

## 백운산 향사대에 분포하는 동고층에 대한 고지자기 연구

도 성 재\*

### Paleomagnetism of the Tonggo Formation in the Baekunsan Syncline

Seong-Jae Doh\*

**ABSTRACT:** Paleomagnetic data have been obtained from the Lower Triassic Tonggo formation which is exposed in the E-W trending Baekunsan syncline comprising the Pyongan Supergroup in eastern Korea. Two ancient components of magnetization are recovered in this formation by detailed thermal demagnetization: a post-folding component and a pre-folding component. The post-folding component ( $D/I=58.8/55.5^\circ$ ) is normally magnetized and appears to acquire in the Cretaceous Normal Superchron. It is a magnetic signature of the Daebo Orogeny and has been rotated clockwise since this magnetization has been acquired, in common with the main synclinal axis. The pre-folding component ( $D/I=1.1/19.4^\circ$ , Paleopole at  $306.1^\circ\text{E}$ ,  $63.2^\circ\text{N}$ ) passes fold and reversal tests and is inferred to be a post-depositional or early chemical diagenetic remanence of Lower-Middle Triassic age. This paleopole corresponds only with the Lower Triassic poles from the North China Block; it is removed from the contemporary poles from the South China Block. If the result of this study is corrected for the clockwise rotation deduced from the Cretaceous overprint, the enhanced agreement with the Lower Triassic poles from the North China block can be achieved. Therefore, a first order correlation between the Korean Peninsula and North China at least since Lower Triassic times is identified in this study.

### 서 론

고지자기 연구는 지구의 운동에 대한 정량적 정보를 제공하는 중요한 연구방법 중의 하나로 수 십년 전부터 전세계적으로 널리 이용되고 있다. 유라시아는 여러 지괴들이 모여 이루어진 대륙으로 고지자기연구를 통하여 고생대 및 중생대에 일어난 여러지괴들의 상대적 이동에 대한 연구가 많이 수행되고 있다 (예, Enkin et al., 1992). 유라시아의 동부에 위치한 한반도는 동아시아의 지체구조학적 관점에서 그의 위치에 대하여 이론이 많다. 예를 들면, 전통적으로 한반도가 지역적으로 근접한 북중국지괴에 속한다는 견해가 있었으나 최근에 와서 남중국지괴에 속한다는 의견 (Lee et al., 1987), 옥천대를 중심으로 북부는 남중국지괴 남부는 북중국지괴에 속한다는 견해 (Cluzel and Cadet, 1992), 혹은 독립된 개별지괴일 가능성 (Enkin et al., 1992) 등이 있다. 이러한 한반도의 지체구조학적 위치에 대한 명확한 해답을 얻기 위하여는 지괴 운동에 대한 자료를 제공하여 주는 고지자기 연구가 필수적이다.

한반도의 고지자기 연구는 수 년 전부터 연구가 수행되고 있으나 이들의 연구시기는 주로 지질학적으로 비교적 최근에 속하는 신생대에서 중생대 말에 해당되어 (예, Kienle and Scharon, 1966; Ito and Tokieda, 1980; 민경덕 등, 1986, 1990; 김인수, 강희철, 1989; 도성재 등, 1990; 김광호, 김두수, 1991; 박찬호 등, 1991), 유라시아 대륙의 지괴운동이 활발히 일어난 중생대 초 및 그 이전에 대한 고지자기 자료가 동아시아 대륙에서 한반도의 지체구조학적 위치 확립을 위하여 필수적이다. 한반도의 중생대 초 및 그 이전에 대한 고지자기 연구는 몇 학자들에 의하여 수행되었으나 (예, 김광호, 정봉일, 1986; Shibuya et al., 1988; Otofujii et al., 1989; 김인수, 1989; 김광호 등, 1990; Kim and Van der Voo, 1990), 이들 연구 중에는 고지자기 성분 추출에 실패하였거나 오랜 지질시대를 대표하기에는 시료수가 부족하여, 보다 신빙성있는 한반도의 지체구조학적 위치확립을 위하여는 보다 많은 고지자기 자료가 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구는 옥천대의 북서부에 위치한 비변성대인 (Lee, 1987) 백운산 향사대에 분포하는 평안누층군 중 지질시대가 트라이아스기 초로 알려진 동고층 (녹암층)을 대상으로 고지자기 연구를 수행하여, 이 시대의 고지자기극 위치를 확립하고 연구지역이 속해있는

\* 고려대학교 이과대학 지질학과 (Department of Geology, Korea University, Seoul, 136-701, Korea)

영남지괴의 동아시아 대륙에서 지체구조학상 위치에 대한 자료를 제공하고자 한다.

**일반지질 및 시료채취**

강원도 태백시를 중심으로 발달한 백운산 향사대에 분포하는 평안누층군은 지질시대가 석탄기 말에서 트라이아스기 초로 캄브리아기에서 오도비스기에 걸쳐 퇴적된 하부의 조선누층군을 부정합으로 피복하고 있다. 본 연구의 대상 지층인 동고층은 평안누층군의 최상부층으로 백운산 향사대의 축을 중심으로 분포하고 있으며 (Fig. 1), 하부층인 고한층과 부정합 관계를 이루고 있다 (Lee, 1987). 연구지역의 동고층은 층후가 최대 400m로 주로 적색(자색) 및 녹색 사암으로 이루어져 있으며, 퇴적시기는 트라이아스기 초의 Scythian에서 Tr2세 (원종관 등, 1989; ca. 245-235 Ma, Harland et al., 1990)로 트라이아스기 중엽에 일어난 송림변동에 의하여 퇴적이 중단되었다. 송림변동에 의하여 연구지역의 습곡구조가 형성되기 시작하였으며, 그후 유라기에서 백악기초에 걸쳐 일어난 대보조산운동에 의하여 백운산 향사구조가 형성되었다 (Lee,

1987).

시료채취는 야외용 착암기를 이용하여 직경 2.5cm의 코아를 채취하였으며, 각 노두 (Site)의 시료채취 대상지층에 대하여 가능하면 수직·수평의 등간격으로 시추장소를 선정하였다. 각 시추코아의 방향은 주변 지형지물을 기준으로 브란톤 컴퍼스 및 태양 컴퍼스를 이용한 정향법을 병용하여 현장에서 측정하였다. 이러한 방법으로 9개의 노두에서 총 87개의 독립된 정향 코아들을 채취하였다.

**실험방법**

야외에서 채취한 코아들을 2.2cm 길이로 절단 후, 모든 시료들에 대하여 단계적 열소자 처리를 하여 각 단계별 잔류자화를 측정하였다. 열소자는 Magnetic Measurements사의 MMTD-1 열소자기를 이용하였으며 잔류자화 측정은 Cryogenic Consultant Ltd.사의 3축 저온자력계 (Cryogenic Magnetometer)를 사용하였다. 모든 실험은 내부 자기장의 강도가 25 nT 이하인 공간에서 수행되었다. 열소자는 300°C까지는 100°C 단계, 500°C까지는 50°C 단계,

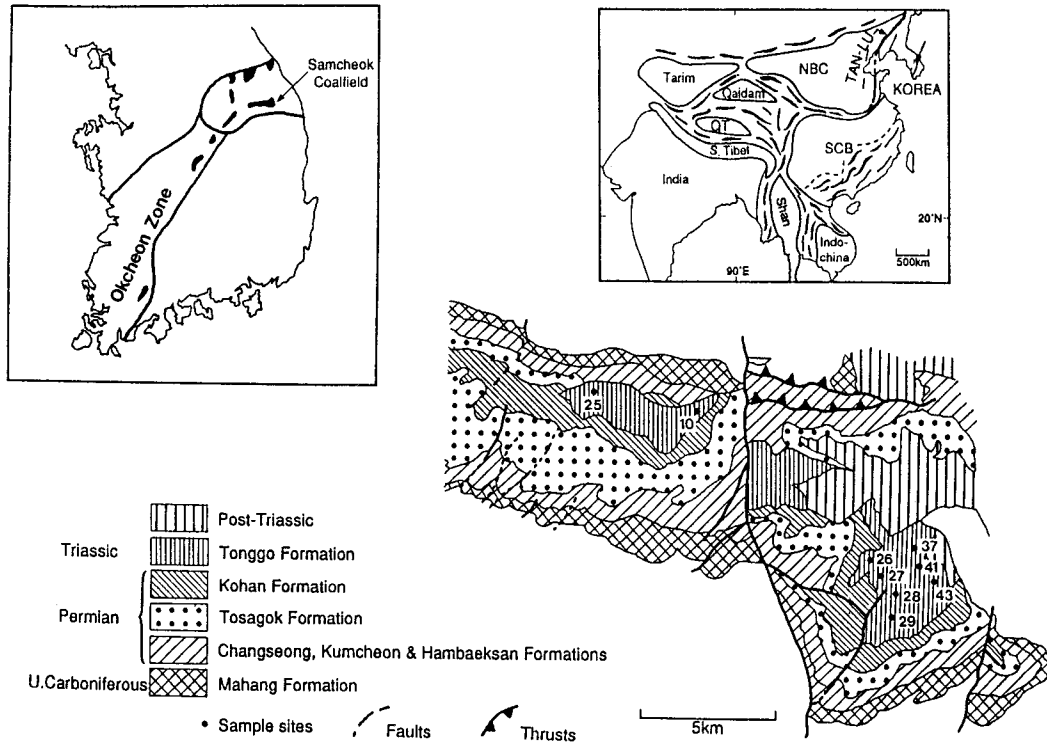


Fig. 1. Geologic map of the Baekunsan Syncline, showing the locations of the paleomagnetic sampling sites.

500°C 이상에서는 20°C 단계로 최대 700°C 혹은 각 시료의 잔류자화를 기록하는 자성광물의 큐리온도까지 수행되었다. 열소자시 가열에 따른 자성광물의 화학변화를 감지하기 위하여 각 열소자 단계에서 잔류자화 측정을 마친 후, Bartington사의 대자율 측정기를 이용하여 대자율 변화를 측정하였다. 각 노두의 대표시료를 선정하여 ASC Scientific사의 IM-10 Impulse Magnetizer를 사용하여 등온잔류자화 (Isothermal Remanent Magnetization) 획득실험 및 잔류항자기력 (Coercivity of Remanence) 측정을 한 후, 연마편을 제작하여 광석현미경을 이용한 자성광물을 관찰하였다. 또한, Curie Balance를 이용하여 공기 중에서 Thermomagnetic 실험을 수행하였다.

고지자기 자료처리는 Vector Diagram (Zijderveld, 1967) 상에 나타나는 방향변화를 Principal Component Analysis (PCA, Kirschvink, 1980)를 통하여 각 방향의 성분을 추출하였으며, PCA 적용시에는 일직선 상에 나타나는 최소한 3점 혹은 그 이상의 점들에 적용하였다. 마지막 부분에서는 원점과 연결하여 PCA를 수행하였다. 열소자 단계에 따른 잔류자화의 방향변화가 원점을 향하지 않으나 Equal-Area Net 상에서 대원을 따라 방향이 변할 경우는 McFadden and McElhinny (1988)의 Sector Constraints를 이용한 대원법 (Great Circle Method)을 이용하여 특성 잔류자화를 추출하였다.

**고지자기 결과**

자연잔류자화의 강도는 녹색사암이 2~0.1 mA/m, 적색사암이 12~5 mA/m를 보여주며, 자연잔류자화의 방향은 분산되어 있기는 하지만 연구지역의 현재 지구자기장 방향 (D/I=352.6/52.4°)으로 우세하게 모여 있다 (Fig. 2). 이러한 현재 지구자기장 방향의 자연잔류자화의 방향은 기존에 연구된 한국암석에 기록된 2차 잔류자화의 특징적인 방향과 일치한다 (예, Shibuya et al., 1985; Otofujii et al., 1986; Lee et al., 1987). 이러한 2차 잔류자화 방향이 평균 지구축 쌍극 자기장 (Mean Axial Dipole Field)의 방향 (D/I=0/56.6°)보다 연구지역의 현재 지구자기장 방향에 더욱 가깝게 모이는 것은 자연잔류자화에 기록된 2차 잔류자화가 주로 점성잔류자화 (Viscous Remanent Magnetization)임을 제시한다.

자화강도가 매우 약한 녹색사암은 자연잔류자화의 방향이 현재 지구자기장 방향을 보여주나 100°C의 낮은 열소자단계에서 잔류자화의 강도가 저온자력계의 측정한계에 가까운 값 혹은 그이하로 매우 약해져 측정된 잔류자화의 방향이 불규칙하여 지거나 (Fig. 3, 시료 10-3), 열소자

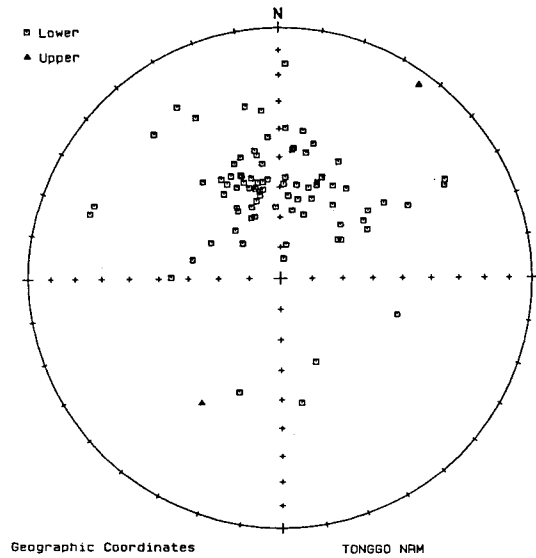
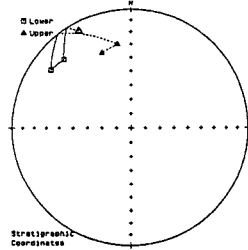
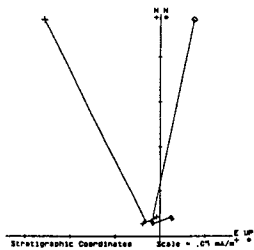
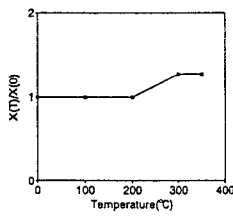
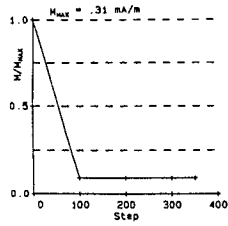


Fig. 2. Total NRM directions in geographic coordinates.

단계의 증가에 따른 자화강도가 점이적으로 감소하면서 잔류자화의 방향이 현재 지구자기장 방향을 기록하다가 자철석의 큐리온도에 가까운 540°C 이상에서는 잔류자화의 강도가 매우 약해져 무질서한 방향성을 보여준다 (Fig. 3, 시료 28-1). 그러므로 녹색사암에서는 현재방향으로 재자화된 성분 이외의 의미있는 고지자기 방향을 얻지 못하였다. 그러나, 7개소의 노두에서 채취한 적색사암 시료들에서는 단계적 열소자 결과 2-3성분의 고지자기 방향을 추출할 수 있었다. 시료 41-2는 3성분을 보여주는 시료의 예로 (Fig. 4), 저온성분 (Low Blocking Temperature Component)인 현재자기장 방향의 점성성분은 500°C에서 제거되며, 두번째 성분은 500°C와 자철석의 큐리온도인 580°C 사이에서 나타나고, 열소자 단계의 증가에 따라 잔류자화의 방향이 원점으로 향하는 고온성분 (High Blocking Temperature Component)은 580°C 이상에서 적철석의 큐리온도인 680°C 사이에서 추출된다. 시료 43-1은 2성분을 보유하고 있는 시료의 예로 (Fig. 4), 자철석의 큐리온도인 580°C 이하에서 제거되는 성분과 580°C 이상에서 온도 증가에 따른 방향이 원점으로 소멸되는 적철석에 의하여 기록된 고온성분을 보여준다. 일부 시료에서는 시료 29-4에서 보는 바와 같이 (Fig. 5) 자철석에 의한 성분만 추출이 가능하고 적철석에 의한 성분은 잔류자화의 강도가 매우 낮아서 저온자력계에 의하여 측정이 거의 불가능하거나, Blocking Temperature Spectra가 중첩되어 Vector Diagram 상에서 단일성분을 추출할 수 없는 경우도 있다. 시료 37-4는 Blocking Temperature Spectra가 중첩되고 열소자

10-3

NRM T100 T200 T300 T350



28-1

NRM T100 T200 T300 T350 T400 T450 T500 T520 T540 T560

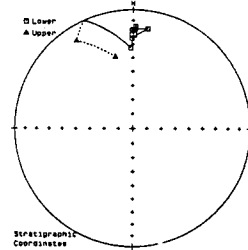
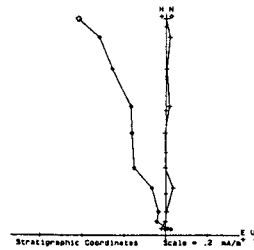
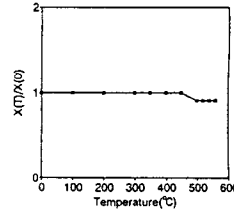
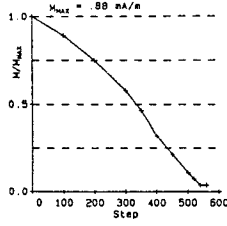
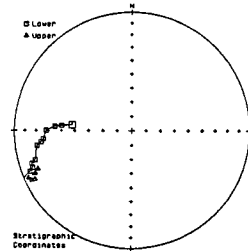
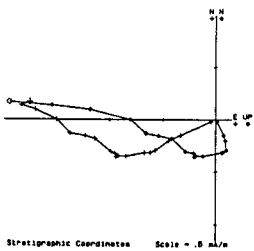
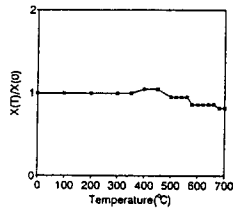
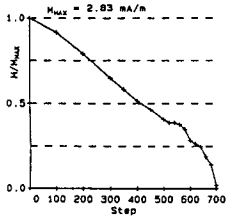


Fig. 3. Typical demagnetization results (normalized intensity curves, susceptibility curves, Zijderveld diagrams, and equal-area projections in stratigraphic coordinates) from samples of green sandstone. Demagnetization steps are shown below sample number.

41-2

NRM T100 T200 T300 T350 T400 T450 T500 T520 T540 T560 T580 T600 T620 T640 T660 T680 T700



43-1

NRM T100 T200 T300 T350 T400 T450 T500 T520 T540 T560 T580 T600 T620 T640 T660 T670 T680

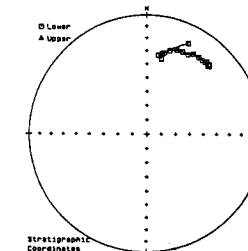
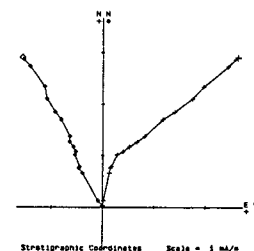
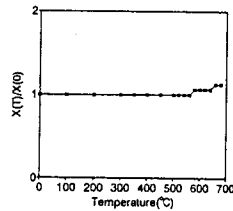
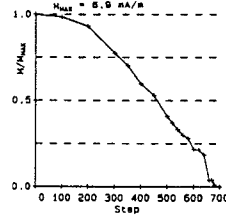


Fig. 4. Typical demagnetization results (normalized intensity curves, susceptibility curves, Zijderveld diagrams, and equal-area projections in stratigraphic coordinates) from samples of red sandstone. Demagnetization steps are shown below sample number.

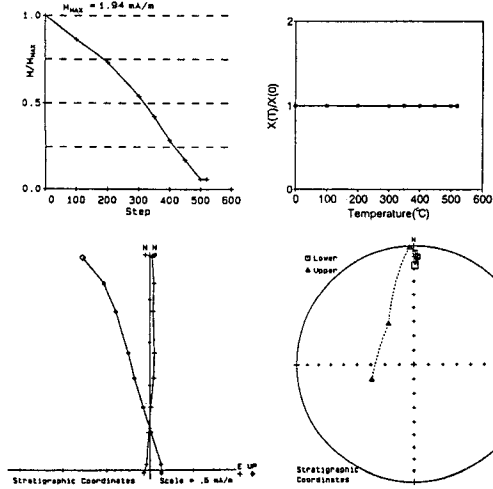
단계 증가에 따른 방향이 원점으로 소멸되지 않으나 Equal-Area Net 상에서 방향이 대원을 따라 이동하며 (Fig. 5), 이러한 양상을 보여주는 시료들은 대원을 따라 이동하는 부분에 대하여 McFadden and McElhinny (1988)의 Sector Constraints를 이용한 대원법을 적용하여 고온성

분을 추출하였다 (Fig. 6).

이상의 소자실험을 통하여 암석에 기록된 실험실의 자기장이나 현재 지구자기장 방향에 의한 점성성분 이외에 2방향의 고지자기 성분을 추출하였다. 이들 두 성분 중 자철석에 의한 580°C 이하에서 기록된 성분 (이하 A 성

29-4

NRM T100 T200 T300 T350 T400 T450 T500 T520



37-4

NRM T100 T200 T300 T350 T400 T450 T500 T520 T540 T560 T580 T600 T620 T640 T650

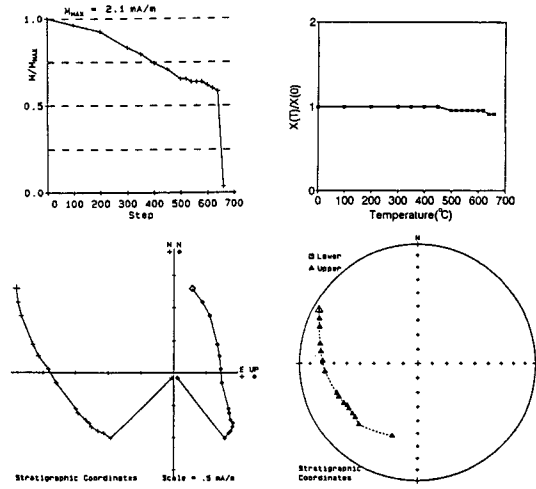


Fig. 5. Typical demagnetization results (normalized intensity curves, susceptibility curves, Zijderveld diagrams, and equal-area projections in stratigraphic coordinates) from samples of red sandstone, showing great circle migration of the direction during progressive demagnetization. Demagnetization steps are shown below sample number.

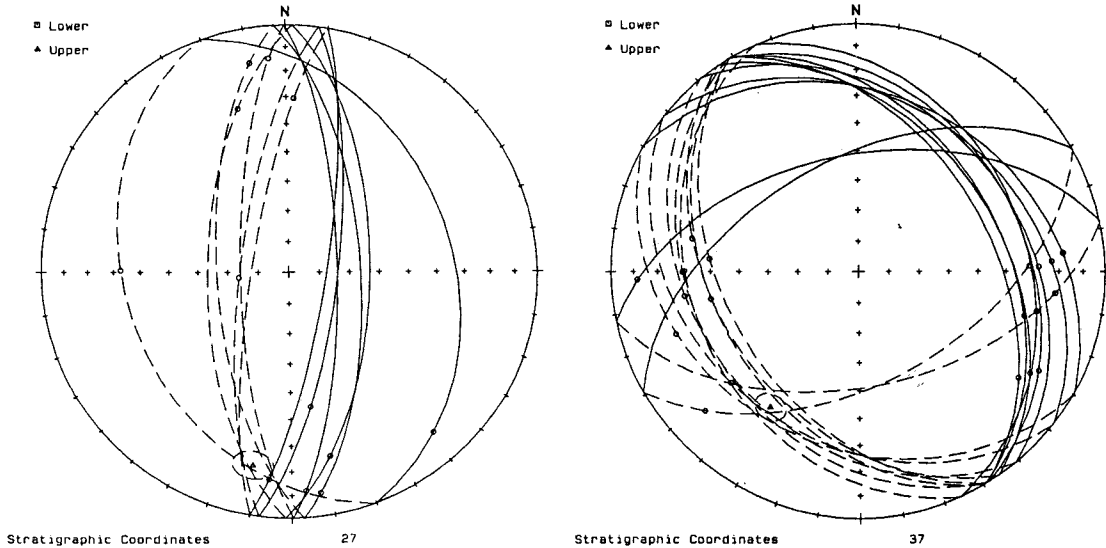


Fig. 6. Examples of great circle intersection with sector constraints.

분이라 칭함)은 지층경사보정 전에 NW 방향의 정자화를 보여주며 ( $D/I=58.8/55.5^\circ$ ,  $k=24.7$ ,  $\alpha_{95}=5.1^\circ$ ), 지층경사보정 후의 분산도가 보정전에 비하여 월등히 증가하여 ( $k_2/k_1=0.3$ ) 지층경사 후인 백운산 향사대 구조 형성 후에 획득된 성분임을 나타낸다 (Fig. 7).

580°C 이상의 소자단계에서 추출한 적철석에 의하여 기록된 고온성분 (이하 B 성분이라 칭함)은 9개의 노두

중 7개의 적색사암의 노두에서 관찰된다. B성분을 기록하는 7개 노두 중 경사보정 후의 노두별 평균값은 3개 노두들 (26, 29 및 43)은 정자화를, 4개 노두들 (25, 27, 37 및 41)은 역자화를 기록하고 있다 (Table 1). 이 정자화 및 역자화 성분은 통계학적으로 95%의 신뢰도를 갖으며 역전시험 (Reversal Test)을 통과하였다 (Fig. 8). B 성분의 노두별 평균값의 방향은 지층경사보정 후의 분산도가 보정

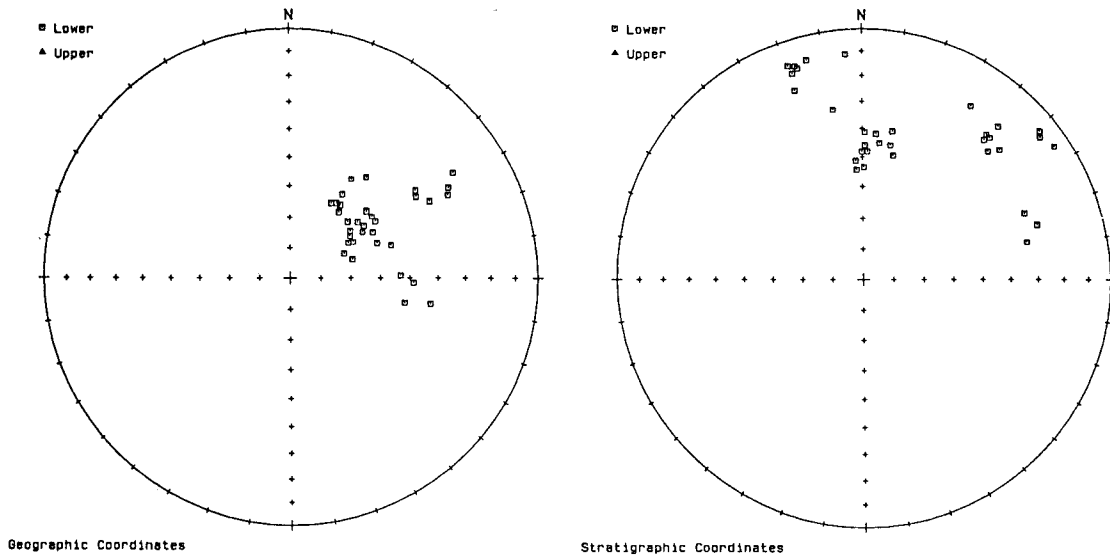


Fig. 7. Equal-area projections of ancient overprints (A component).

Table 1. Paleomagnetic Results from the Tonggo Formation in the Baekunsan Syncline of the Taebaek Area, South Korea.

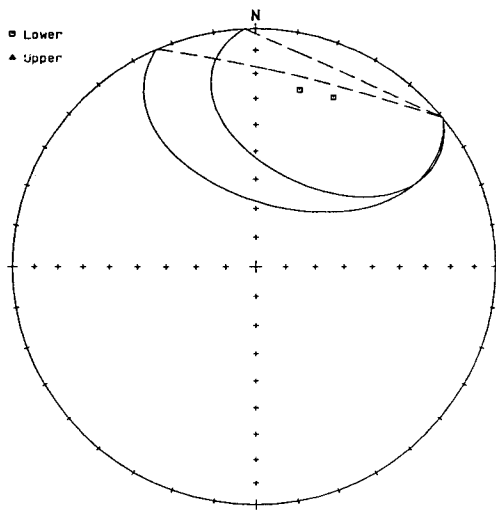
| Site      | n/N   | Dg               | Ig    | Ds             | Is    | k                            | $\alpha_{95}$ |                    |
|-----------|-------|------------------|-------|----------------|-------|------------------------------|---------------|--------------------|
| 25        | 10/10 | 222.3            | 62.3  | 176.4          | -4.5  | 16.3                         | 12.6          | D4, G6             |
| 26*       | 11/11 | 47.4             | 49.0  | 42.9           | 17.6  | 29.4                         | 8.6           | D11                |
| 27        | 6/8   | 183.7            | -55.1 | 191.3          | -21.2 | 242.8                        | 5.6           | G6                 |
| 29        | 8/10  | 8.7              | 53.6  | 354.3          | 13.9  | 297.4                        | 3.4           | D4, G4             |
| 37*       | 10/10 | 254.0            | -18.6 | 213.3          | -34.5 | 125.5                        | 4.8           | G10                |
| 41*       | 9/12  | 252.1            | 7.5   | 241.1          | -24.3 | 32.7                         | 9.1           | D9                 |
| 43        | 6/7   | 42.2             | 59.9  | 3.2            | 37.8  | 59.8                         | 8.7           | D6                 |
| Ave       | 4     | 22.5             | 38.4  |                |       | 2.1                          | 86.4          |                    |
| Pole      |       | long. = 306.1 °E |       | 1.1            | 19.4  | 26.4                         | 18.2          | ( $k_2/k_1=12.6$ ) |
|           |       |                  |       | lat. = 63.2 °N |       | $A_{95}=12.6^\circ$          |               |                    |
| Overprint | 33    | 58.8             | 55.5  |                |       | 24.7                         | 5.1           |                    |
| Pole      |       | long. = 201.5 °E |       | 18.6           | 33.2  | 7.4                          | 9.9           | ( $k_2/k_1=0.3$ )  |
|           |       |                  |       | lat. = 43.6 °N |       | $dp=5.2^\circ, dm=7.3^\circ$ |               |                    |

n/N; number of samples used in average/measured, Dg and Ig; declination and inclination in geographic coordinates, Ds and Is; declination and inclination in stratigraphic coordinates, k; Fisherian precision parameter ( $k_1$ ; in geographic coordinates and  $k_2$ ; in stratigraphic coordinates),  $\alpha_{95}$ ; radius of cone of 95% confidence interval, and D and G; number of direct observations and great circles, respectively.

\*; site means omitted in calculation of the mean (see text for explanation).

전에 비하여 감소하나 (Fig. 9), 역자화를 기록하는 노두들의 방향은 S에서 SW 방향으로 정자화를 기록하는 노두들의 방향은 N에서 NE 방향으로 배열되어 복각에 비하여 편각의 변화가 커서, 전체 노두들의 평균값 (지층 평균값, Formation Mean)은 비교적 높은 분산도를 갖는다 ( $\alpha_{95}=20.5^\circ$ ). 이러한 각 노두간의 평균방향의 분산 (특히, 편각의 분산)은 국지적 회전이 있었을 경우 흔히 나타나는

현상이다 (MacDonald, 1980). 연구지역의 노두 25와 다른 노두들의 위치를 고려할 경우, 국지적 회전은 연구지역 전역의 광범위한 지역에 걸쳐 일어난 현상이기 보다는 야외에서 인지하기 어렵거나 인지하지 못한 국부적 회전에 기인한 것임을 시사한다. 그러므로, 노두별 평균방향의 분포에서 노두 26, 37 및 41번의 평균값을 제외한 상호 쌍극축 (Dipolar Axis)을 이루고 있는 4개의 노두들 (25,



Stratigraphic Coordinates

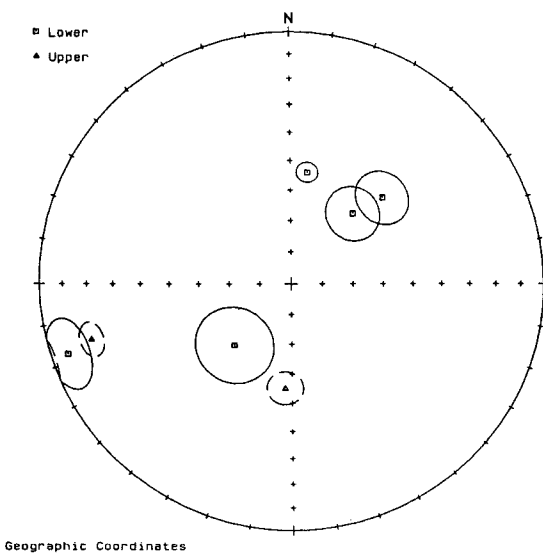
Fig. 8. Reversal test. The mean of each polarity population is calculated and one population is reversed for comparison with the other; 95% confidence circles are shown.

27, 29 및 43)을 이용하여 동고층의 평균값을 계산하였다 (Table 1). 이 4개의 노두들은 통계학적으로 99%의 신뢰도를 갖으며 지층경사시험 (Bedding Tilt Test)을 통과하고 ( $k_2/k_1=12.6$ , McElhinny, 1964), 단계적 경사보정에 따른 분산도의 변화도 경사보정 후가 최소값을 갖는다 (Fig. 10). 연구 대상 지층인 동고층은 백운산 향사대에 분포하는 평안누층군에 속하는 다른 지층들과는 달리 각

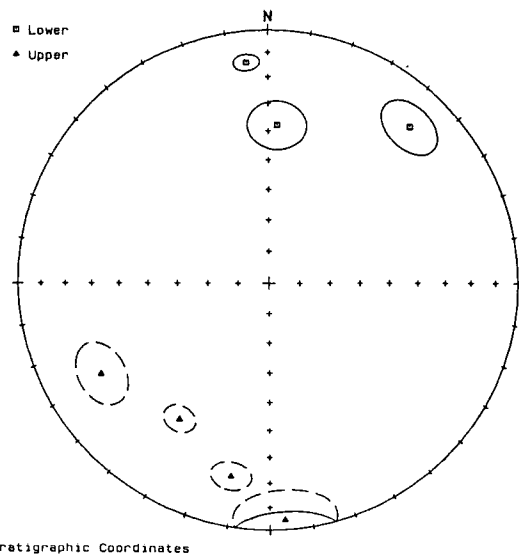
시료 채취장소에서 지층의 방향이 전형적인 습곡을 이루고 있지 못하여 McFadden and Jones (1981)가 지적한 바와 같이 McElhinny (1964)의 지층경사시험은 통계학적으로 유효하지 못할 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결한 새로운 지층경사시험 방법인 방향보정시험 (Direction-Correction Test, Enkin, 1992)을 본 연구 지층에 적용하였다. 방향보정시험은 종전의 방법과는 달리 각 노두에 대하여 지층경사보정에 의한 기대 편차값 (C)과 관측된 편차값 (D)을 비교하는 것으로, 지층경사 이전에 획득한 성분의 경우  $D/C=1$ 에 근사한 값을 갖으며 지층경사 이후에 획득한 성분은  $D/C=0$ 에 가까운 값을 나타낸다. 본 연구에 적용한 방향보정시험 결과는 7개 노두들 모두에서는  $D/C=1.265 \pm 0.489$ , 상호 쌍극축을 이루고 있는 4개의 노두들에서는  $D/C=1.110 \pm 0.283$ 으로 두 경우 모두 방향보정시험을 통과한다. B성분이 역전시험, 지층경사시험, 방향보정시험 및 단계적 경사보정시험을 모두 통과함은 이 성분이 백운산 향사대 구조가 형성되기 전인 지층경사 이전에 획득한 성분임을 시사하며, 이들의 평균방향 ( $D/I=1.1/19.4^\circ$ )으로부터 계산한 자극의 위치는  $306.1^\circ E, 63.2^\circ N$  ( $A_{95}=12.6^\circ$ )이다 (Table 1).

### 암석자기 결과

암석자기 연구로 Thermomagnetic 실험, 등온잔류자화 획득실험, 잔류자기력 ( $H_{cr}$ ) 측정 및 광석현미경 관찰을 수행하였다. 적색사암과 녹색사암은 서로 상이한 Thermo-



Geographic Coordinates



Stratigraphic Coordinates

Fig. 9. Site mean directions and 95% confidence circles of the B component.

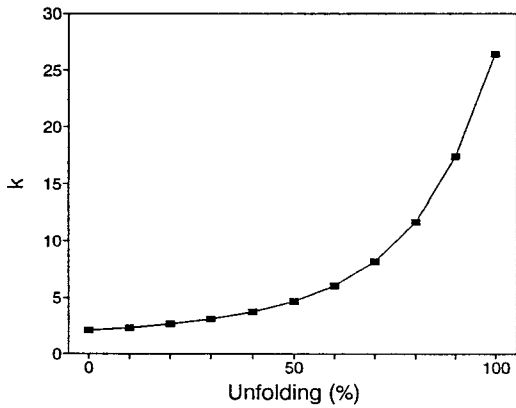


Fig. 10. Incremental fold test plotting Fisher's precision parameter (k) versus percent unfolding.

magnetic 실험 결과를 보여준다. 적색사암의 경우 (Fig. 11, 시료 25-1 및 26-1) 가열시 자화가 점차적으로 감소하여 적철석의 큐리온도에서 자화를 잃어버리고 냉각시 가열시와 유사한 형태로 자화를 획득하는 전형적인 적철석이 주 자성광물인 유형을 보여주며, 가열 및 냉각곡선의 형태로 상자성 광물의 영향이 있음을 알 수 있다. 또한, 100~150°C 사이에서 가열곡선의 기울기가 약간 변하는 것으로 보아 자성광물로 적철석 이외에 침철석 (Goethite) 이 함유되어 있음을 제시한다. 녹색사암은 (Fig. 11, 시료 28-1) 냉각곡선이 가열곡선을 교차하며 냉각시의 자화가 가열시에 비하여 매우 증가하고 150~300°C 사이에서 가열곡선의 기울기가 변하는 것으로 보아 온도증가로 인하여 합티탄자철석 (Titanomagnetite)이 자철석으로 전환됨을 제시하며, 가열곡선의 형태로 보아 합티탄자철석 이

외에 상자성광물의 기여가 있음을 알 수 있다. 또한, 550°C 이상에서의 가열곡선은 미량의 적철석이 존재함을 의미 하나, 높은 자기장하에서 측정된 대자율 (High-Field Magnetic Susceptibility,  $\chi_{HF}=0.033 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ )과 낮은 자기장하에서 측정된 대자율 (Low-Field Magnetic Susceptibility,  $\chi_{LF}=0.085 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ )의 비율이  $\chi_{HF}/\chi_{LF}=0.39$ 인 것을 고려하면 550°C 이상에서의 가열곡선은 주로 상자성광물에 기인한 것임을 제시한다.

등온잔류자화 획득실험 결과도 적색사암과 녹색사암이 상이한 결과를 보여준다 (Fig. 12). 적색사암은 (시료 25-1 및 37-1) 자기장의 강도가 증가함에 따라 등온잔류자화의 값이 계속 증가하며 1T의 자기장에서도 포화상태에 도달하지 않아 주 자성광물이 적철석과 같은 불완전 반강자성 광물임을 제시한다. 녹색사암의 경우는 (시료 10-2, 28-1 및 28-3) 300 mT 이하에서 완전한 자기적 포화상태에 도달하지는 못하지만 90% 내외의 포화상태에 도달하여 켈리자성 광물과 더불어 불완전 반강자성 광물이 함유되어 있으나, 불완전 반강자성 광물의 함량이 켈리자성 광물에 비하여 매우 적음을 시사한다. 이러한 결과는 잔류자기력 측정결과와도 일치한다 (Table 2). 일반적으로 순수한 켈리자성 광물은  $H_{cr}$ 이 50 mT 이하의 값을 갖고, 순수한 불완전 반강자성 광물은 200 mT 이상의 값을 갖는다 (Thompson et al., 1980). Table 2에서 나타나는 것과 같이 적색사암 시료들의  $H_{cr}$ 은 400 mT 이상의 값을 보여주어 시료내에 함유된 주 자성광물이 불완전 반강자성 광물임을 나타내고, 녹색사암 시료들의  $H_{cr}$ 은 60 mT 이하로 주 자성광물이 켈리자성 광물임을 제시한다. 동일시료들의 광석현미경 관찰에 의하면 적색사암은 5~80  $\mu\text{m}$  크기의

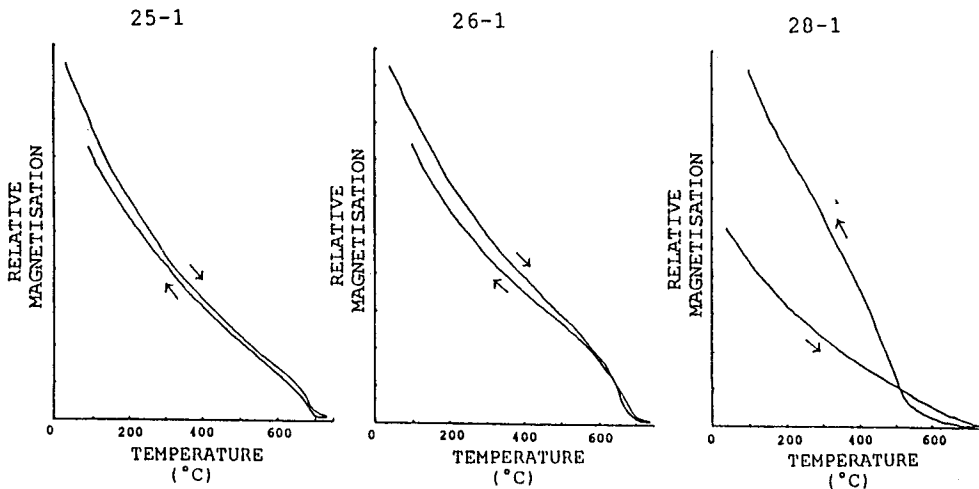


Fig. 11. Thermomagnetic curves in air for representative samples.



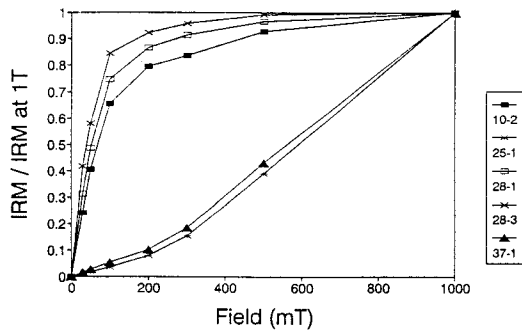


Fig. 12. Isothermal remanent magnetization acquisition curves for selected samples.

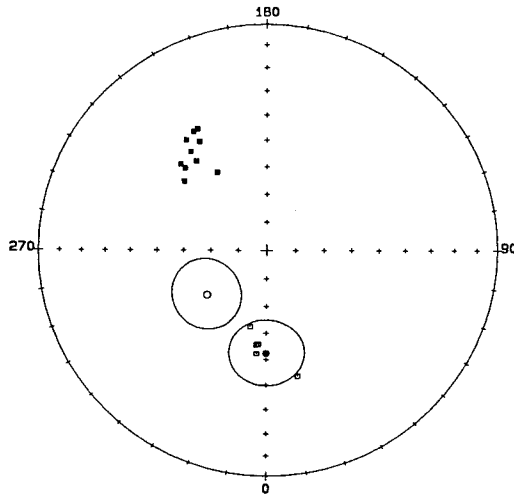


Fig. 13. Paleopoles for the North (open squares) and South China (closed squares) Blocks of Lower Triassic results as defined by quality selected poles (Enkin et al., 1992) and compared with the Lower Triassic pole of this study, plotted both adjusted for local tilt (open circle) and corrected for the regional clockwise rotation (closed circle) recognized from the overprint (A component).

적철석과 미량의 자철석이 산출되며, 녹색사암에서는 5 μm 내외의 자철석 및 극소량의 적철석이 관찰되어 암석자기 실험결과들과 일치한다.

고찰 및 결론

평안충준의 동고층은 Otofujii et al. (1989)에 의하여 고지자기 연구가 수행된 바 있다. 이 연구에서는 동고층의 1개 노두에서만 채취한 시료에서 현재 지구자기장 방향으로 재자화된 성분만 추출하였으며, 이성분은 자류철석

Table 2. Coercivity of remanence ( $H_{cr}$ ) of selected samples.

| Rock type       | Sample Number | $H_{cr}$ (mT) |
|-----------------|---------------|---------------|
| Red Sandstone   | 25-1          | 636.4         |
|                 | 26-1          | 443.5         |
|                 | 37-2          | 585.2         |
| Green Sandstone | 27-1          | 59.9          |
|                 | 28-3          | 45.7          |
|                 | 29-1          | 34.9          |
|                 |               |               |

(Pyrrhotite)에 의하여 기록된 성분으로 결론을 내렸다. 이들이 채취한 시료의 암상에 대하여는 언급이 되어 있지 않으나, 본 연구에서 수행된 동고층 시료들 중 녹색사암 시료들은 자화강도가 매우 낮거나 현재 지구자기장 방향으로 재자화되어 Otofujii et al.의 결과와 동일한 양상이 관찰된다. 그러나, 적색사암의 경우는 단계적 열소자시 2-3 성분을 보여주어 과거의 지구자기장 방향을 추출할 수 있었다. 이들 중 적철석에 기록된 고온 성분인 B 성분은 각각 통계학적으로 99% 및 95%의 신뢰도를 갖는 지층 경사시험과 역전시험을 통과할 뿐더러 방향보정시험 및 단계적 경사보정시험을 통과하여, B 성분이 백운산 향사대가 형성되기 전인 지층퇴적 직후에 기록된 후기퇴적(Post-Depositional) 혹은 초기 속성작용시에 획득한 화학속성(Early Chemical Diagenic) 기원의 성분을 제시한다. 각 노두별 B 성분은 북각에 비하여 편각의 변화가 크며 이들 방향의 위치는 Equal-Area Net상에서 거의 수직축을 중심으로한 원호를 따라 분포하여 (Fig. 9) 야외 조사시 인지하지 못한 국부적 회전운동이 연구지역에 있었음을 제시하며, 이러한 현상은 동아시아 대륙의 고지자기 연구에서 흔히 나타나는 현상이다 (Enkin et al., 1992). B 성분으로부터 계산한 연구지역의 고위도는 10°N으로 연구지역이 본 지층의 퇴적시기인 트라이아스기 초에는 적도부근에 위치하고 있었다.

95%의 통계학적 신뢰도로 지층경사시험을 통과하지 못한 A 성분은 경사보정 전의 방향이 비교적 분산되었으나 편각의 분산도와 북각의 분산도가 거의 일치하여 (Fig. 7), 이 성분에는 국지적 회전에 의한 영향이 없거나 적음을 제시한다. A 성분의 기원은 쥬라기에서 백악기 초에 걸쳐 일어나 대보조산운동과 관련시켜 생각할 수 있다. 쥬라기에서 백악기 초 (Pre-Barremian)의 지구 자기장 방향은 거의 유사한 기간의 정자화기와 역자화기가 반복되어 나타나는 시기로 (Harland et al., 1990), 만약 A 성분이 대보조산운동이 일어난 쥬라기에서 백악기 초에 획득한 성분이라면 정자화와 역자화를 모두 기록하고 있어야 하

나, 측정된 A 성분은 모두 정자화이므로 이 성분이 쥬라기 이후의 정자화가 장기간 지속된 기간 중에 획득한 성분임을 시사한다. 또한, A 성분의 분산도가 지층경사보정 후에 비하여 보정 전이 낮은 것은 본 성분이 쥬라기에서 백악기 초에 걸쳐 일어난 대보조산운동에 의한 연구지역의 습곡작용이 일어난 후에 획득된 성분임을 나타낸다. 이러한 사실들은 A 성분은 대보조산운동 말기 혹은 직후의 정자화가 장기간 지속된 기간인 Cretaceous Normal Superchron (CNS) 동안에 획득한 성분임을 제시한다. A 성분은 대보조산운동시 관입한 대보조화강암체로부터 전달된 열에 의한 부분 열잔류자화 (Partial Thermoremanence) 혹은 대보조산운동시 백운산 향사대의 북동부에 발달된 Nappes의 증점으로 인한 조산유체 (Orogenic Fluid)의 이동에 기인한 화학잔류자화 (Oliver, 1986)에 의하여 획득되었을 것이다. 그러나, A 성분이 자철석의 큐리온도 이하에서 관찰되는 사실은 본 성분의 기원이 자철석에 의한 부분 열잔류자화임을 제시한다.

A 성분의 방향 ( $D/I=58.8/55.5^\circ$ )과 기존에 연구된 한반도내의 비교적 안정된 육괴인 영남육괴에 분포하는 CNS 기간에 잔류자화를 획득한 것으로 보고된 백악기의 하양층군의 방향 ( $D/I=29.3/59.4^\circ$ , Otofujii et al., 1986;  $D/I=29.5/57^\circ$ , Lee et al., 1987)은 북각은 상호 유사한 값을 갖는 반면에 편각은 약  $30^\circ$ 의 차이를 보여준다. 이러한 편각의 차이는 두 방향이 서로 다른 시대의 지구자기장 방향을 기록하고 있음을 제시할 수도 있지만, 본 연구의 A 성분이 모두 정자화를 기록하고 타 연구의 자료도 일부 극소수의 시료를 제외한 모든 시료들이 정자화를 기록하고 있는 사실은 두 방향이 모두 CNS의 지자기 방향을 나타낸다. 현재 백운산 향사대의 주 축은 동-서 방향으로 위치하고 있으며, 이 방향은 옥천대의 주 방향과 약  $30\sim 40^\circ$  정도의 차이를 이루고 있다. 또한, 옥천대 내의 타지역에 분포하는 평안누층군의 분포 방향은 백운산 향사대의 주 축 방향과는 달리 옥천대의 주 방향과 평행하게 분포하고 있다 (Fig. 1). 이러한 사실을 고려하면, 백운산 향사대도 옥천대 내의 다른지역에 분포하는 평안누층군과 같이 옥천대의 주 방향과 평행하게 발달되었으나, 그 이후에 현재의 동-서 배열방향인 시계방향으로 약  $30\sim 40^\circ$  회전되었을 가능성을 제시한다. 이러한 시계방향의 회전각은 본 연구의 A 성분과 Otofujii et al. (1986) 및 Lee et al. (1987)에 의하여 경상분지의 하양층군에서 추출한 백악기 성분 사이의 편각차이인 약  $30^\circ$ 와 잘 일치하여 연구지층이 백악기의 A 성분을 획득한 이후에 연구지역인 백운산 향사대가 시계방향으로 약  $30^\circ$  회전되었음을 시사한다.

Fig. 13은 B 성분으로부터 계산한 연구지역의 트라이

아스기 초 고지자기극 위치와 동일 시기의 남중국 및 북중국지괴의 고지자기극의 위치를 비교한 그림이다. 본 연구의 A 성분에서 제시된 시계방향의 회전을 고려하지 않더라도 본 연구의 자극위치는 남중국의 자극위치와는 아주 동떨어져 있으며, 북중국의 자극위치와 근접하여, 적어도 연구지역이 트라이아스기 초에는 북중국지괴와 동일지괴이거나 북중국지괴와 매우 유사한 위치에 있었음을 제시한다. 더욱이 A 성분 및 옥천대 내에서 백운산 향사대의 배열방향에서 제시된  $30^\circ$ 의 시계방향으로의 회전에 대한 보정을 B 성분에 적용하면, B 성분의 평균값은  $D/I=331.1/19.4^\circ$ 이며, 이로부터 계산한 고지자기극의 위치는  $0^\circ E, 52.4^\circ N$ 으로, 동일 시대의 북중국 고지자기극의 위치와 거의 정확히 일치하여 연구지역이 이 시기에 북중국지괴와 동일지괴였음이 더욱 명확하다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 및 전략광물자원연구센터의 지원으로 저자가 영국 Liverpool 대학교의 Geomagnetism Laboratory를 방문한 연구년 기간동안 수행 되었으며, 실험 및 연구결과에 대하여 많은 도움을 준 J.D.A. Piper 교수께 감사드린다. 또한, 야외작업을 도와 준 이동우 교수 및 황창수 군과 자료처리 컴퓨터 프로그램을 제공한 R.J. Enkin 박사께도 감사를 드린다.

## 참고문헌

- 김광호, 김두수 (1991) 대구-경주 일대에 분포된 채약산층, 건천리층 및 주사산층의 지자기층서. 지질학회지, 27권, p. 40-51.
- 김광호, 남기상, 이정후 (1990) 한국 쥬라기의 고지자기. 지질학회지, 26권, p. 513-526.
- 김광호, 정봉일 (1986) 페름기 이후 한국의 고지자기에 관한 연구. 광산지질, 19권, p. 67-83.
- 김인수 (1989) 영월-마차라-정선일대의 캄브리아-페름기 퇴적암에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 25권, p. 413-428.
- 김인수, 강희철 (1989) 어일분지 일대에 분포하는 제 3기층에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.
- 도성재, 박찬호, 지세정, 최선규 (1990) 경상북도 의성 일대에 분포하는 백악기 지층의 자기층서. 지질학회지, 26권, p. 594-595.
- 민경덕, 원종선, 황석연 (1986) 제주도에 분포하는 화산암류 및 퇴적암류에 대한 고지자기 연구. 광산지질, 19권, p. 153-163.
- 민경덕, 이운수, 김원균 (1990) 문경 지역에 분포하는 대동누층군에 대한 고지자기연구 (I). 광산지질, 23권, p. 81-87.
- 박찬호, 도성재, 민경덕 (1991) 의성지역에 분포하는 백악기 지층에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 27권, p. 549.
- 원종관, 이희영, 지정만, 박용안, 김정환, 김형식 (1989) 지질학 원론. 우성문화사, 서울, 662p.

- Cluzel, D. and Cadet, J. (1992) Geodynamic evolution of Korea: A view. *The Island Arc*, v. 1, p. 64-70.
- Enkin, R.J. (1992) The direction-correction test: An all-purpose fold test for paleomagnetic studies. *Paleomagnetic Pow Wow 1992*, Birmingham Univ.
- 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. *Jour. Geophys. Res.*, v. 97, p. 13,953-13,989.
- 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.
- Ito, H. and Tokieda, K. (1980) An interpretation of paleomagnetic results from Cretaceous granites in South Korea. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, v. 32, p. 275-284.
- Kienzle, J. and Scharon, L. (1966) Paleomagnetic comparison of Cretaceous rocks from South Korea and late Paleozoic and Mesozoic rocks of Japan. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, v. 18, p. 413-416.
- Kim, K.H. and Van der Voo, R. (1990) Jurassic and Triassic paleomagnetism of South Korea. *Tectonics*, v. 9, p. 699-717.
- Kirschvink, J.L. (1980) The least square line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. Jour. Roy. astr. Soc.*, v. 62, p. 699-718.
- Lee, D.S. (1987) *Geology of Korea*. Kyohak-Sa Publishing Co., Seoul, 514p.
- 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. *Jour. Geophys. Res.*, v. 92, p. 3,580-3,596.
- MacDonald, W.D. (1980) Net tectonic rotation, apparent tectonic rotation and the structural tilt correction in paleomagnetic studies. *Jour. Geophys. Res.*, v. 85, p. 3,659-3,596.
- McElhinny, M.W. (1964) Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. *Geophys. Jour. Roy. astr. Soc.*, v. 8, p. 338-340.
- McFadden, P.L. and McElhinny, M.W. (1988) The combined analysis of remagnetization circle and direct observation in paleomagnetism. *Earth Planet Sci. Lett.*, v. 87, p. 161-172.
- McFadden, P.L. and Jones, D.L. (1981) The fold test in paleomagnetism. *Geophys. Jour. Roy. astr. Soc.*, v. 67, p. 53-58.
- Oliver, J. (1986) Fluids expelled tectonically from orogenic belts; Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena. *Geology*, v. 14, p. 99-102.
- Otofujii, Y., 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. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, v. 38, p. 387-402.
- Otofujii, Y., Katsuargi, K., Inokuchi, H., Yaskawa, K., Kim, K.H., Lee, D.S. and Lee, H.Y. (1989) Remagnetization of Cambrian to Triassic sedimentary rocks of the Paegunsan Syncline of the Okch'on Zone, South Korea. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, v. 41, p. 119-135.
- Shibuya, H., Min, K.D., Lee, Y.S., Sasajima, S. and Nishimura, S. (1985) Some paleomagnetic measurements in Korean Peninsula. In Nishimura, S. and Min, K.D. (eds.) *Physical Geology of Central and Southern Part of Korea*. Kyoto University Press, Kyoto, p. 41-84.
- Shibuya, H., Min, K.D., Lee, Y.S., Sasajima, S. and Nishimura, S. (1988) Paleomagnetism of Cambrian to Jurassic sedimentary rocks from the Ogcheon Zone, southern part of Korean Peninsula. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, v. 40, p. 1,469-1,480.
- Thompson, R., Bloemendal, J., Dearing, J.A., Oldfield, F., Rumery, T.A., Stober, J.C. and Turner, G.M. (1980) Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, v. 207, p. 481-486.
- Zijderveld, J.D.A. (1967) AC demagnetization of rocks: Analysis of results. In Collinson, D.W., Creer, D.W. and Runcorn, S.K. (eds.) *Method in Paleomagnetism*. Elsevier, Amsterdam, p. 254-286.