

의성지역에 분포하는 백악기 지층에 대한 고지자기 연구

도성재* · 김광호**

A Paleomagnetic Study of Cretaceous Rocks from the Euseong Area

Seong-Jae Doh* and Kwang-Ho Kim**

ABSTRACT: Paleomagnetic and rock-magnetic data of Cretaceous sedimentary and volcanic rocks from the Euseong area indicate that the stable components of remanence are carried by single and pseudo-single domain magnetite, with the exception of the Shinyangdong Formation which has been remagnetized. The Hayang Group, except for the remagnetized Shinyangdong Formation, yields the mean characteristic direction of $D/I=22.5^\circ/57.2^\circ$ ($\alpha_{95}=4.6^\circ$, $N=14$ sites) and the pole position is $72.0^\circ N$, $206.4^\circ E$ ($dp/dm=4.9^\circ/6.7^\circ$). The Yucheon Group shows two polarities and the mean characteristic direction of $D/I=351.2^\circ/60.5^\circ$ ($\alpha_{95}=11.2^\circ$, $N=19$ sites) and the pole position is $81.3^\circ N$, $79.0^\circ E$ ($dp/dm=13.0^\circ/17.0^\circ$). The mean directions of both the Hayang and the Yucheon Groups are supported by the McElhinny's fold test at the 99% confidence level and that of the Yucheon Group by a reversal test at the 95% confidence level. A magnetostratigraphic correlation between polarities of the study formations and the Geomagnetic Time Scale indicates that the Hayang Group can be correlated to the Cretaceous Long Normal Superchron (CLNS), and the Yucheon Group to the boundary between the CLNS and the Polarity Chron 33R or later boundaries between normal and reverse polarities. Comparison of the paleopoles from this study with those from the surrounding areas both within the Gyeongsang basin and in the northeastern Asia indicates that the study area was not undergone significant tectonic rotations with respect to the other parts of the Gyeongsang basin and that the Korean Peninsula was the part of the single terrane of the northeastern Asia at least since the CLNS. The Yucheon Group can be divided into four sub-groups based on the paleomagnetic data, suggesting that there were at least four times of volcanic activities in the study area.

서 언

한반도 동남부의 경상분지에 분포하는 퇴적암류와 화산암류로 구성된 경상누층군은 암상에 따라 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군으로 구성되며 (장기홍, 1975), 이들 지층의 시대는 백악기로 알려져 있다. 이들 중 하양층군이 퇴적되는 동안 일어난 WNW 방향의 단층(팔공산단층과 청송단층)들로 인하여 경상분지가 밀양 소분지, 영양 소분지 및 의성 소분지로 분리되었다 (장기홍, 1975). 세 소분지 중 의성 소분지에 속하는 경상분지 북동부에 위치한 의성 및 화산지역은 백악기 퇴적암, 화산암 및 이들을 관입한 관입암이 분포하고, 화산작용과 관련되어 형성된 칼데라들이 발달되어 있다. 본 지역에 대하여는 층서학, 퇴적학, 암석학, 지화학, 광상학 등 여러 관점에서

서의 연구가 수행되었으나 (e.g., 장기홍, 1975, 1977, 1978; 장기홍 외, 1977, 1981; 박기화, 1986; 김상욱, 1986; 윤성효, 1988; 손진담, 1989; 지세정 외, 1989, 1991), 지층의 퇴적시기에 대하여는 아직도 많은 이견이 있어 지구조 운동에 관한 연구를 위시하여 보다 더 많은 분야의 연구가 수행되어야만 본 지역의 층서, 지질 발달사 등 지질에 관한 종합적인 해석이 이루어 질 것이다.

암석에 기록된 잔류자기의 측정을 통하여 지질시대에 따른 지구 자기장의 변화를 연구하는 고지자기학은 수십년 전부터 세계 각국의 여러 연구자들에 의하여 판구조 운동을 비롯한 층서, 조구조 연구 등 많은 지질 분야 연구에 응용되고 있다. 경상누층군에 대한 고지자기 연구는 여러 연구자들에 의하여 수행되었으나 (e.g., 민경덕 외, 1982; Otofujii et al., 1982, 1986; 김광호와 정봉일, 1986; Lee et al., 1987; 김광호와 김두수, 1991), 이들 연구는 주로 연구지역의 남부인 밀양 소분지에 분포하는 경상누층군을 대상으로 수행되었으며, 연구지역에 대한 고지자기 연구는 제한되어 있어 (김인수 외, 1993) 보다 더 많은

* 고려대학교 지질학과 (Dept. of Geology, Korea Univ., Seoul 136-701, Korea).

** 전북대학교 지구과학교육과 (Dept. of Earth Science Education, Chonbuk Univ., Chonju 560-756, Korea).

연구가 요망된다. 본 연구에서는 의성 소분지의 의성 및 화산 지역에 분포하는 퇴적암 및 화산암에 대한 고지자기 연구를 통하여 지층 형성시기의 고지자기극 위치를 확립하고 지층의 퇴적시기에 관한 정보 및 화산활동에 관한 자료를 제공하고자 한다.

지질개요

의성 소분지에 분포하는 암석들은 층서적으로 하부로부터 백악기 퇴적암인 하양층군, 화산암인 유천층군 및 이들을 관입한 불국사 관입암군들로 구성된다. 하양층군은 하부로부터 상부로 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층, 춘산층, 신양동층으로 세분되며, 이들 퇴적암층을 부정합으로 유천층군이 피복하고 있다 (Fig.1 및 Table 1). 연구지역에는 NW 방향의 주향이동단층인 금천 및 가음단층이 중심부를 가로지르고 있으며, 화산활동 시 형성된 3개의 칼데라 구조가 연구지역의 북서에서 남동 방향으로 발달되어 있다.

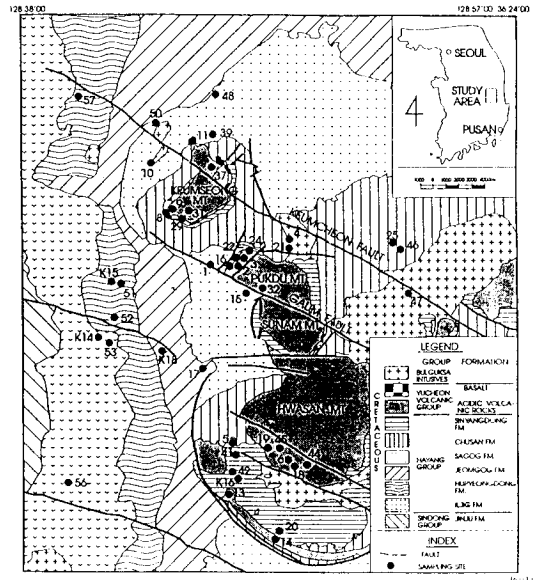


Fig. 1. Geologic map of the Euseong area, showing the location of paleomagnetic sampling sites.

하양층군

일직층

하양층군의 최하부 지층으로 암상에 근거하여 상부, 중부, 하부의 세부분으로 나누어 진다. 하부와 상부에는 적색 실트질 셰일층이 협재됨이 특징이다. 하부층은 층후가 약 130 m로서 주로 사암, 셰일, 역암으로 구성되며, 중부층은 층후가 약 70 m로서 암회색 셰일, 세립질 사암, 석회암으로 이루어져 있다. 상부층은 층후가 약 200 m로서 사암과 셰일이 호층을 이룬다. 지층의 주향과 경사는 약 30~60°/3~15°S를 보여준다.

후평동층

사암, 적색 실트질 셰일, 적색 처트질 역암으로 구성되며, 층후는 약 300 m이다. 역암들은 세립의 염기성과 중성 화산암, 석영맥, 사암, 규암 및 이암 파편 등을 포함한다. 지층의 주향과 경사는 약 0~20°/10~20°E의 방향을 갖는다.

점곡층

회색 사암과 암회색 내지 녹회색 셰일로 구성되며, 중부에 자색 역암층이 협재한다. 약 400 m의 층후를 가지며 연구지역의 북서부에 위치한 탐리 근처에서는 260 m 정도로 얇아지고, 화산 칼데라 부근에서는 호온펠스화 되어 있다. 지층의 주향과 경사는 약 40~70°/5~20°S를 보여

Table 1. Stratigraphic classification of the Euseong area (after Chang, 1975 and 1987; Choi, 1985).

	Bulguksa Intrusives	
	—Intrusion—	
	Yucheon Volcanic Group	
	—Unconformity—	
Gyeongsang Supergroup	Hayang Group	Shinyangdong Formation
		Chunsan Formation
		Sagog Formation
		Jeomgog Formation
		Hupyongdong Formation
		Iljig Formation

준다.

사곡층

퇴적구조 및 암상을 기준으로 상부, 중부, 하부로 구분되며, 층후는 약 2000 m 정도이다. 상부는 적색층의 셰일과 사암으로 이루어지며, 중부는 회색 내지 암회색의 셰일 및 사암으로 구성되어 있다. 하부는 사암이 우세하며, 적색 셰일층을 협재하고 있다. 지층의 주향과 경사는 약 40~100°/30~50°S이다.

춘산층

사암, 셰일 및 역암으로 구성되며, 하부로 갈수록 암색이 암회색, 상부는 적색층이 우세하고 층후는 약 1000 m이다. 본층 기저부에는 구산동 응회암이 나타나며, 지층의 주향

과 경사는 약 $40\sim 50^\circ/10\sim 20^\circ E$ 를 보여준다.

신양동층

층후가 약 140 m로 주로 흑색 내지 암회색 세일로 이루어져 있으며, 간혹 세립질 사암이 협재되기도 한다. 본 층을 구성하는 세일은 층리가 잘 발달되고 있는 것이 특징이며, 지층의 주향과 경사는 약 $30\sim 100^\circ/20\sim 60^\circ S$ 의 방향을 갖는다.

유천층군

하양층군을 부정합으로 피복하고 있는 연구지역의 유천층군은 현무암, 안산암, 유문암 및 응회암으로 구성된다. 금성산 칼데라 지역의 최하부층인 현무암은 신양동층을 약 200 m의 두께로 피복하고 있으며, 응회암은 주로 유문암과 규장암 역으로 이루어져 있고, 상부로 갈수록 세립화하며 유상구조를 보여준다. 지역에 따라 응회암 상부에 유문암이 피복하고 있으며, 응회암질 사암과 교호하기도 한다.

연구지역의 유천층군은 대부분 3개의 칼데라를 중심으로 분포되는데, 그 성분이 본 연구지역 북서부의 금성산으로부터 선암산을 거쳐 남동부의 화산 방향으로 암상의 분포가 염기성암에서 산성암으로 변화되는 것이 관찰되며, 금성산 칼데라 구조를 이루고 있는 암석들 중 염기성인 현무암이 먼저 형성되고 산성인 유문암은 후기에 생성되었다 (박기화, 1986).

불국사 관입암

경상누층군을 관입하는 불국사 관입암 중 연구지역에는 주로 섬록암이 소규모 암주상으로 산출되며, 암체의 주변부에서는 중심부에 비하여 입도가 다소 세립화되는 경향을 보여준다. 본 관입암과 주변 퇴적암류나 화산암류의 접촉부에서는 암석들이 호온펠스화 되어 나타난다. 관입 섬록암체 주변의 퇴적암에는 $300\sim 310^\circ$ 와 $335\sim 350^\circ$ 의 주향을 갖는 암맥들이 도처에 관입하고 있다. 이들 암맥들은 주로 산성암이나, 중성 암맥도 종종 산출된다.

연구방법

고지자기 연구를 위하여 44 sites에서 휴대용 착암기 (Portable, Gasoline-Powered Rock Drill)를 이용하여 착공을 한후, 정향기 (Orienting Device)에 브란톤 컴퍼스 (Brunton Compass) 혹은 태양 컴퍼스 (Sun Compass)를

부착하여 정향시료를 채취하였다. 각 site에서는 가능하면 수직 및 수평의 등간격으로 착공 위치를 선정하였으며, 총 258개의 시료를 채취하여 직경 및 길이가 각각 2.5 cm인 원통형 시편을 얻었다. 시료 채취시 일정한 방향의 착공으로 인하여 발생하는 체계적인 오차 (Systematic Sampling Errors)를 피하기 위하여, 각 site에서 코어 채취시 여러 방향의 착공을 하였다.

모든 시료는 3-Axis Superconducting Cryogenic Magnetometer 및 Spinner Magnetometer를 이용하여 자연 잔류자기를 측정된 후, 대부분의 시료들에 대하여 Schonstedt GSD-1 교류소자기 (AC Demagnetizer) 및 Schonstedt TSD-1 열소자기 (Thermal Demagnetizer)를 이용하여 교류소자 및 열소자 실험을 수행하였다. 교류소자 실험은 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 60, 80, 100 mT의 단계별 교류자기장 강도에서 수행하였으며, 열소자 실험은 $100^\circ C$ 부터 $50^\circ C$ 혹은 $20^\circ C$ 의 간격으로 최대 $680^\circ C$ 까지 단계적으로 수행하였다. 소자실험 결과는 벡터 다이어그램 (Zijderveld, 1967)을 통하여 잔류자화가 일정한 방향으로 원점을 향하여 감소되는지를 검토한 후 Principal Component Analysis (PCA, Kirschvink, 1980)를 적용시켜 특성 잔류자화 성분을 추출하였다. PCA 수행시 마지막 소자 단계에서는 잔류자화 강도가 매우 낮아 측정된 잔류자화의 Noise 비율이 높아지므로, PCA Line을 원점 (Origin)에 연결하였다.

단계별 소자실험을 수행하지 않은 일부 잔여시료들에 대하여는 소자실험 결과에 따라 결정한 2차 잔류자화를 제거할 수 있는 적어도 3단계 이상의 최적 소자단계를 적용시켜 소자시킨 후, PCA를 이용하여 각 시료의 특성 잔류자화를 추출하였다. 측정된 자료는 Fisher 통계법 (Fisher, 1953)을 이용하여 자료 처리를 하였다. 소자실험 및 잔류자화 측정을 포함한 모든 실험은 지구 자기장과 같은 외부 자기장으로부터 차단된 Magnetically Shielded Room (내부의 평균 자기장 = 50 nT 이하)에서 수행하였으며, 실험시 모든 시료는 Mu-Metal 상자에 항상 보관하였다. 열소자시에는 각 소자단계 별로 시료의 방향을 바꾸어 소자과정에서 발생하기 쉬운 부수적인 재자화 (Systematic Parasitic Remagnetization)의 획득을 방지하였다.

고지자기 측정을 마친 시료들을 대상으로 최대 1 T까지의 단계별 자기장을 이용하여 등온잔류자화 (Isothermal Remanent Magnetization) 획득실험 및 잔류자기력 (Coercivity of Remanence) 측정을 한 후, 각 시료의 연마편을 제작하여 광석 현미경 관찰을 통하여 잔류자화를 기록하고 있는 자성광물을 규명하였다.

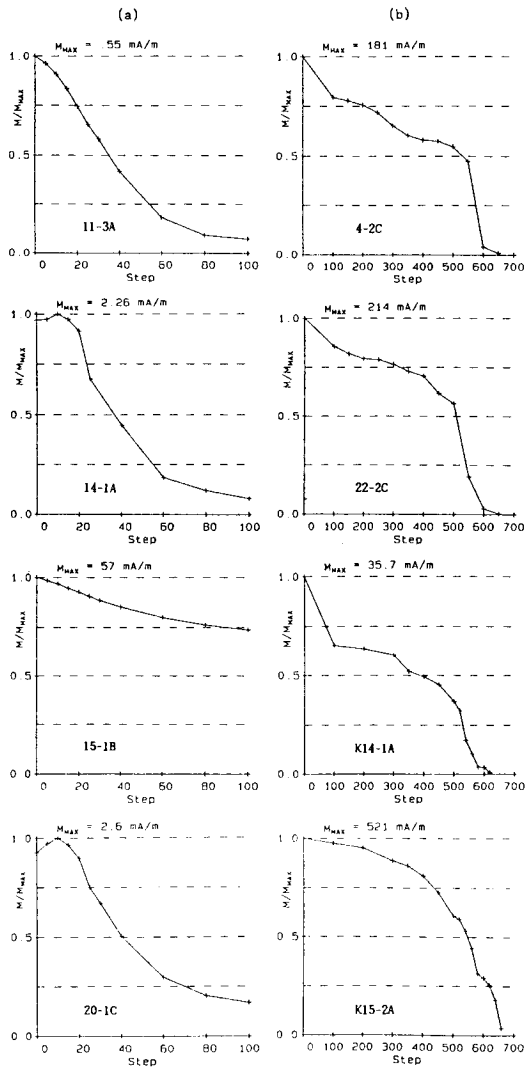


Fig. 2. Typical demagnetization curves of some samples. Relative intensity is plotted versus a) the peak alternating field (unit of steps: mT) and b) the temperature (unit of steps: °C).

결 과

고지자기 연구

암석시료의 자연잔류자화 강도는 퇴적암이 0.05~550 mA/m, 화산암은 0.05~9806 mA/m, 관입암은 0.40~1465 mA/m를 갖는다. 시료들의 대표적인 교류소자 및 열소자 실험 결과는 잔류자화 강도의 변화와 (Fig. 2) 벡터 다이어그램 (Figs. 3~4) 상에 나타내었다. 교류자기장에 대한

잔류자화의 Median Destructive Fields는 퇴적암이 30~>100 mT, 화산암은 20~50 mT, 관입암은 20~30 mT를 보여주어 비교적 안정된 잔류자화를 보유하고 있으며 (Fig. 2a), 일부 퇴적암의 경우는 교류 자기장에 의하여 효과적으로 소자가 되지 않음을 보여준다 (Fig. 2a, 시료 15-1B). 열소자에 따른 잔류자화 강도의 변화는 대부분의 시료들이 550~600°C의 소자단계에서 잔류자화의 급격한 감소를 보여 잔류자화를 기록하는 자성광물이 주로 자철석임을 지지하나 (Fig. 2b, 시료 4-2C, 22-2C 및 K14-1A), 일부 퇴적암 시료들은 550~600°C와 640°C 이상에서 잔류자화의 감소를 보여 자성광물로 자철석과 적철석이 모두 존재함을 제시한다 (Fig. 2b, 시료 K15-2A).

잔류자화 방향은 대부분의 시료들이 비교적 쉽게 인지할 수 있는 2 성분을 보여주고 있다 (Figs. 3 및 4). 화성암의 경우, 이들 성분중 2차 자화성분 (혹은 점성잔류자화)으로 사료되는 성분은 10~15 mT 내외의 비교적 낮은 교류소자 단계 (Fig. 3, 시료 11-3A, 16-2A 및 19-1B) 혹은 150~250°C 내외의 낮은 열소자 단계에서 제거되며 (Fig. 4, 시료 4-2C, 16-2B 및 22-2C), 소자단계의 증가에 따라 방향이 벡터 다이어그램 상에서 원점으로 향하는 자기적으로 안정된 단일성분의 특성잔류자화 방향을 보여준다. 이에 비하여 일부 퇴적암의 경우는 2차 자화성분을 제거하기 위하여 화성암에 비하여 높은 소자단계가 요구되거나, 교류소자가 적합하지 않고 열소자를 적용하여야 2차 잔류자화가 효과적으로 제거되는 경우도 있다 (Fig. 3, 시료 15-1B).

하양층군

하양층군의 고지자기 측정결과는 Table 2에 요약하였으며, 각 층에 대한 고지자기 결과는 다음과 같다.

4 sites에서 채취한 일직층의 모든 시료들은 정자화방향의 잔류자화를 기록하고 있으나, site 56의 경사보정 전 방향 (D/I=355.9°/58.3°, $\alpha_{95}=10.1^\circ$)이 연구지역의 현재 지구자기장 혹은 최근의 쌍극자기장 방향과 유사하여 이를 제외한 나머지 3 sites의 경사보정 (Tilt Correction 혹은 Bedding Correction) 전의 평균방향은 D/I=13.8°/55.0° ($\alpha_{95}=21.9^\circ$, k=32.7)이며, 보정 후의 평균방향은 D/I=23.4°/57.4° ($\alpha_{95}=18.9^\circ$, k=43.5)로 보정 전보다 방향의 분산도가 약간 감소한다 (Fig. 5).

후평동층의 3 sites에서 채취한 시료들의 경사보정 전 평균방향은 D/I=19.2°/56.9° ($\alpha_{95}=15.0^\circ$, k=68.6)이나 보정 후의 평균방향은 D/I=29.2°/56.2° ($\alpha_{95}=9.0^\circ$, k=187.7)로 보정 전에 비하여 분산도가 감소한다 (Fig. 5).

3 sites에서 채취한 점곡층은 경사보정 전 평균방향은

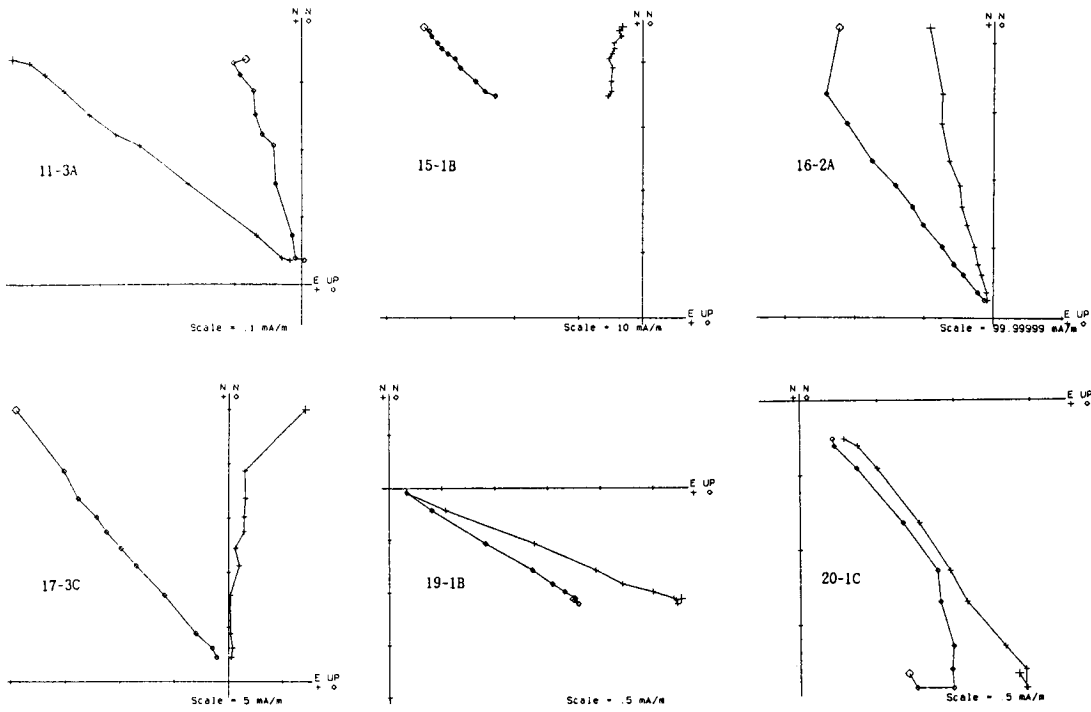


Fig. 3. Typical vector diagrams of AF demagnetization of some samples (demagnetization steps are up to 100 mT).

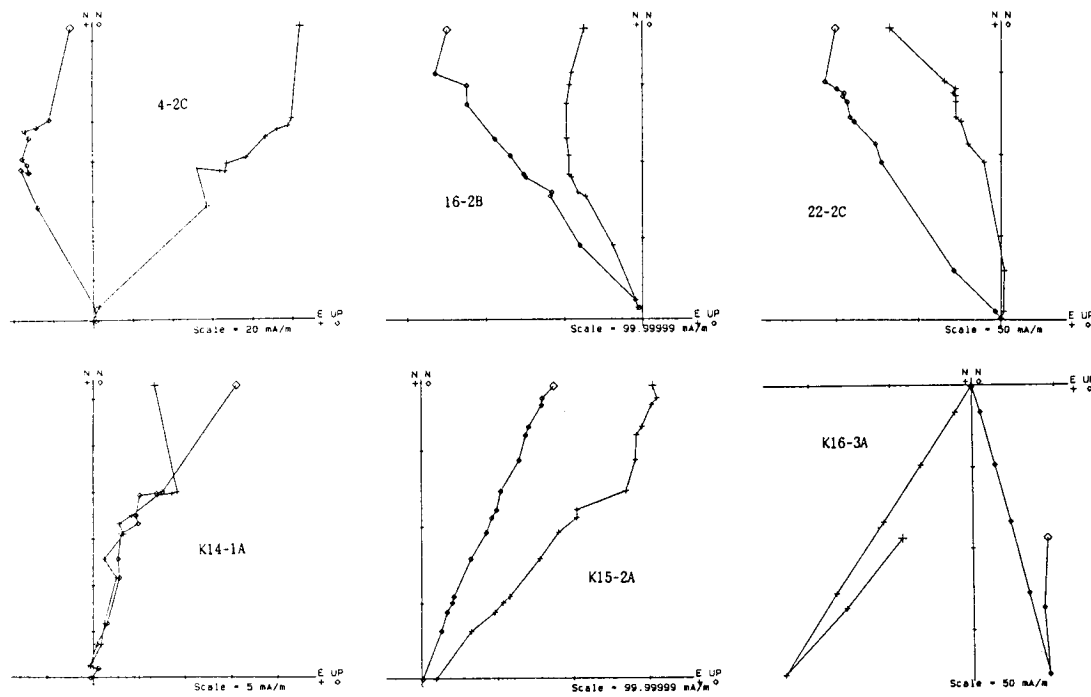


Fig. 4. Typical vector diagrams of thermal demagnetization of some samples (demagnetization steps are up to 680°C).

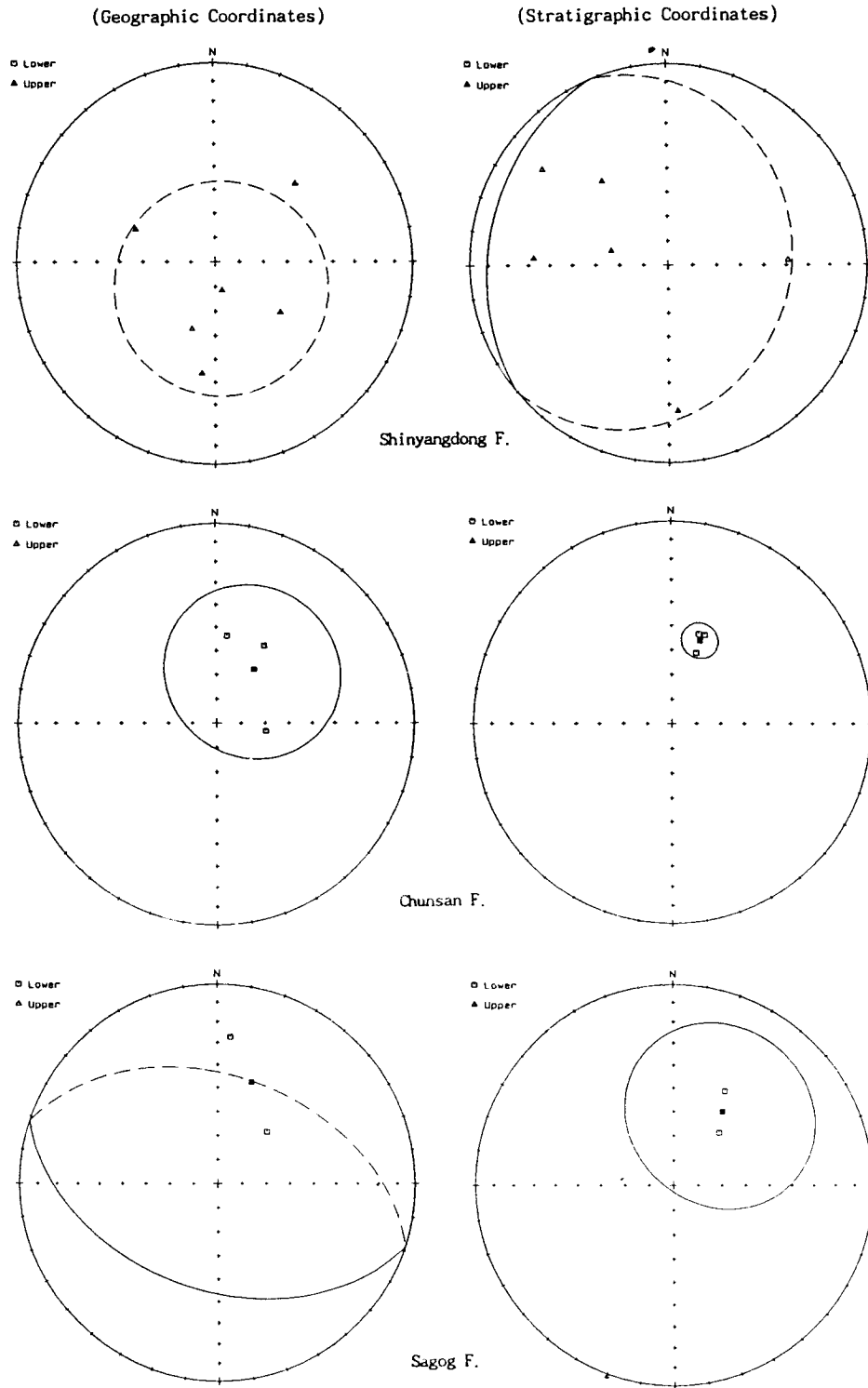


Fig. 5. Site-mean directions (open symbols) and formation-mean direction (solid symbols) with 95% confidence circle for each formation of the Hayang Group in geographic coordinates (left) and in stratigraphic coordinates (right).

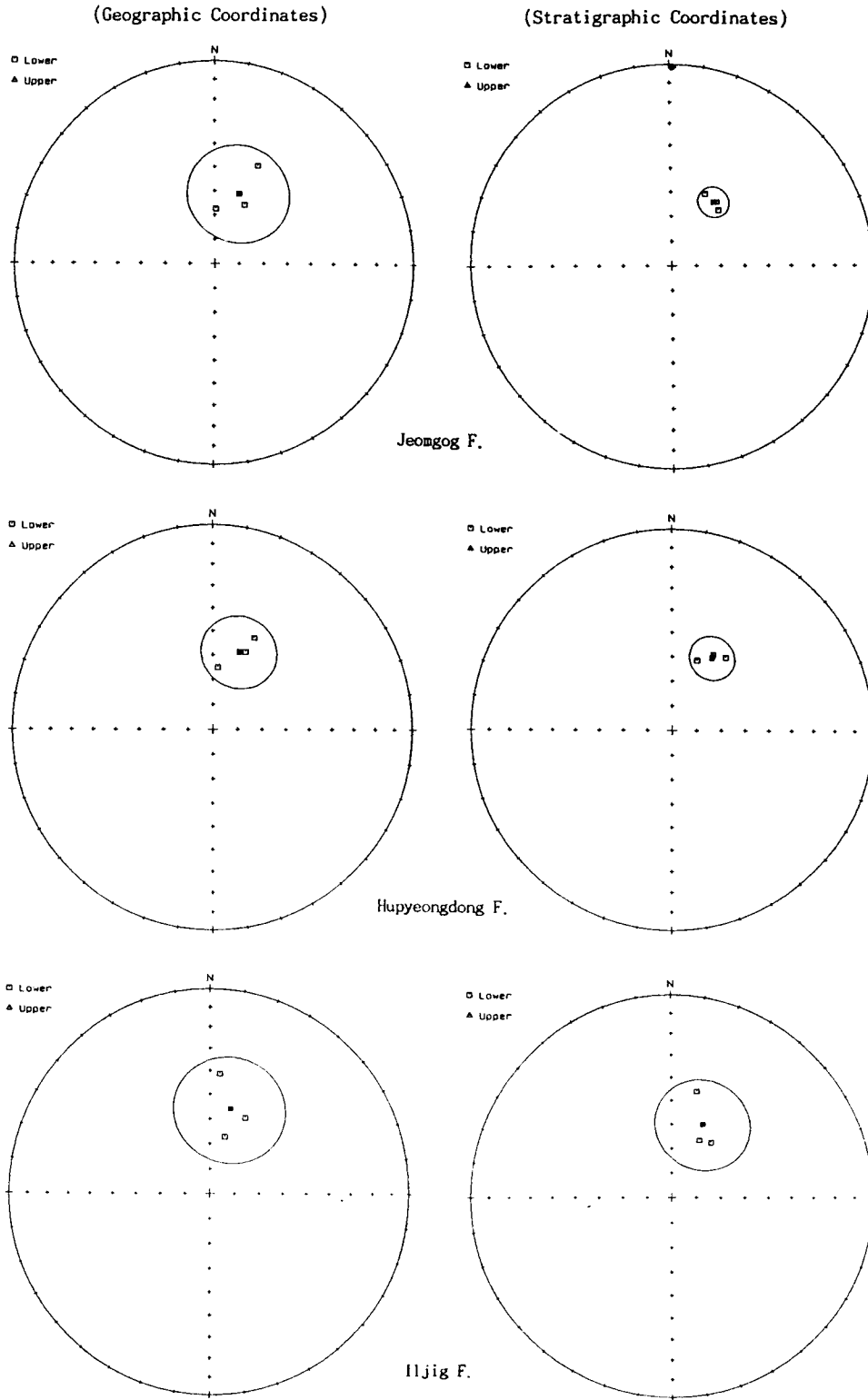


Fig. 5. Continued.

$D/I=19.3^\circ/59.5^\circ$ ($\alpha_{95}=20.4^\circ$, $k=37.5$)이나 보정 후의 평균방향은 $D/I=34.2^\circ/58.8^\circ$ ($\alpha_{95}=6.3^\circ$, $k=386.2$)로 보정 전에 비하여 분산도가 감소한다 (Fig. 5).

사곡층은 4 sites에서 시료들을 채취하였으나 sites 39 및 10의 경사보정 전 방향 (site 39: $D/I=346.8^\circ/15.7^\circ$, $\alpha_{95}=43.5^\circ$; site 10: $D/I=338.3^\circ/36.8^\circ$, $\alpha_{95}=3.1^\circ$)이 연구지역의 현재 지구자기장 혹은 최근의 쌍극자기장 방향과 유사하여 이들을 제외한 2 sites의 경사보정 전 평균방향은 $D/I=18.7^\circ/45.2^\circ$ ($\alpha_{95}>90^\circ$, $k=7.5$)이나, 보정 후는 $D/I=34.2^\circ/53.6^\circ$ ($\alpha_{95}=38.8^\circ$, $k=43.5$)로, 분산도가 보정 전에 비하여 감소한다 (Fig. 5).

3 sites에서 채취한 춘산층의 경사보정 전 평균방향은 $D/I=35.2^\circ/62.9^\circ$ ($\alpha_{95}=36.5^\circ$, $k=12.5$)이며, 보정 후의 방향은 $D/I=19.1^\circ/54.3^\circ$ ($\alpha_{95}=7.3^\circ$, $k=288.9$)로 보정 전의 방향보다 분산도가 감소한다 (Fig. 5).

신양동층은 5 sites에서 채취한 시료들 모두가 역전을 기록하고 있으나, 각 site간의 방향 차이가 크다. 경사보정 전의 평균방향은 $D/I=166.7^\circ/-78.3^\circ$ ($\alpha_{95}=44.9^\circ$, $k=3.9$)로 보정 후의 방향인 $D/I=284.1^\circ/-65.9^\circ$ ($\alpha_{95}=76.0^\circ$, $k=2.0$)에 비하여 분산도가 감소하여 (Fig. 5), 잔류자화가 지층경사 후에 획득된 것임을 제시한다. 본 신양동층의 시료채취 지역 주변은 유천층군의 역자화를 보여주는 암석이 분포하고 있어 유천층군의 분출 혹은 관입시 재자화를 받은 것으로 사료된다. 신양동층과 지층 경사보정 전의 방향이 연구지역의 현재 지구자기장 혹은 최근의 쌍극자기장 방향과 유사한 일부 sites를 제외한 하양층군의 14 sites에서 계산한 경사보정 후의 평균방향은 $D/I=22.5^\circ/57.2^\circ$ ($\alpha_{95}=4.6^\circ$, $k=66.1$)이며 $k_2/k_1=3.1$ 로 McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과하고, 이로부터 구한 자극의 위치는 72.0°N , 206.4°E ($dp/dm=4.9^\circ/6.7^\circ$)이다 (Table 2).

유천층군

특성잔류자화의 방향에 따라 4개의 소그룹 (A, B, C 및 D)으로 분류가 된다 (Table 3). 유천층군의 지층경사보정은 화산암체에서 관찰되는 층상구조를 이용하여 화산암 분출 후 수평으로 쌓였다는 가정하에서 실시하였으며, 층상구조가 관찰되지 않는 화산암 노두의 경우는 층상구조가 관찰되는 인접 화산암이나 퇴적암층의 층리방향을 이용하였다.

소그룹 A는 유천층군 초기에 분출된 것으로 알려진 염기성 화산암인 금성산 및 북두산 주변의 현무암으로, 6 sites의 평균 특성잔류자화 방향은 경사보정 전에는 $D/I=227.0^\circ/66.4^\circ$ ($\alpha_{95}=57.8^\circ$, $k=2.3$)이며 경사보정 후는

$D/I=348.5^\circ/53.2^\circ$ ($\alpha_{95}=11.5^\circ$, $k=34.9$)으로, $k_2/k_1=15.2$ 로 McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과한다 (Fig. 6).

소그룹 B는 층서적으로 소그룹 A의 상부에 위치하는 유문암과 안산암질 응회암으로 4 sites의 평균 특성잔류자화 방향이 경사보정 전에는 $D/I=155.4^\circ/37.6^\circ$ ($\alpha_{95}=49.6^\circ$, $k=4.4$)이며 경사보정 후에는 $D/I=70.6^\circ/63.7^\circ$ ($\alpha_{95}=9.7^\circ$, $k=90.9$)으로, $k_2/k_1=20.7$ 로 McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과한다 (Fig. 6).

금성산 북부지역에 분포하고 소그룹 B 보다 층서적으로 상부에 위치하고 있는 소그룹 C는 응회암으로 노두 발달이 불량하거나 풍화가 심하여 단지 2 sites에서만 시료를 채취하였으나, 이들의 평균 특성잔류자화 방향은 경사보정 전이 $D/I=218.8^\circ/69.5^\circ$ ($\alpha_{95}>90^\circ$, $k=0.8$)이고 경사보정 후는 $D/I=272.4^\circ/53.2^\circ$ ($\alpha_{95}=26.4^\circ$, $k=91.7$)로, $k_2/k_1=114.6$ 으로 McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과한다 (Fig. 6).

연구지역의 남단에 위치한 화산지역에 분포하는 결정질 응회암에서 채취한 소그룹 D에 속하는 시료는 모두 역자화를 기록하고 있다. 7 sites의 경사보정 전 평균 특성잔류자화 방향은 $D/I=115.4^\circ/-79.5^\circ$ ($\alpha_{95}=41.9^\circ$, $k=3.0$)이며 경사보정 후는 $D/I=166.0^\circ/-49.7^\circ$ ($\alpha_{95}=11.6^\circ$, $k=27.9$)로, $k_2/k_1=9.3$ 으로 McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과한다 (Fig. 6).

역자화를 기록하는 소그룹 D의 평균 자화방향의 반대 방향(Antipodal Direction)과 정자화를 기록하는 소그룹 A, B 및 C에 속하는 12 sites의 평균 자화방향 ($D/I=356.8^\circ/67.5^\circ$, $\alpha_{95}=16.2^\circ$, $k=8.2$)을 비교하면, 두 방향이 서로의 α_{95} 원 내에는 포함되지 않으나 두 방향의 α_{95} 원이 상호 겹친다 (Fig. 7). 두 방향의 F 값은 2.52로 통계학적으로 95%의 신뢰도 범위 내에서 두 방향이 서로 동일함을 나타낸다. 그러므로, 두 방향은 통계학적으로 95% 신뢰도를 가지며 역전시험을 통과한다.

유천층군의 19 sites에서 계산한 평균방향은 $D/I=351.2^\circ/60.5^\circ$ ($\alpha_{95}=11.2^\circ$, $k=10.0$)이며, $k_2/k_1=8.3$ 으로 McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과하고, 이로부터 구한 자극의 위치는 81.3°N , 79.0°E ($dp/dm=13.0^\circ/17.0^\circ$)이다 (Table 3).

불국사 관입암

연구지역에 분포하는 불국사 관입암에서는 3 sites에서 시료를 채취하였으며 이들 관입암체의 경사를 알 수 없어 경사보정은 할 수 없으나, 이들의 평균 특성잔류자화 방향은 $D/I=353.6^\circ/38.8^\circ$ ($\alpha_{95}=18.9^\circ$, $k=43.6$)이다 (Fig. 8

Table 2. Paleomagnetic results of the Hayang Group.

Formation	Site	N/N ₀	Dg	Ig	Ds	Is	α_{95}	k	
Shinyangdong	5*	2/3	199.7	-61.2	273.0	-32.5	48.8	28.3	
	20*	6/8	127.2	-56.0	87.5	-39.2	8.2	88.5	
	41*	1/2	46.0	-42.5	321.9	-45.8			
	42*	3/3	187.0	-43.5	176.5	-26.9	5.3	546.8	
	K16*	3/3	292.2	-54.3	307.2	-22.2	0.9	19737.9	
	Mean	5 5		166.7	-78.3		44.9	3.9	
Chunsan	15	3/5	99.2	69.5	17.1	51.9	5.9	437.2	
	25	2/2	7.1	53.5	19.3	59.6	5.6	2002.5	
	46	7/9	31.9	52.0	20.9	51.3	8.0	58.0	
	Mean	3 3		35.2	62.9		36.5	12.5	
						19.1	54.3	7.3	288.9
Sagog	39*	2/3	346.8	15.7	327.1	42.8	43.5	35.1	
	10*	4/5	338.3	36.8	1.8	59.3	3.1	873.1	
	50	2/2	5.1	27.1	41.4	61.4	18.1	192.5	
	1	1/2	43.5	60.2	29.3	45.5			
	Mean	2 2		18.7	45.2		>90	7.5	
Jeomgog	17	6/6	1.2	67.5	25.8	57.6	3.7	334.9	
	48	14/16	24.2	45.6	41.0	60.3	1.9	464.0	
	K18	4/4	27.0	63.0	36.0	58.0	5.2	312.8	
	Mean	3 3		19.3	59.5		20.4	37.5	
						34.2	58.8	6.3	386.2
Hupyeongdong	51	7/7	24.9	49.0	36.8	52.8	5.6	116.9	
	52	9/9	4.5	64.9	19.8	59.8	1.9	725.5	
	K15	3/5	23.2	56.0	28.9	54.7	3.9	987.9	
	Mean	3 3		19.2	56.9		15.0	68.6	
Iljig	53	8/8	25.4	56.4	35.9	62.3	2.6	464.5	
	56*	5/5	355.9	58.3	357.9	60.8	10.1	58.1	
	57	11/11	4.8	41.2	13.6	44.8	12.0	15.4	
	K14	2/3	14.9	66.5	26.0	64.0	7.2	1217.7	
	Mean	3 3		13.8	55.0		21.9	32.7	
					23.4	57.4	18.9	43.5	
	Mean	14 14		13.6	56.4		8.1	21.5	
					22.5	57.2	4.6	66.1	

Pole: 72.0°N, 206.4°E (dp/dm=4.9°/6.7°)

For each formation, the sites are listed in approximate stratigraphic order (top of list are the youngest). N/N₀; Number of specimens accepted/Number of specimens demagnetized. Dg and Ig; Declination and inclination in geographic coordinates. Ds and Is; Declination and inclination in stratigraphic coordinates. α_{95} ; Cone of confidence about mean direction. k; Precision parameter (Fisher, 1953). *; Site mean omitted in calculation of the mean (see text for explanation).

Table 3. Paleomagnetic results of the Yucheon Group.

Sub-Group	Site	N/N ₀	Dg	Ig	Ds	Is	α_{95}	k
D	6	4/4	151.0	-56.9	174.2	-44.7	10.9	71.5
	13	7/8	325.7	-72.4	184.5	-53.0	4.8	156.2
	14	6/7	165.7	-46.1	137.8	-49.2	4.6	217.4
	18	8/8	160.1	-55.7	179.5	-41.3	4.8	132.7
	19	8/8	41.4	-7.4	186.3	-44.1	6.2	80.7
	44	1/1	342.6	-36.2	158.6	-58.5		
	45	2/2	185.2	-61.3	139.3	-41.3	1.9	18001.3
Mean	7		115.4	-79.5			41.9	3.0
	7				166.0	-49.1	11.6	27.9
C	11	19/24	24.0	44.1	270.2	47.4	5.1	44.9
	37	1/1	208.2	3.9	275.2	59.0		
	Mean	2	218.8	69.5			>90	0.8
		2			272.4	53.2	26.4	91.7
B	2	3/4	156.0	49.9	77.0	60.2	9.4	173.3
	3	2/5	153.3	-6.1	67.8	53.9	25.7	96.7
	24	1/1	161.9	21.7	73.9	71.9		
	31	1/1	108.1	84.1	63.7	68.3		
	Mean	4	155.4	37.6			49.6	4.4
	4			70.6	63.7	9.7	90.9	
A	8	2/3	336.0	25.5	351.7	41.6	22.6	123.8
	9	2/3	168.7	13.3	326.8	49.7	44.3	33.9
	16	4/8	205.1	50.9	341.9	63.1	9.3	99.2
	22	7/9	205.1	52.4	341.4	67.2	5.3	130.0
	29	4/7	342.2	29.9	1.0	40.4	7.4	156.2
	32	2/2	193.8	50.8	1.3	53.5	4.1	3819.9
Mean	6		227.0	66.4			57.8	2.3
	6				348.5	53.2	11.5	34.9
A+B+C	Mean	12	183.2	59.8			37.2	2.3
		12			356.8	67.5	16.2	8.2
Mean	19		171.2	18.3			67.4	1.2
	19				351.2	60.5	11.2	10.0

Pole: 81.3°N, 79.0°E (dp/dm=13.0°/17.0°)

N/N₀; Number of specimens accepted/Number of specimens demagnetized. Dg and Ig; Declination and inclination in geographic coordinates. Ds and Is; Declination and inclination in stratigraphic coordinates. α_{95} ; Cone of confidence about mean direction. k; Precision parameter (Fisher, 1953).

및 Table 4). 하양층군과 유천층군의 지층경사보정 전의 특성잔류자화의 방향은 불국사 관입암의 방향과 차이를 보여, 이들 층군들이 불국사 관입암에 의해 잔류자화에 영향을 받지 않음은 일종의 접촉변질시험 (Baked Contact Test)을 통과함을 의미한다.

암석자기 연구

Fig. 9는 대표시료들의 등온잔류자화 획득실험 (Isothermal Remanent Magnetization Acquisition Experiments) 결과를 나타낸 것이다. 대부분의 화산암 시료들은 비교적 낮은 자기장 (0.1~0.2 T)에서 자기적 포화상태에 도달하고, 단계별 열소자 시 550~600°C의 소자단계에서 잔류자화 강도의 급격한 감소가 관찰된다 (Fig. 2b). 이러한 결과는 시료에 함유된 잔류자화를 기록하는 주 자성광물이

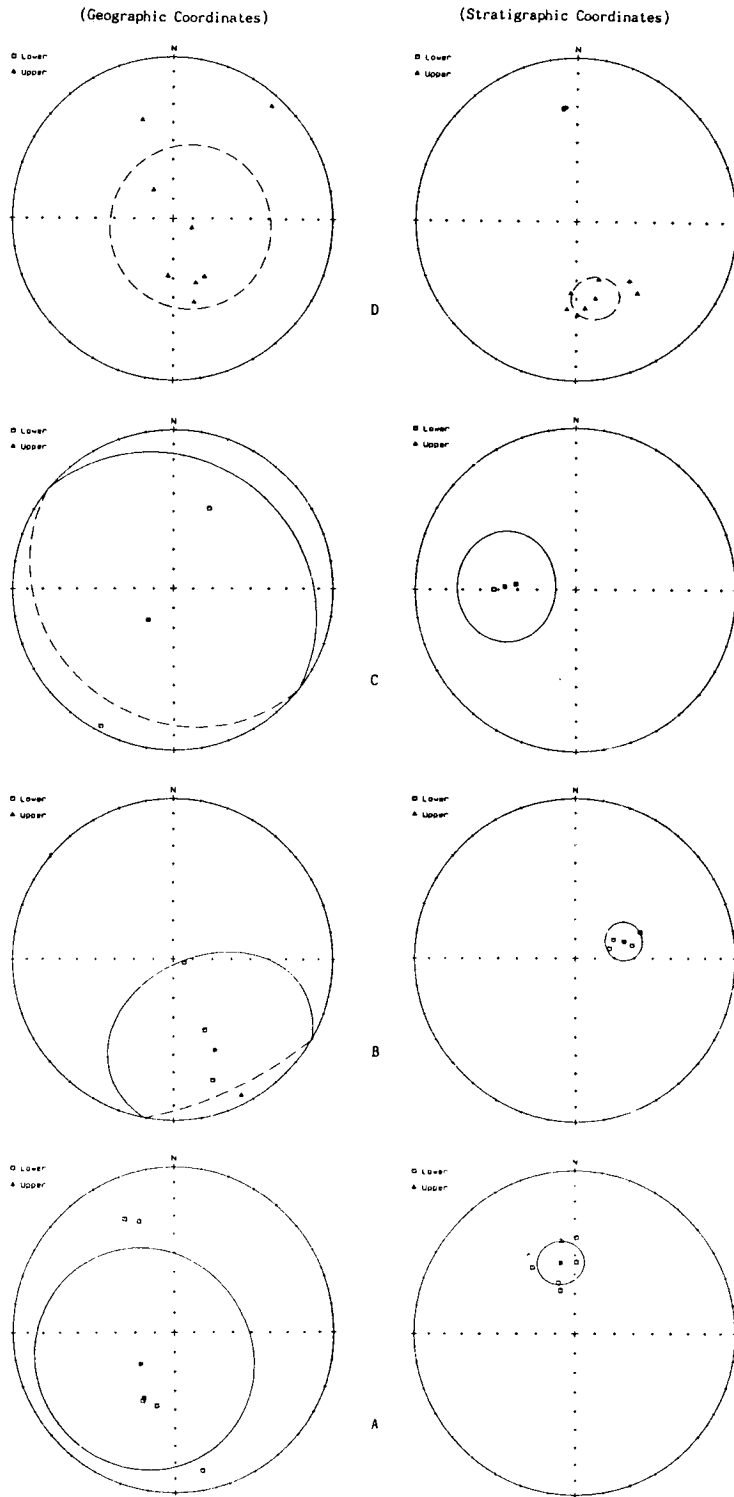
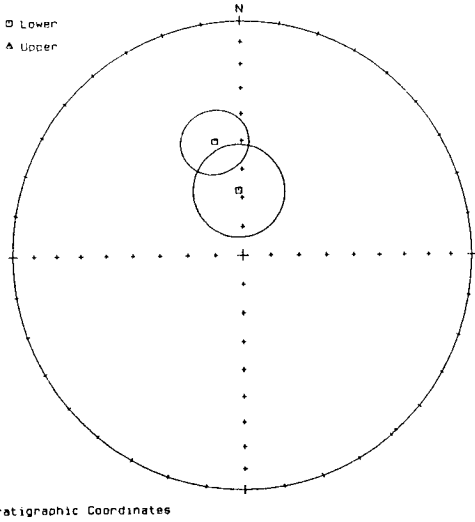


Fig. 6. Site-mean directions (open symbols) and sub-group-mean direction (solid symbols) with 95% confidence circle for each sub-group of the Yucheon Group in geographic coordinates (left) and in stratigraphic coordinates (right).



Stratigraphic Coordinates
Fig. 7. Reversal test of the Yuceon Group. The mean of each polarity population is calculated and one population is reversed for comparison with the other; 95% confidence circles are shown.

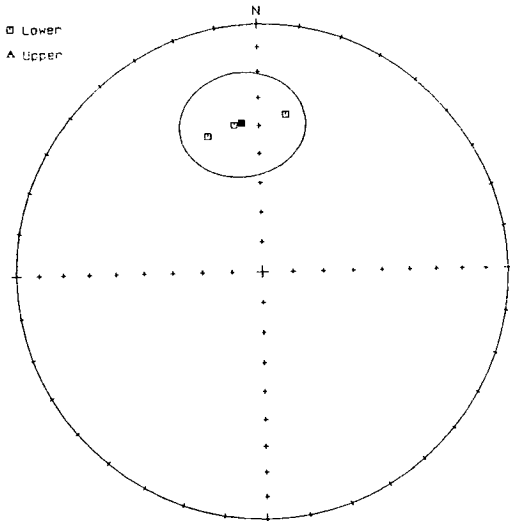


Fig. 8. Site-mean directions (open symbols) and formation-mean direction (solid symbols) with 95% confidence circle of the Bulguksa intrusives.

자철석과 같은 페리자성광물 (Ferrimagnetic Mineral)임을 제시한다. 퇴적암 시료들은 화산암과 같이 낮은 자기장에서 완전한 포화상태에 도달하지는 못하지만, 포화상태에 근접한 값을 보여주고 있어, 시료내에 적철석과 같은 경사 반강자성광물 (Canted Antiferromagnetic Mineral)이 함유되어 있으나 페리자성광물에 비하여는 그 함량이 매우

Table 4. Paleomagnetic results of the Bulguksa Intrusives.

Site	N/N ₀	D	I	α_{95}	k
4	16/18	350.6	39.0	3.1	147.5
21	5/5	9.7	35.3	3.2	588.0
47	4/4	339.5	40.2	17.6	28.3
Mean	3	353.6	38.8	18.9	43.6

N/N₀; Number of specimens accepted/Number of specimens demagnetized. D and I; Declination and inclination. α_{95} ; Cone of confidence about mean direction. k; Precision parameter (Fisher, 1953).

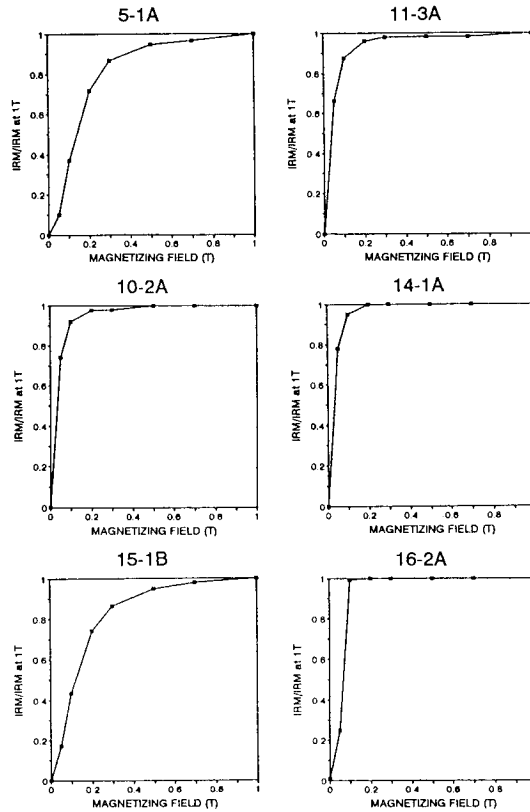


Fig. 9. Isothermal remanent magnetization acquisition curves for selected samples.

적은 것을 시사한다. 그러나, 일부 퇴적암 시료들은 (Fig. 9, 시료 5-1A, 신양동층 및 시료 15-1B, 춘산층) 다른 퇴적암과는 달리 자기장의 강도가 증가할수록 획득하는 등온 잔류자화의 값이 계속 증가하여, 이들 시료에는 상당한 양의 경사 반강자성광물이 함유되어 있음을 제시한다. 이러한 결과는 잔류항자기력 (Coercivity of Remanence, H_{cr}) 측정 결과와도 일치한다 (Table 5). 일반적으로 순수한 페리자성광물은 H_{cr}이 50 mT 이하의 값을 갖고, 순수한

Table 5. Coercivity of remanence (H_{cr}) of selected specimens.

Group	Rock type	Sample #	H_{cr} (mT)
Yucheon	Quartz porphyry	14-1	-32.9
	Rhyolite porphyry	18-1B	-38.5
	Rhyolite	19-1B	-33.1
	Tuff	11-3	-34.0
	Basalt	16-2A	-28.6
	Basalt	22-2B	-15.9
Hayang	Shale	5-1	-124.3
	Shale	20-1C	-33.7
	Red shale	15-1B	-123.7
	Shale	10-2	-35.7
	Shale	17-3C	-21.9
	Sandstone	7-1	-33.9

경사 반강자성광물은 200 mT 이상의 값을 갖는다 (Thompson et al., 1980). Table 5에서 나타나는 것과 같이 대부분 시료들의 H_{cr} 은 40 mT 이하의 값을 보여주어 잔류자화를 기록하는 주 자성광물이 헤리자성광물임을 지지하나, 일부 시료들 (5-1 및 15-1B)은 H_{cr} 이 120 mT 이상을 가지므로 헤리자성광물과 경사 반강자성광물이 동시에 함유되어 있음을 제시한다.

동일 시료의 광석 현미경 관찰 결과도 상기의 등온잔류자화 획득실험 및 잔류자기력 측정 결과와 일치하고 있다. 광석 현미경 관찰에 의하면 (Table 6) 관입암 및 화산암은 주 자성광물이 자철석으로, 관입암은 자형 (Euhedral)에서 반자형 (Subhedral)으로 대부분의 입자가 5~40 μ m의 크기로 산출되며, 화산암은 반자형에서 타형 (Anhedral)으로 대부분의 입자가 1~20 μ m로 산출되고 있다. 실험적 관찰에 의하면 자철석의 경우 일반적으로 20 μ m 크기의 입자까지도 Pseudo-Single Domain 상태의 특성을 갖으므로 (e.g., Moskowitz and Banerjee, 1979), 연구지역의 관입암 및 화산암들은 주로 Pseudo-Single Domain 크기의 자철석에 의하여 안정된 잔류자화를 기록한다. 퇴적암의 경우 대부분의 관찰된 자성광물은 반자형에서 타형의 <0.1~30 μ m 입자크기를 갖는 자철석이며, 드물게는 자철석이 산화된 것으로 사료되는 적철석이 나타나는 경우도 있으나 자철석에 비하여 극히 적은 양이

산출된다. 적철석의 경우는 자철석에 비하여 1~2 Orders 정도 자성이 약하므로 시료내에 자철석과 적철석이 모두 존재할 경우 적철석이 잔류자화 및 기타 자기특성에 중요한 역할을 하려면 적철석이 전체 자성광물의 80~90% 이상이 함유되어야 하므로 (King et al., 1982), 퇴적암 시료들의 관찰된 안정한 잔류자화는 주로 Single Domain에서 Pseudo-Single Domain 크기의 자철석에 의하여 기록된 것으로 사료된다. 그러나, 일부 퇴적암 시료들의 경우 (5-1 및 15-1B), 상당한 양의 자철석이 적철석으로 산화되었음이 관찰되어, 소자실험, 등온잔류자화 획득실험 및 잔류자기력 측정결과와 일치한다.

고 찰

특성잔류자화의 기원 및 자극 위치

경상분지에 분포하는 지층들은 대체적으로 한 방향의 경사를 이루고 있어 일반적으로 전통적인 습곡시험을 적용하기에는 문제점이 있지만, 본 연구지역에 분포하는 하양층군과 유천층군은 연구지역에 발달한 칼데라 형성 등의 구조운동과 관련되어 지층의 주향방향이 일정하지 않으므로 본 연구지역에 분포하는 지층들에 대하여는 전통적인 습곡시험을 적용할 수 있다. 본 연구 대상 지층의 특성 잔류자화는 신양동층을 제외한 하양층군과 유천층군은 1) McElhinny (1964)의 습곡시험을 99% level에서 통과 하였으며, 2) 대부분 시료의 자기적 점성이 비교적 적거나 거의 나타나지 않으며, 3) 잔류자화를 기록하는 자성광물이 주로 변질을 받지 않은 Single Domain에서 Pseudo-Single Domain 크기의 자철석이며, 4) 지층경사보정 전의 잔류자화 방향이 현재 지구자기장이나 ($D/I=353.5^\circ/50.0^\circ$, Lee et al., 1987) 최근의 쌍극자기장 방향과 ($D/I=0^\circ/55^\circ$) 차이를 보이며, 5) 불국사관입암의 방향과 차이를 보여 일종의 접촉변질시험을 통과하고, 6) 역자화와 정자화를 기록하는 유천층군은 통계학적으로 95%의 신뢰도를 가지며 역전시험을 통과하는 것은 본 연구에서 측정된 잔류자화의 방향이 지층 형성시 혹은 적어도 지층경사 전에 획득한 1차잔류자화 성분임을 제시한다.

Table 6. Summary of ore microscopy observation.

	Major magnetic minerals	Grain size	Grain shape
Intrusives	Magnetite	5-40 μ m	Euhedral-Subhedral
Volcanics	Magnetite	1-20 μ m	Subhedral-Anhedral
Sedimentary rocks	Magnetite, Hematite (Trace)	<0.1-30 μ m	Subhedral-Anhedral
A few sedimentary rocks	Magnetite, Hematite	<0.1-30 μ m	Subhedral-Anhedral

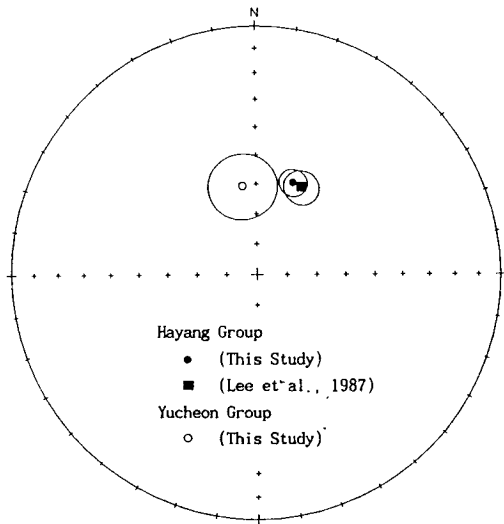


Fig. 10. Comparison of two mean directions from this study with that from Lee et al. (1987). See text for explanation.

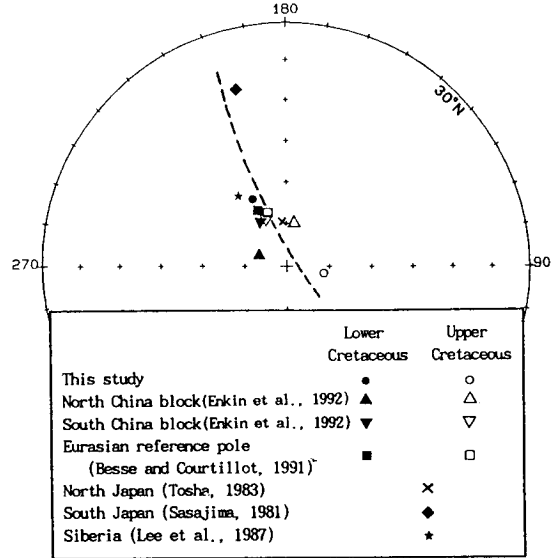


Fig. 12. Comparison of Cretaceous paleomagnetic poles from Korea, China, Japan, and Siberia. See text for explanation.

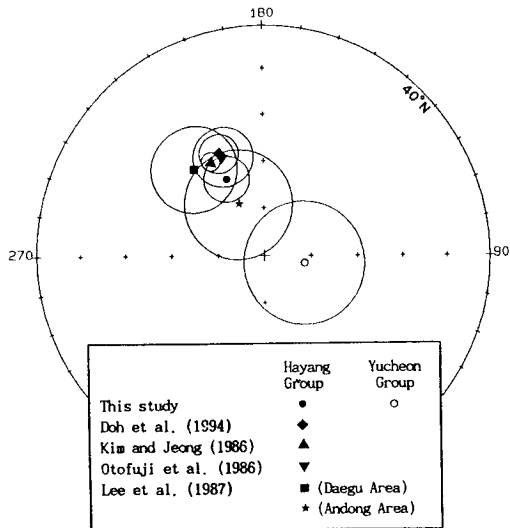


Fig. 11. Comparison of the paleomagnetic poles from this study with those from other areas of the Gyeongsang Basin. See text for explanation.

Fig. 10은 신양동층을 제외한 하양층군 및 유천층군의 평균방향을 도시한 것이다. 본 연구에서 수행한 하양층군의 평균방향은 타 지역에 분포하는 하양층군에서 연구한 결과인 $D/I=28.1^{\circ}/57.5^{\circ}$ (Lee et al., 1987)와 잘 일치한다. 이러한 일치는 연구지역에 발달한 단층 및 칼데라 구조 형성과정에서 야기될 수 있는 잔류자화 방향의 변동이 거의 없거나 평균값 계산 과정에서 상쇄 되었음을 제시

한다. 하양층군과 유천층군의 평균방향을 비교하면 복각은 유사하나 편각이 약 31° 의 차이를 보여준다. 이러한 편각차이를 야기시킨 요인들로 1) 소자실험시 완전히 제거되지 않은 2차잔류자화의 존재, 2) 연구지역에 발달한 단층운동에 의한 회전, 3) 적절히 상쇄시키지 못한 유천층군에 기록된 지자기 영년변화, 4) 화산활동시 수반된 지구조 운동, 5) 두 층군 퇴적시기 차이에 따른 겉보기 자극위치 변화와 관련된 지구자기장의 변화 등을 생각할 수 있다. 대부분의 시료들은 10단계 이상의 열 혹은 교류소자를 거쳐 잔류자화를 측정하였으며, 벡터 다이어그램 상에서 소자단계가 증가함에 따라 방향이 원점으로 향하는 비교적 매끈한 변화를 보여 주므로 소자실험시 완전히 제거되지 않은 2차잔류자화의 영향은 없거나 적어도 그리 크지 않음을 알 수 있다. 연구지역에 발달한 단층들에 의하여 하양층군도 유천층군과 거의 동일한 양의 변위가 생겼으므로, 단층운동에 의한 편각차이는 배제할 수 있다. 유천층군은 잔류자화 방향에 따라 4 소그룹으로 분류가 되며 이러한 사실은 연구지역의 화산활동이 시간적 간격을 두고 일어났음을 지시하나, 화산활동이 일어난 시간 간격이 지자기 영년변화를 적절히 상쇄할 수 있을 정도의 충분한 기간에 걸쳐 일어났는지는 알 수 없다. 만약, 화산활동의 기간이 비교적 짧은 기간 동안에 일어났다면, 편각차이는 유천층군의 잔류자화에 기록된 지자기 영년변화의 영향에 기인할 수 있다. 그러나, 유천층군은 역자화와 정자화를 기록하고 있으며, 이들 역자화와 정자화 성분이

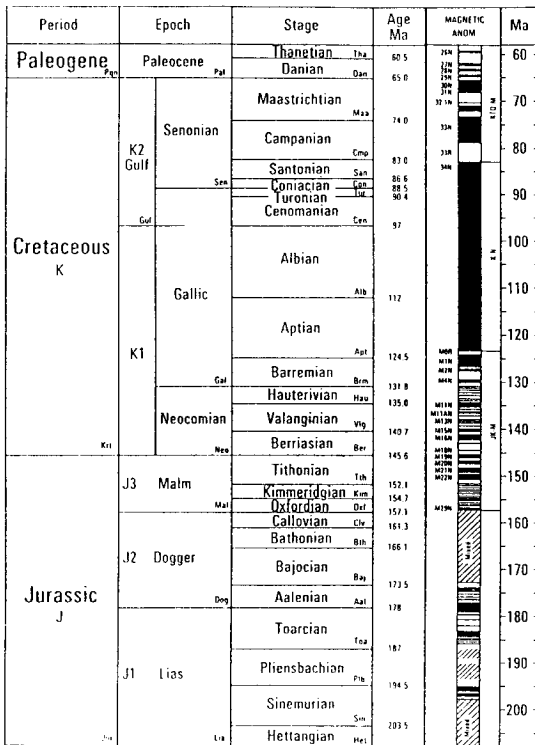


Fig. 13. The geomagnetic time scale of Harland et al. (1990).

95%의 신뢰도를 가지며 역전시험을 통과하는 것은 유천층군에서 측정된 잔류자화에 지자기 영년변화가 적절히 상쇄 되었음을 지시한다. 연구지역의 화산활동과 관련된 칼데라 구조 형성과정에서 주로 칼데라 주변에 퇴적된 유천층군의 변위가 일어났으며, 이에 의하여 잔류자화의 편각차이가 야기될 수 있다. 또한, 하양층군과 유천층군은 부정합으로 그 경계를 이루고 있어 두 층군의 퇴적시기에는 시간적 차이가 있다. 그러므로, 두 층군간의 편각차이는 두 층군의 퇴적시기 차이에 따른 결과로 지자기위치 변화와 관련된 지구자기장의 변화에 기인할 가능성도 있다. 이상과 같이 유천층군과 하양층군의 편각차이는 화산활동시 수반된 지구조 운동과 두 층군 퇴적시기 차이에 따른 지구자기장의 변화에 의하여 야기되었을 가능성이 높으나 두 요인들의 영향 범위는 현재의 자료로는 구분할 수가 없으며, 앞으로 이에 대한 연구가 계속 요망된다.

Fig. 11은 본 연구의 자극 위치와 한반도 백악기 경상분지 지층의 다른 연구자들에 의한 자극 위치를 비교한 것이다. 유천층군은 앞에서 언급한 바와 같이 화산활동과 관련된 칼데라 형성 및 지구자기장의 변화로 인하여 편각으로 자극 위치가 백악기 타 자극의 위치와 떨어져 있다.

그러나, 본 연구에서 구한 하양층군의 자극 위치는 (72.0° N, 206.4°E) 경상분지의 타 지역에서 수행된 연구들의 (김광호와 정봉일, 1986; Otofujii et al., 1986; Lee et al., 1987; 도성재 외, 1994) 자극 위치와 A₉₅ Circle들이 모두 교차하여, 본 연구지역과 경상분지의 타 지역 (밀양 소분지) 간에 중요한 상대적인 운동이 일어나지 않았음을 제시한다. Fig. 12는 의성소분지의 자극 위치와 한반도 주변 지역인 중국, 일본 및 시베리아의 백악기 지층으로부터 구한 자극 위치를 비교한 것으로서 자극의 위치들이 북극을 통과하는 호 (Arc)상에 분포를 하여 적어도 한반도가 하양층군 퇴적당시에는 동북아시아의 주변지역과 동일지괴를 이루었음을 지시한다. 자극들의 호상 분포는 하양층군 퇴적이후에 일어난 Tan-Lu Fault 및 일본열도의 회전운동에 기인한 것으로 사료되며, 이러한 해석은 Lee et al.(1987)의 결과와도 일치한다.

지자기 층서

하양층군의 최하부층인 일직층의 퇴적시기는 Aptian 이전 (최덕근, 1989), Aptian (최성자, 1989; 전희영 외, 1990), Barremian~Aptian (장기홍, 1987; 손진담, 1989), 또는 Barremian (원종관 외, 1990) 등 여러 의견이 있다. 점곡층의 경우는 퇴적시기가 Aptian 초로 (최덕근, 1985; 최성자, 1989) 보고되었으나 점곡층의 상부와 대비되는 밀양소분지의 학봉화산암층의 방사능 동위원소 연령은 79.4 Ma (민경덕 외, 1982) 및 90~88 Ma (Lee et al., 1987)로 발표되었으며, 춘산층의 경우는 Albian 초로 (전희영 외, 1990) 발표되어 하양층군의 퇴적시기에 대하여 많은 의견이 있다. 본 연구에서는 하양층군에 속하는 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층 및 춘산층이 모두 정자화를 기록하고 있으며, 본 지층들의 층후는 적어도 약 4000~5000 m 혹은 그 이상이다 (장기홍, 1975). 그러므로, 위 연구자들이 보고한 지질시대 전후의 Geomagnetic Time Scale (Harland et al., 1990)과 비교하면, 본 하양층군의 퇴적시기는 비교적 장기간의 정자화를 기록하는 Cretaceous Long Normal Superchron (Cretaceous Quiet Zone)과 대비되므로 (Fig. 13), 하양층군의 퇴적시기는 적어도 Cretaceous Long Normal Superchron이 시작되는 Aptian 초 이후인 것을 제시한다. Cretaceous Quiet Zone은 Aptian 초에서 Santonian까지의 (124~83 Ma) 장기간에 걸쳐 있으므로, 이 기간 중 좀더 세부적인 하양층군의 퇴적시기에 대하여는 계속적인 연구가 필요하다.

유천층군의 경우 층서적으로 최상부인 소그룹 D는 역자화를 하부는 (소그룹 A, B 및 C) 정자화를 기록하고

있어 연구지역의 유천층군은 적어도 정자극기와 역자극기의 두 기간에 걸쳐 생성되었음을 지시한다. 유천층군의 시대에 대하여는 여러 의견이 있으나, 유천층군을 관입한 불국사 관입암의 방사능 동위원소 연령 등에 근거를 두어 Albian~Cenomanian (장기홍, 1987) 혹은 Albian 말~Coniacian (원종관 외, 1990)으로 알려져 있다. 유천층군의 하부층인 하양층군의 퇴적시기가 Cretaceous Quiet Zone에 해당하는 기간 중의 일부이므로, 연구지역 유천층군의 역자화를 기록하는 최상부는 Campanian 하부의 Polarity Chron 33R이나 그 이후의 역자극기와 대비된다 (Fig. 13). 그러므로, 연구지역 유천층군의 생성시기가 일반적으로 알려진 시대에 비하여 후기인 Cretaceous Quiet Zone과 Polarity Chron 33R 경계 (83 Ma) 전후나 그 이후의 정자극기와 역자극기를 제시한다 (Fig. 13).

화산활동

연구지역의 화산암층인 유천층군은 잔류자화 방향에 근거를 하여 4개의 소그룹으로 분류할 수 있다 (Table 3). 이러한 잔류자화 방향의 뚜렷한 차이는 화산활동 기간이 비교적 짧아 각 화산암 소그룹의 지자기 방향에 기록된 영년변화에 기인한 것으로, 연구지역에 시기를 달리하는 화산활동이 적어도 4회 이상 있었음을 제시한다. 또한, 유천층군이 역자화와 정자화를 기록하고 있는 것으로 보아 화산활동의 기간은 적어도 극이 변화하는 두 자극 기간 동안인 비교적 오랜 기간에 걸쳐 일어났으며, 시기는 Cretaceous Long Normal Superchron 말과 Polarity Chron 33R 혹은 그 이후로 추정된다.

결론

1. 의성 소분지에 분포하는 경상누층군 중 신양동층을 제외한 하양층군 및 유천층군은 주로 Single에서 Pseudo-Single Domain 크기의 자철석에 의하여 비교적 안정된 지층경사 이전의 잔류자화 성분을 기록하고 있다. McElhinny의 습곡시험을 신뢰도 99% level에서 통과한 하양층군의 평균 고지자기 방향은 $D/I=22.5^\circ/57.2^\circ$ 이며, 이에 의한 고지자기 극의 위치는 $72.0^\circ\text{N}, 206.4^\circ\text{E}$ 이다. 정자화와 역자화를 기록하는 유천층군은 각각 신뢰도 95% 및 99% level에서 역전시험 및 McElhinny의 습곡시험을 통과하였으며, 이들의 평균 고지자기 방향은 $D/I=351.2^\circ/60.5^\circ$ 이며, 이에 의한 고지자기 극의 위치는 $81.3^\circ\text{N}, 79.0^\circ\text{E}$ 이다.
2. 연구지역인 의성 소분지와 경상분지의 타 지역 (밀양

소분지) 간에 상대적 운동이 일어나지 않았으며, 하양층군 퇴적당시는 한반도가 주변의 동북아시아 지역과 동일한 지괴였다.

3. 하양층군은 Cretaceous Long Normal Superchron이 시작되는 Aptian 초 이후에 퇴적되었으며, 유천층군은 Cretaceous Long Normal Superchron과 Polarity Chron 33R 경계 (83 Ma) 전후나 그 이후의 정자극기와 역자극기에 걸쳐 생성되었다.

4. 연구지역에는 시기를 달리하는 화산활동이 적어도 4회 이상 있었다.

사 사

본 연구는 전략광물자원 연구센터 및 한국과학재단의 특정기초연구의 지원에 의하여 수행되었음을 밝히고 이에 감사드립니다. 고지자기 실험 기자재 사용을 허락하여 준 미국 Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island의 John W. King 교수, 논문 원고를 세심하게 검토하여 유익한 조언을 해주신 석동우 박사, 실험자료 정리 및 도면 작성에 도움을 준 고려대학교 박찬호와 박용희군에게도 감사드립니다. 또한, 본 논문을 세심하게 심사하여 주신 익명의 심사자께 사의를 표합니다.

참고문헌

- 김광호, 김두수 (1991) 대구-경주 일대에 분포된 체약산층, 건천리층 및 주사산층의 지자기층서. 지질학회지, 27권, p. 40-51.
- 김광호, 정봉일 (1986) 페름기 이후 한국의 고지자기에 관한 연구. 광산지질, 19권, p. 67-83.
- 김상욱 (1986) 경상분지에서의 후기 백악기 화산활동에 관한 연구. 이상만 교수 송수기념 논문집, p. 167-194.
- 김인수, 이현구, 윤혜수, 강희철 (1993) 의성지역 백악기 암석에 대한 고지자기 연구. 광산지질, 26권, p. 403-420.
- 도성재, 황창수, 김광호, (1994) 밀양 소분지에 분포하는 경상누층군에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 투고중.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국남부의 백악기말 이후의 화산활동과 광화작용에 의한 판구조론의 적용성 연구(I). 광산지질, 15권, p. 123-154.
- 박기화 (1986) 의성지역 금성산 칼데라에 관련된 광화 작용. 금속 광상조사연구, 한국동력자원연구소, KR-86-10, p. 319-337.
- 손진담 (1989) 경상북도 군위지역 경상누층군 진주층과 일적층의 퇴적상과 고수류. 지질학회지, 25권, p. 505.
- 원종관, 이문원, 김광호, 홍영국, 우준기, 이재만 (1990) 순창 함몰대에서의 백악기 화산활동에 관한 연구 - 경상분지 및 서남 일본내대의 비교-. 지질학회지, 26권, p. 165-184.
- 윤성효 (1988) 화산 환상화성암 복합체의 발달사 및 콜드론 구조. 지질학회지, 24권, p.267-288.
- 장기홍 (1975) 한반도 동남부의 백악계 층서. 지질학회지, 11권, p. 1-23.

- 장기홍 (1977) 경상분지 상부 중생계의 층서, 퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13권, p. 76-90.
- 장기홍 (1978) 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조 (II). 지질학회지, 14권, p. 120-135.
- 장기홍 (1987) Cretaceous strata. In Lee, D. S. (ed.) *Geology of Korea*. 교학사, p. 175-201.
- 장기홍, 이재영, 김상욱, 고인석 (1977) 한국지질도 1:50,000 구산동도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 25p.
- 장기홍, 이운중, 박병권 (1981) 한국지질도 1:50,000 군위도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소, 20p.
- 전희영, 김동학, 엄상호, 봉필운, 이호영, 최성자, 김복철, 권영인, 이동영, 박영수, 최영섭 (1990) 한반도 진화생물에 의한 퇴적분지 연구 (II). 한국동력자원연구소, 288p.
- 지세정, 도성재, 최선규, 이재호 (1989) 의성 광화대 동-연-아연-은 광상의 지화학적 연구. 광산지질, 22권, p. 253-266.
- 지세정, 최선규, 도성재, 고용권 (1991) 의성지역의 금-은 광화작용. 광산지질, 24권, p. 151-165.
- 최덕근 (1985) 경상누층군의 포자화분화석이 지시하는 지질시대와 고생대. 고생물학회지, 1권, p. 33-50.
- 최덕근 (1989) 건천리층 (하부 백악계) 에서 산출되는 포자화분화석. 고생물학회지, 5권, p. 1-27.
- 최성자 (1989) Charophytes 화석에 의한 경상누층군의 생층서. 지질학회지, 25권, p. 506.
- 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. 4,029-4,050.
- Enkin, R. J., Yang, Z., Chen, Y., and Courtillot, V. (1992) Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the present. *J. Geophys. Res.*, v. 97, p. 13,959-13,989.
- Fisher, R. A. (1953) Dispersion on a sphere. *Royal Soc. (London) Proc. Ser. A*, v. 217, p. 295-305.
- Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. V., Craig, L. E., Smith, A. G., and Smith, D. G. (1990) *A Geologic Time Scale 1989*. Cambridge University Press, Cambridge, 263p.
- King, J. W., Banerjee, S. K., Marvin, J., and Ozdemir, O. (1982) A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural minerals: some results from lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 59, p. 404-419.
- Kirschvink, J. L. (1980) The least square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. Jour. Roy. Astron. Soc.*, v. 62, p. 699-718.
- Lee, G. D., Besse, J., Courtillot, V., and Montigny, R. (1987) Eastern Asia in the Cretaceous: New paleomagnetic data from South Korea and a new look at Chinese and Japanese data. *J. Geophys. Res.*, v. 92(B5), p. 3,580-3,596.
- McElhinny, M. W. (1964) Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, v. 8, p. 338-340.
- Moskowitz, B. M. and Banerjee, S. K. (1979) Grain size limits for pseudo-single domain behavior in magnetite: Implications of paleomagnetism. *IEEE Trans. Magnet.*, v. 15, p. 1,241-1,246.
- Otofuji, Y. -I., Oh, J. Y., Hirajima, T., Min, K. D., and Sasajima, S. (1982) Paleomagnetism and K-Ar age determination of Cretaceous rocks from Korean peninsula-Gyeongsang Supergroup in South Korea. In Hays, D.E. (ed.) *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, II*, Am. Geophys. Union, *Geophys. Monogr.* v. 27, p. 388-396.
- Otofuji, Y. -I., Kim, K. H., Inokuchi, H., Morinaga, H., Murata, F., Katao, H., and Yaskawa, K. (1986) A paleomagnetic reconnaissance of Permian to Cretaceous sedimentary rocks in southern part of Korean peninsula. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 38, p. 387-402.
- Sasajima, S. (1981) Pre-Neogene Paleomagnetism of Japanese Island (and vicinities), in paleoreconstruction of the Continents. In McElhinny, M. W. and Valencio, D. A. (eds.) *Am. Geophys. Union, Geodyn. Ser.*, v. 2, p. 115-128.
- Tompson, R., Bloemendal, J., Dearing, J. A., Oldfield, F., Rummery, T. A., Stober, J. C., and Turner, G. M. (1980) Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, v. 207, p. 481-486.
- Tosha, T. (1983) Paleomagnetism of northeast Japan. Ph.D. thesis, Univ. of Tokyo, Tokyo, 108p.
- Zijderveld, J. D. A. (1967) A. C. demagnetization of rocks: Analysis of results. In Collinson, D. W., Creer, K. M., and Runcorn, S. K. (eds.) *Method in Paleomagnetism*. Amsterdam, Elsevier, p. 254-286.