia*, eds by Jang B.-A. and Cheong D., p. 157-166.
- Lee, Y.S., Nishimura, S., and Min, K.D. (1999a) The Phanerozoic apparent polar wander path for the Korean Peninsula and its tectonic implication. In: *Gondwana dispersion and Asian Accretion*, edited by Matcalfe, I., A.A. Balkema Pub., p. 197-209.
- 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*, v. 304, p. 131-149.
- Lin, J., Fuller, M., and Zhang, W.Y. (1985) Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, v. 313, p. 444-449.
- Okay, A.I. and Sengor, A.M.C. (1992) Evidence for intra-continental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology*, 20, 411-414.
- Otofuji, Y. and Matsuda, T. (1983) Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 62, p. 349-359.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., Nakamura, E. (1996) Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea. *Geology*, v. 24, p. 1071-1074.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le dain, A.Y., Amijo, R., Cobbold, P. (1982) Propagating extrusion tectonics in Asia, new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, v. 10, p. 611-616.
- Yanai, S., Park, B.S., Otoh, S. (1985) The Honam Shear Zone (South Korea): Deformation and Tectonic implication in the Far East. *Scient. Pap. College Arts Sci. Univ. Tokyo*, v. 35, p. 181-210.

---

2001년 8월 30일 원고접수, 2001년 12월 19일 게재승인.