

浦港盆地에 分布하는 延日層群의 古地磁氣 研究

김광호* · 도성재** · 황창수** · 임동성*

Paleomagnetic Study of the Yeonil Group in Pohang Basin

Kwang Ho Kim*, Seong-Jae Doh**, Chang-Soo Hwang** and Dong Seong Lim*

ABSTRACT: Paleomagnetic investigations have been carried out on the Tertiary sedimentary formations (Yeonil Group) in Pohang basin, southeastern Korea. A total of 215 samples were collected from 26 sites. Progressive thermal demagnetization indicates that many samples have unstable magnetization and do not reveal a characteristic direction. However, some samples from the lower and upper Duho Formation show a characteristic direction $D/I=7.8^\circ/48.3^\circ$ ($\alpha_{95}=3.7^\circ$, $k=174.1$). Stepwise thermal demagnetization data show that some samples from the Hageon and middle Duho Formations reveal great-circle distributions moving from the present to a reversed direction of geomagnetic field. The mean of intersection points of the great-circles is nearly antipodal to the characteristic normal direction of the lower and upper Duho Formation. We infer that the Hageon Formation was formed during the reversed polarity chron C5B (16.2~14.7 Ma) and the Duho Formation 14.7~11.6 Ma based on our results and previous paleontologic and age dating data. Paleomagnetic direction for the Middle Miocene of Korea, analysed from the combined results of stable endpoints and great circles, is $D/I=8.7^\circ/53.9^\circ$ ($\alpha_{95}=4.2^\circ$, $k=74.8$), and the corresponding paleopole is Lat./Long.= $82.7^\circ/230.2^\circ$ ($\delta p=2.8^\circ$, $\delta m=5.9^\circ$). On the basis of this, we interpret that the opening of the East sea (Japan sea) or the synchronous clockwise rotation of the Southwest Japan exerted no structural influence on the Yeonil Group in the Middle Miocene.

서 언

고지자기는 자기층서 또는 지괴의 충돌, 확장, 단층 등이 일어난 지역의 지구조운동 등 지질학적 여러 문제를 연구하는데, 특히 고생물학 및 층서학적 연구결과와 결합될 때, 중요한 자료와 정보를 제공해준다. 지구조적연구 (Lallemant and Jolivet, 1986)에 의하면 일본열도는 상부올리고세~하부마이오세에 장력으로 인하여 동아시아로부터 떨어져 나오기 시작해서 (pull-apart) 하부마이오세 말~중부마이오세 동안 back-arc spreading에 의해 Yamato 분지와 Tsushima 분지가 형성되었다고 하였다. 동해 (일본해)의 형성에 대한 최근의 고지자기연구 (Otofujii and Matsuda, 1983; 1984; Otofujii et al., 1985; Otofujii et al., 1991)는 남서일본이 약 16 Ma에 경도 $129^\circ E$, 위도 $34^\circ N$ 을 회전중심으로 시계방향의 회전을 시작하여 약 14 Ma에 끝났음을 보고하였다. 위의 연구결과는 서남일본이 올리

고세 또는 마이오세에 한반도로부터 분리되었음을 의미하므로 일본열도의 분리가 우리나라 동남부 해안을 따라 분포하는 동시기의 제 3기층의 지질구조에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 우리나라 신생대 제 3기층은 주로 한반도의 동남부 해안을 따라 포항분지, 장기분지, 어일분지 등에 분포한다. 신생대 제 3기 지층에 대해서 지금까지 고생물학적 층서학적 연구가 주종을 이루어왔다 (Tateiwa, 1924; Kim, 1965; Yoon, 1975; Yun, 1986; Yun et al., 1991; 그의 여러 명). 반면에, 이에 대한 고지자기는 소수의 고지자기 연구자들에 의해서 연구되었다 (Kim, 1965; Kienzle, 1968; Shibuya et al., 1985; Kim et al., 1986; 김인수, 강희철, 1989; Han, 1989; 민경덕, 1992). 장기분지와 어일분지에 분포하는 화산암류를 대상으로 고지자기 및 연대측정 연구를 실시한 결과 중기 마이오세 (Middle Miocene) 이후 화산암류들의 특성자화가 대부분 시계방향으로 $40\sim 50^\circ$ 회전하였음을 보고하였고 (Kim et al., 1986; 김인수, 강희철, 1989; Han, 1989; 민경덕, 1992), 이들 화산암류로부터 구한 마이오세의 회전방향과 회전각이 서남일본의 동시대 지층으로부터 구한 것들과 유사함에 관계자들의 흥미와 관심을 끌었다. 연일층군은 여러 연구자

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

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

들이 퇴적 시기를 보고하였으나 (Tateiwa, 1924; Kim, 1965; 전희영, 1982; Bong, 1984; Koh, 1986; Yun, 1986; 이현구 외, 1992; 그 외), 연구자와 이용한 화석에 따라 그 시기를 약간씩 다르게 보고하였다. 예를들면, Koh (1986)는 규질편모충류와 조미화석에 관한 미고생물학적 연구에서 포항분지 연일층군의 지질시대를 중부마이오세 (Middle Miocene)에서 상부마이오세 초 (Early Late Miocene)라 하였고, Yun (1986)과 이현구 외 (1992)는 조미화석 연구결과를 이용하여 하부마이오세 말로부터 중부마이오세 말에 걸쳐 퇴적된 지층이라 하였다.

본 연구에서는 형산강 북쪽의 포항분지에 분포하는 신생대 제3기 퇴적층인 연일층군에 대한 고지자기 자료를 제시하고, 이를 토대로 지층의 시기를 추정하며, 아울러 올리고세 혹은 마이오세 동안에 일어난 동해의 형성과 일본열도의 회전이 포항분지의 퇴적층의 지질구조에 영향을 주었는지의 여부를 논의하려한다.

지질 및 시료채취

한반도 동남 해안의 포항분지에는 백악기의 암류를 기반암으로 신생대 제3기층이 분포하고 있다. Tateiwa (1924)는 이 제3기 퇴적층을 연일층군이라 하였고 그후의 연구자들은 연일층군을 서로 약간씩 다르게 층을 세분하고 층명도 달리하였다. 예를들면, Yun (1986)은 연일층군을 하부로부터 천북역암층, 학전층, 두호층으로 세분하였고 Choe and Chough (1988)은 천북층, 학림층, 흥해층, 및 두호층으로 분류하였다 (Table 1). Table 1은 기존에 제시된 엄상호 외 (1964), Kim (1965), Yun (1986), 및 Choe and Chough (1988)에 의한 층서를 비교하였으며, 본 연구에서는 연속적으로 퇴적된 지층에서는 층의 이름이나 세분된 층의 수가 문제가 되지 않으므로 다른 분류에 비해 비교적 단순한 Yun (1986)의 지질도와 층명을 이용하였다 (Fig. 1; Table 1). 일반적으로 포항분지의 해양퇴적층은 $N10^{\circ} \sim 20^{\circ}E$ 의 주향과 동쪽으로 10° 미만의 경사를 보이거나 장소에 따라 변하며 대체로 남북방향의 축을 가진 완만한 습곡을 보이고 있다.

천북역암층은 연일층군의 기저로서 백악기의 기반암 위에 부정합적으로 놓여있고 주로 역암층으로 되어있으나 사암 또는 이암이 협재한다. 역암층에 협재하는 사암이나 이암이 심히 변질되고 또 쉽게 부스러져서 천북역암층으로부터는 고지자기 측정용 시료를 채취하지 못하였다. 연속적으로 천북역암층 위에 퇴적된 학전층은 주로 사암 혹은 이암으로 구성되어 있다. 학전층에서는 10개 장소 (site)에서 51개의 block 혹은 core형 시료가 채취되었다.

학전층의 노두가 대부분 변질되어 있어 연속적으로 고지자기 시료를 채취할 수 없었으나, 학전층의 하부로부터 상부에 이르기까지 가능한한 고르게 분포하도록 시료 채취장소를 선정하였다 (Fig. 1). 암상이 서서히 변하면서 학전층 위에 미세한 층리의 이암으로 된 두호층이 퇴적되어 있다. 두호층으로부터는 16개 장소에서 164개의 block 혹은 core형 시료가 채취되었다 (Fig. 1). 학전층에 비하여 두호층은 비교적 잘 고화되어 있어 시료 채취가 쉬웠다. 시료채취는 휴대용 착암기를 이용한 방법과 block sampling법을 병용하였다.

고지자기측정 및 결과

시료는 영국 Liverpool 대학 지자기실험실의 측정한계 $1 \times 10^{-9} \text{ Am}^2/\text{kg}$ 인 3축 Cryogenic 자력계로 측정되었으며, 모든 실험은 자기장의 세기가 25 nT 이하인 공간내에서 수행되었다. 교류소자에 의해서는 자화의 세기가 효과적으로 감소하지 않았으므로 대부분의 시료들은 단계적으로 열소자 되었으며, 그 결과는 직교소자도 (Zijderveld, 1967)와 등면적투영도 (equal-area net)에 표시한 후 Principal Component Analysis기법 (Kirschvink, 1980)을 이용하여 분석하였다. 일부 시료들의 단계적 소자자료는 등면적투영도상에서 대원상으로 이동하므로 이러한 자료는 Halls (1976)의 대원분석기법에 의해서 분석되었다. 열소자시 많은 시료가 $400 \sim 450^{\circ}C$ 이상의 온도에서 자화강도가 매우 낮아지거나 대자율이 증가하면서 (Fig. 2) 분산된 방향을 보였으나, 두호층의 일부시료는 직교소자도의 원점을 향하는 안정종점방향 (stable-endpoint direction; SED)을 보였다. 학전층의 모든 시료는 SED을 보이지 않았으나 단계적 소자에 따라 vector의 끝점이 대원상으로 이동하므로 Halls (1976)의 기법으로 자료를 분석하였다. 두호층의 경우에는 SED를 보이는 시료가 많았으나 일부 시료는 학전층과 같이 대원상의 소자경로를 보이므로, Bailey and Halls (1984)의 방법에 따라 SED와 대원분석 자료를 종합하였다. 많은 시료들이 자화의 강도가 낮고 단계적 소자자료의 분산이 심하였으며 (예, Fig. 3의 P12-2-2), 일부 장소로부터는 전혀 의미있는 자료를 구할 수 없었으므로 (예, 학전층의 TA5, 두호층의 P12), 본 연구 결과에서 제외하였다. 연구 결과는 Table 2에 요약되어 있으며 아래에서 각 층별로 논의하였다.

두호층

두호층 상부의 시료 (채취지점; P14, P15, P16)와 두호층

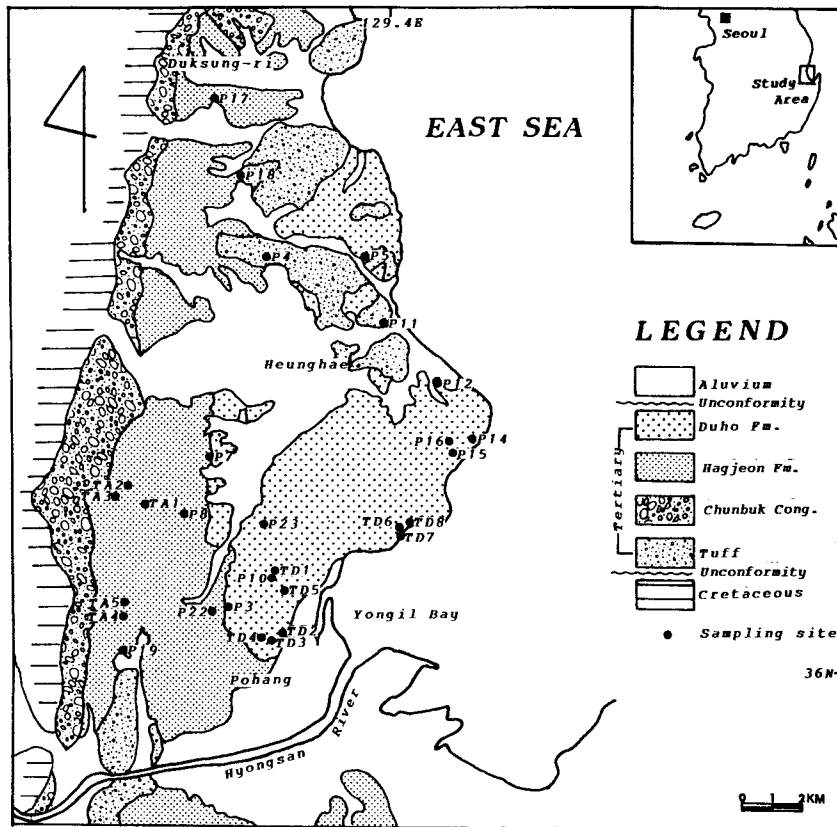


Fig. 1. Generalized geologic map of the Pohang Basin north of the Hyongsan River (after Yun, 1986), showing locations of paleomagnetic sampling sites (solid circles).

Table 1. Miocene stratigraphy of the Yeonil Group in Pohang area with number of sites.

| | Um et al. (1964) | Kim (1965) | Yun (1986) | Choe & Chough (1988) |
|--------------|---------------------|-----------------|--|-------------------------|
| Yeonil Group | Yonam Fm. | Oomockdong Fm. | Duho Fm.(16 sites) Finely laminated mudstone with thin layers of sandstone. Maximum thickness 300 m. | Duho Fm. |
| | Duho Fm. | Pohang Fm. | | |
| | Idong Fm. | Eedong Fm. | | |
| | Hunghae Fm. | Daegock Fm. | Hagjeon Fm.(10 sites) Sandstone and mudstone with intercalated conglomerate and sandstone Maximum thickness 380 m. | Hunghae Fm. |
| | Hakrim Fm. | Songhacdong Fm. | | Hakrim Fm. |
| | Chunbuk Conglo. | Seoam Conglo. | Chunbuk Conglo. Fm. Conglomerate with intercalated sandstone and mudstone Maximum thickness? | Chunbuk Fm. |

하부의 시료 (채취지점; P3, P23, P10, TD1~5)들은 오늘날의 축상 쌍극자 자기장에 가까운 정자극기의 특징적 방향을 보인다 (Fig. 3). 일부의 시료를 제외하고 (Fig. 3의

P3-3-1) 거의 모든 시료가 200°C 혹은 400~450°C 의 온도에서 자화강도가 낮거나 대자율과 자화세기의 증가를 보이며 방향이 일관성 없이 변하였다 (Fig. 3의 TD2-2-1).

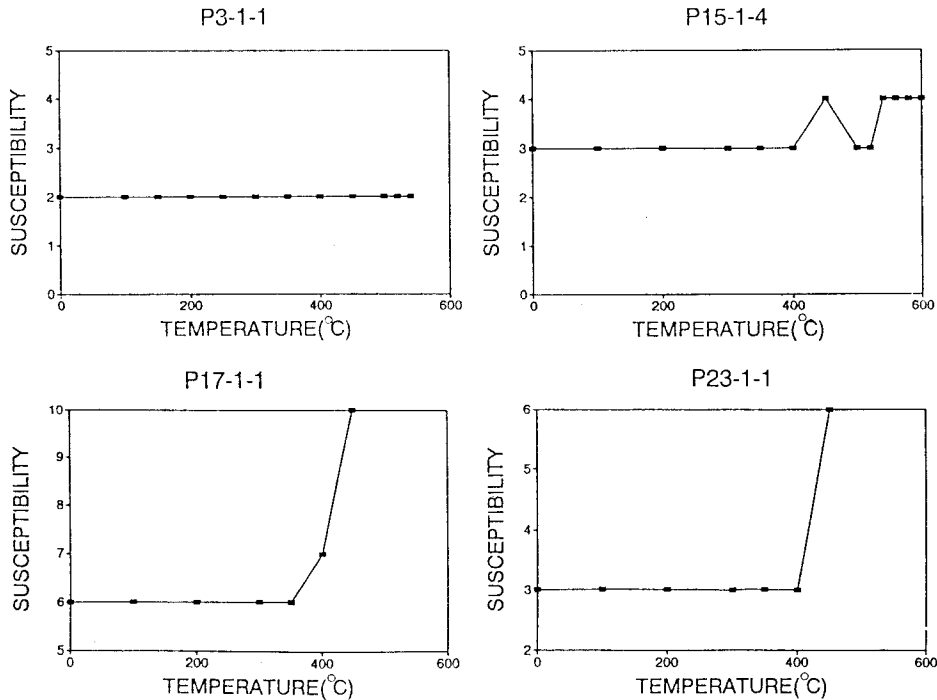


Fig. 2. Susceptibility curves for representative samples. Many samples showed increased susceptibility after 400°C thermal steps.

총서적으로 두호층의 중간 부분의 시료 (채취지점; P5, TD 6~8)들의 경우 단계적 소자자료들이 적교소자도의 원점을 향하는 SED의 특징적 방향을 보이지 않고 오늘날의 자기장 방향 (pdf)으로부터 점차 대원상을 따라 멀리 이동하였다 (Fig. 4). 7개의 시료가 이러한 경향을 보이며 그중 P5-1-1은 거의 역자극기의 방향까지 접근하였다. 대원들의 교점이 구하고자 하는 이동의 종점방향인데, 본 연구에서는 대원들을 Halls (1976)의 방법으로 분석하였다 (Fig. 5). 7개의 시료가 그리는 대원들의 극들 (작은 삼각형들)은 또 대원상에 분포하는데 이 대원의 극이 구하고자 하는 종점방향이다 (큰 삼각형). 이러한 방법으로 구한 방향은 지층의 경사보정 후의 편각/복각=196.0°/-59.5° (α_{95} =3.0°, k=1612.1)으로 역자극기의 방향이며, 경사보정전 α_{95} =10.5°, k=152.6에 비해서 방향의 집중도가 증가하여 positive tilt test가 성립한다 (Table 2, Fig. 5).

두호층 상부와 하부의 시료들로부터 구한 특징적 방향들과 두호층 중부의 시료들이 그리는 대원들의 극들을 Bailey and Halls (1984)의 방법으로 종합하면 두호층 전체의 경사보정 후 편각/복각=8.0°/52.1° (α_{95} =4.0°, k=103.9)이며 경사보정 전에 비하여 방향의 집중도가 뚜렷하게 증가하여 (k_2/k_1 =2.87) 99%의 신뢰도를 갖고 통계

학적으로 의미있는 positive tilt test가 성립한다 (McElhinny, 1964) (Table 2).

학전층

학전층의 시료들은 단계적 소자에서는 대부분 시료들의 잔류자기 방향이 불규칙하게 방향이 변화했으나, TA2, TA3, P17, P8, P18의 7개 시료들은 오늘날의 자기장 방향으로부터 점차 대원상을 따라 멀리 이동해 감을 보였다 (Fig. 6). 역자극기의 특징적 방향을 보이는 시료는 없었으나, P18-2-1이 300°C에서 역전된 방향을 보인 점과 대원상의 이동방향으로 보아, 이동의 종점은 역자극기의 방향일 것이다. 두호층에서와 같이 7개의 시료가 그리는 대원의 교점에서 구한 경사보정 전의 방향은 편각/복각=192.7°/-60.9° (α_{95} =15.0°, k=51.1)이며, 경사보정 후에는 189.3°/-63.7° (α_{95} =14.4°, k=56.3)이며 (Fig. 5; Table 2), 경사보정 후에 방향의 집중도가 보정전에 비하여 약간 증가한다.

암석자기 측정 및 결과

岩石磁氣 측정으로는 Thermomagnetic 실험 및 磁氣履

Table 2. Paleomagnetic results from the duho and Hageon Formations with number of sites indicated.

| Site | Bedding attitude (Str./Dip) | N/n | Characteristic direction | | Great circles | | Polarity |
|-----------------------------|-----------------------------|-------|---|--|--|--|----------|
| | | | D/I _{in-situ} | D/I _{tilt-corr.} | D/I _{in-situ} | D/I _{tilt-corr.} | |
| Duho Formation | | | | | | | |
| P14 | 37/10 | 2/ 2 | 0/+49 | 11/+54 | | | Normal |
| P15 | 12/ 8 | 6/ 3 | 11/+45 | 19/+45 | | | Normal |
| P16 | 326/ 5 | 5/ 4 | 13/+52 | 17/+48 | | | Normal |
| P5 | 245/26 | 10/ 3 | | | 207/- 70 | 180/- 49 | Reversed |
| Td6 | 40/15 | | | | | | Reversed |
| Td7 | 30/20 | 25/ 4 | | | 180/- 62 | 215/- 68 | Reversed |
| Td8 | 34/15 | | | | | | Reversed |
| P23 | 37/16 | 5/ 3 | 352/+ 51 | 3/+50 | | | Normal |
| P10 | 3/ 6 | 7/ 3 | 349/+ 54 | 357/+ 55 | | | Normal |
| Td1 | 3/ 6 | 10/ 7 | 359/+ 45 | 5/+45 | | | Normal |
| Td2 | 140/ 4 | 9/ 8 | 5/+48 | 3/+50 | | | Normal |
| Td3 | | 9/ 8 | 7/+46 | 7/+46 | | | Normal |
| Td5 | | 11/ 3 | 11/+42 | 11/+42 | | | Normal |
| P3 | 355/11 | 7/ 5 | 2/+46 | 3/+46 | | | Normal |
| Mean | CD | 10/10 | 3.2/48.0 k=157.3 $\alpha_{95}=3.9$ | 7.8/48.3 k=174.1 $\alpha_{95}=3.7$ | | | |
| | GC | 35/ 7 | | 212.7/- 68.1 k=152.6 $\alpha_{95}=3.0$ | 196.0/- 59.5 k=1612.1 | | |
| | CD+GC | 10+7 | 4.0/55.6 k=36.2 $\alpha_{95}=7.0$ | 8.0/52.1 k=103.9 $\alpha_{95}=4.0$ | | | |
| Hageon Formation | | | | | | | |
| P17 | 312/ 3 | | | | | | Reversed |
| TA2 | | | | | | | Reversed |
| TA3 | | 16/ 7 | | | 192.7/- 60.9 k=51.1 | 189.3/- 63.7 k=56.3 | Reversed |
| P18 | 185/17 | | | | $\alpha_{95}=15.0$ | $\alpha_{95}=14.4$ | Reversed |
| P8 | 320/ 4 | | | | | | Reversed |
| Overall mean (Duho+ Hageon) | CD | 10/10 | 3.2/+48.0 k=157.3 $\alpha_{95}=3.9$ | 7.8/+48.3m k=174.1 $\alpha_{95}=3.7$ | | | |
| | GC | 51/14 | | | 196.7/- 66.5 k=63.3 $\alpha_{95}= 8.0$ | 192.0/- 60.9 k=113.8 $\alpha_{95}=5.8$ | |
| | CD+GC | 10+14 | 6.2/+56.2 k=36.6 $\alpha_{95}=6.1$ | 8.7/+53.9 k=74.8 $\alpha_{95}=4.2$ | | | |

N/n; samples demagnetized/used in mean calculation, D/I; declination/inclination in degrees, k; precision parameter, α_{95} ; 95% cone of confidence in degrees, CD; characteristic direction, Great circles (GC); site mean direction determined using least squares analysis of great circles only (Halls, 1976), and CD+GC; site mean direction determined on the basis of combined stable endpoints and great circles (Bailey and Halls, 1984).

歷 특성 측정을 수행하였다. Thermomagnetic 실험은 Curie balance를 이용하여 공기 중에서 시료를 가열 냉각하였으며, 자기이력특성 측정은 Molspin사의 VSM을 이용하여 수행되었다. 또한 동일 시료를 대상으로 연마편을 제작하여 자성광물의 광석현미경 관찰을 하였다.

Thermomagnetic 실험에 의하면 연구 지층의 시료들은 크게 3유형으로 분류된다 (Fig. 7): 1) 온도의 증가에 따라

자화가 점차적으로 감소하여 자철석의 큐리 온도인 580°C 부근에서 자화를 잃어버리며, 냉각시에는 가열시와 유사한 형태로 자화를 획득하는 형 (Fig. 7(a)), 2) 온도 증가에 따라 자화가 점차적으로 감소하다가 400~450°C 이상에서 자화가 증가하고 580°C 에서 다시 감소하며, 냉각시는 가열시에 비하여 매우 높은 자화를 획득하는 형 (Fig. 7(b)), 3) 온도 증가에 따라 자화가 점차적으로 감소하나 200~

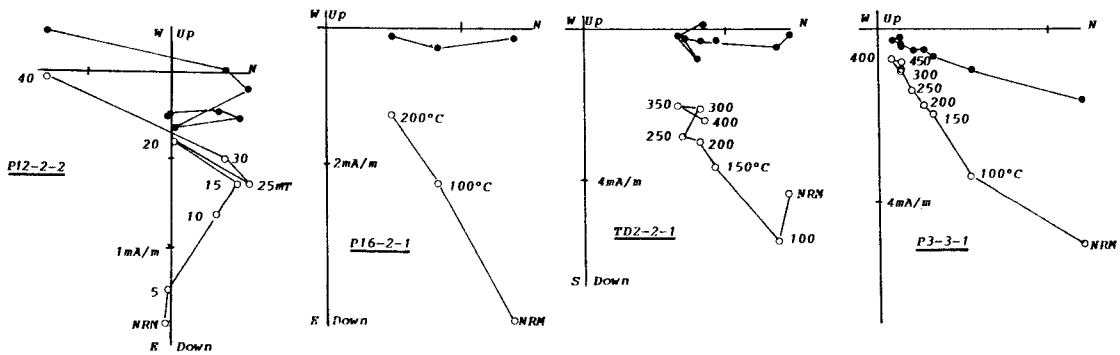


Fig. 3. Representative orthogonal vector diagrams before structural correction (in-situ) for samples from the upper and lower Duho formation. Open circles indicate projection of the NRM vector onto the vertical plane, while solid circles indicate projection onto the horizontal plane.

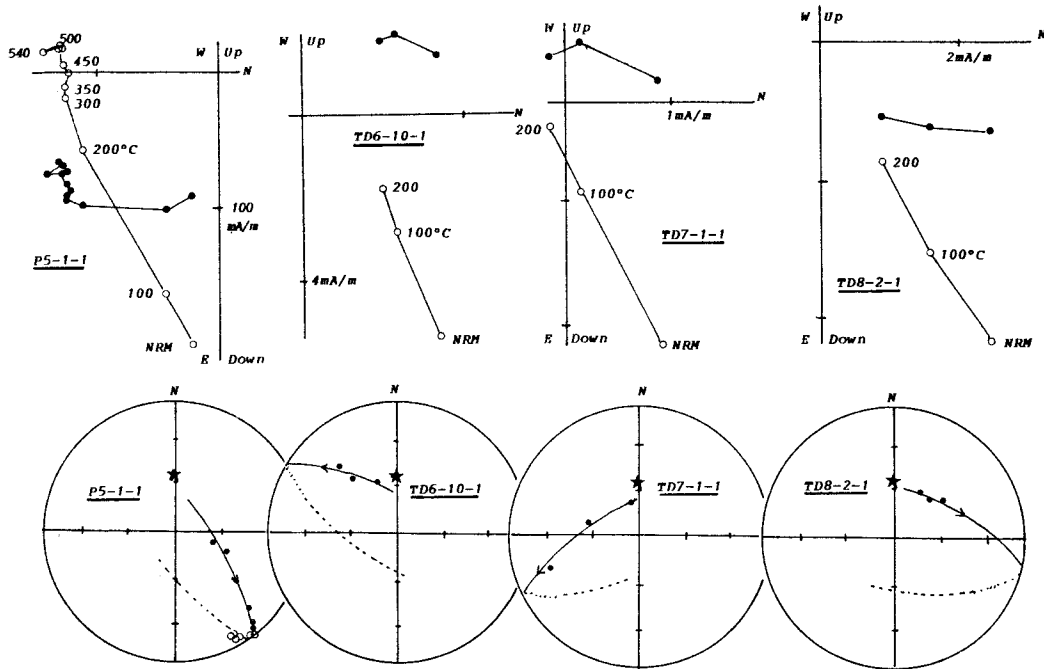


Fig. 4. Representative orthogonal vector diagrams before structural correction for samples from the middle Duho formation. Bottom of figure shows Schmidt equal area projection for the same samples as the above.

300°C 에서 약간의 변화를 보이다 600°C 이상까지 감소하며, 냉각시는 가열시에 비하면 매우 높은 자화를 획득하는 형 (Fig. 7(c)). 유형 1은 자철석이 주자성광물일 경우 관찰되는 현상이며 광석현미경 관찰에서도 주로 직경 3~10 μm 내외의 자철석이 관찰되어 유형 1의 주자성광물이 자철석을 제외한다. 유형 2 시료들의 광석현미경 관찰에 의하면 자철석이 주자성광물로 나타나며 소량의 적철석이 관찰된다. 이와 더불어 직경 4~20 μm 내외의 황철석이

산출되어 Thermomagnetic 실험시 400°C 이상에서 황철석 및 기타 Fe-sulfide가 자철석으로 변질됨을 나타낸다. 유형 3의 경우 200~300°C 에서의 변화는 시료에 있는 자류철석이 자성광물로 존재함을 의미하며 광석현미경 관찰에서도 자철석과 적철석 외에 3~40 μm의 자류철석이 산출되어 Thermomagnetic 실험 결과를 뒷받침하여 준다.

Table 3은 자기이력특성 결과를 요약한 것으로 Mrs/Ms의 값은 대부분의 모든 시료들의 주성분광물이 SD~

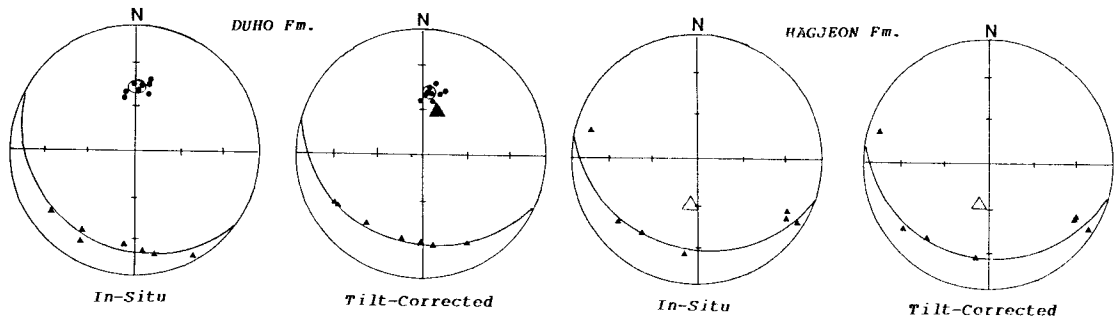


Fig. 5. Schmidt equal area projections with characteristic directions for the site-means of the Duho sites, and with poles (small triangles) to great circles obtained from demagnetization trajectories for 7 samples from the middle Duho formation (upper) and 7 samples from the Hajeon formation. Those poles lie themselves in a great-circle distribution, the normal to which (large triangle) is the characteristic direction (mean intersection of the great circles).

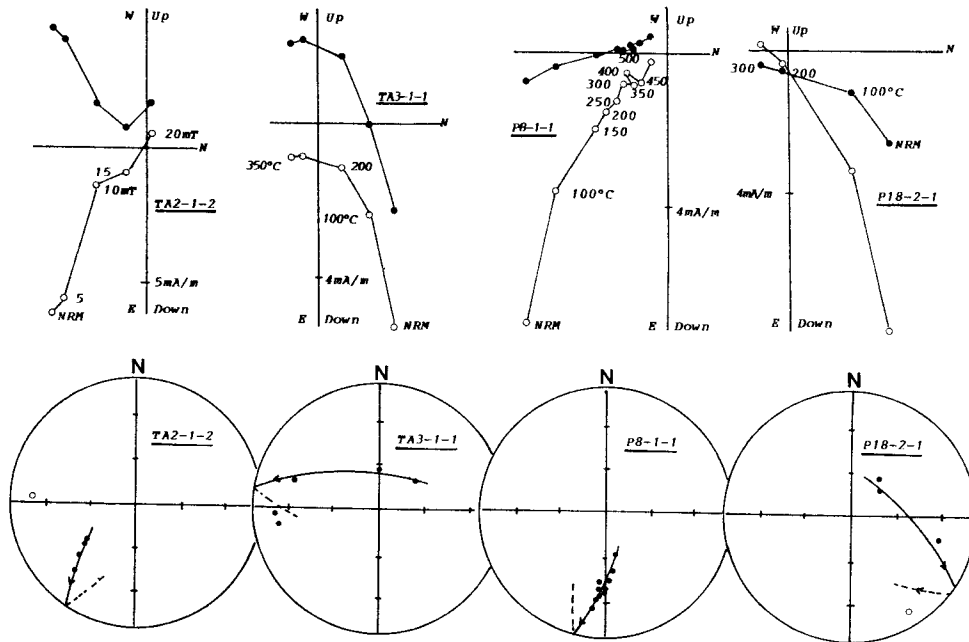


Fig. 6. Representative orthogonal vector diagrams before structural correction for samples from the Hajeon formation. Bottom of figure shows Schmidt equal area projection for the same samples as the above.

MD 범위의 자철석임을 제시하며 Hc값도 P12-2-2를 제외한 모든 시료의 주자성광물이 SD~MD 범위의 자철석의 값을 보여준다 (예, Day et al., 1977). 그러나 시료 P22-1-1, TA1-2-2, TD1-3-4의 경우는 超常磁性 (superparamagnetic) 粒子 크기의 자철석이 시료내에 상당한 양이 존재함을 제시하고, P12-2-2의 경우는 자성광물로 자철석 이외에도 적철석이 상당량 함유되어 있을 가능성을 나타낸다.

이상의 Thermomagnetic 실험, 광석현미경 관찰 및 자기력 특성 결과는 대부분 시료들의 잔류자화는 자철석에 의하여 기록되고 있으나, 열소자 단계가 증가함에 따라 시료내에 존재하는 Fe-sulfide 성분들이 자철석으로 변질되어 이 소자 단계 이후에서는 소자로 인한 1차 자철석에 기록된 잔류자화의 강도가 약할 뿐더러 2차 자철석에 의한 영향으로 잔류자화의 방향이 분산됨을 제시한다.

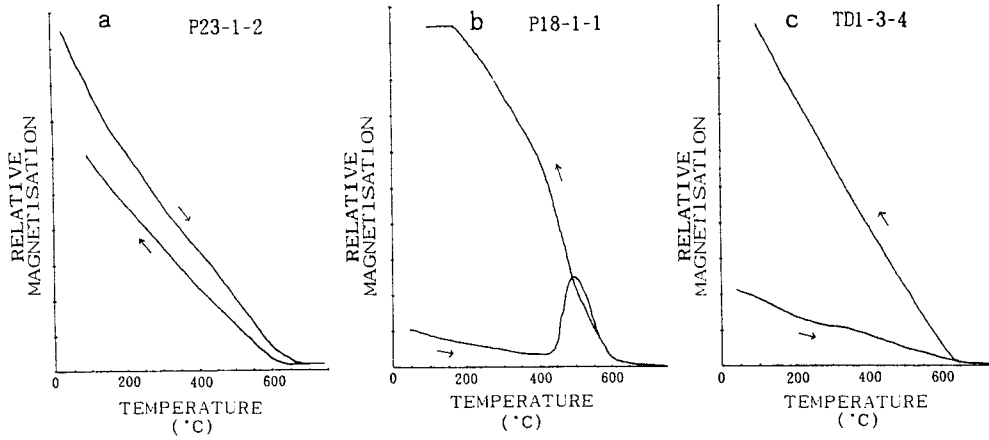


Fig. 7. Thermomagnetic curves in air for representative samples showing 3 types of behavior. See text for explanation.

Table 3. High-field hysteresis properties of selected samples.

| Formation | No. | Ms (Am ² /kg) | Mrs (Am ² /kg) | Mrs/Ms | Hc (A/m) |
|-----------|---------|-----------------------------|------------------------------|--------|------------------------|
| Duho | P5-1-3 | 1.57 × 10 ⁻² | 4.08 × 10 ⁻³ | 0.259 | 1.67 × 10 ⁴ |
| | P12-2-2 | 3.98 × 10 ⁻⁴ | 2.79 × 10 ⁻⁴ | 0.701 | 1.71 × 10 ⁵ |
| | P16-1-5 | 8.65 × 10 ⁻⁴ | 3.54 × 10 ⁻⁴ | 0.440 | 6.03 × 10 ⁴ |
| | P23-1-2 | 3.42 × 10 ⁻³ | 3.77 × 10 ⁻⁴ | 0.110 | 1.66 × 10 ⁴ |
| | TD1-3-4 | 3.02 × 10 ⁻³ | 1.95 × 10 ⁻⁴ | 0.065 | 1.19 × 10 ⁴ |
| Hagjeon | P17-2-1 | 3.11 × 10 ⁻³ | 7.55 × 10 ⁻⁴ | 0.243 | 1.47 × 10 ⁴ |
| | P18-1-1 | 3.53 × 10 ⁻³ | 3.56 × 10 ⁻⁴ | 0.101 | 4.19 × 10 ³ |
| | P22-1-1 | 1.68 × 10 ⁻³ | 7.43 × 10 ⁻⁵ | 0.044 | 1.83 × 10 ⁴ |
| | TA1-2-2 | 3.00 × 10 ⁻³ | 9.70 × 10 ⁻⁵ | 0.032 | 2.91 × 10 ⁴ |

Ms; saturation magnetization, Mrs; saturation remanence, and Hc; coercive force.

논 의

특징적 자화의 기원

두호층 상부와 하부의 10개 지점 (site)으로부터 정자극기의 특징적 방향을 구하였고, 4개 지점으로부터는 역자극기의 방향을 향하여 대원상을 이동하는 7개 자료를 Halls (1976)의 방법으로 분석하여 그 평균 교점을 구하였다 (Figs. 4, 5; Table 2). 10개의 지점평균 (site-mean) 들을 다시 평균하여 구한 두호층 (formation-mean)의 경사보정전의 특징적 자화방향은 오늘날의 자화방향과 유사하다. 그러나 장소에 따라 지층의 주향/경사가 약간씩 변하므로 경사보정을 할 수 있었는데, 경사보정 후에는 편각/복각=7.8°/48.3°를 중심으로 다소 방향이 집중한다 (k=157.3, α₉₅=3.9°로부터 k=174.1, α₉₅=3.7°). 또 한편으로, 두호층의 층서상 중부 4개 지점 (P5, TD6~8)의 대원분석 자료는 경사보정 전 (k=152.6, α₉₅=10.5°)에 비하여 경사보정 후 (k=1612, α₉₅=3.0°) 196.0°/-59.5°를

중심으로 뚜렷하게 방향이 집중되므로 positive tilt test를 보이며 (Table 2), 정자화와 역자화 방향이 거의 상호 Antipole을 이루고 있다. 이를 근거로 두호층으로부터 본 연구결과 구한 정자극기의 특징적 방향과 대원분석에 의한 역자극기의 방향은 두호층이 퇴적되던 시기의 지자기 즉 일차자화 방향일 것으로 본다. 학전층에서는 10개 중 5개 지점 (P17, P18, P8, TA2, 3)으로부터 대원상을 이동하는 7개의 자료를 Halls (1976)의 방법을 이용하여 특징적 방향을 구하였다 (Figs. 4, 5; Table 2). 이렇게 구한 경사보정 후 평균은 189.3°/-63.7°이며 경사보정 전보다 방향이 집중되나 (Table 2), 지층방향의 변화가 심하지 않아서 집중도의 변화가 크지 않다. 그러나 역자화를 보이는 본 지층의 방향은 두호층 상부와 하부의 정자화 방향과 거의 Antipole을 이루어 reversal test를 통과하며, 본 지층으로부터 구한 방향도 지층 퇴적시의 지자기 방향임을 시사한다.

두호층과 학전층의 경우 대원을 따라 이동하나 안정층

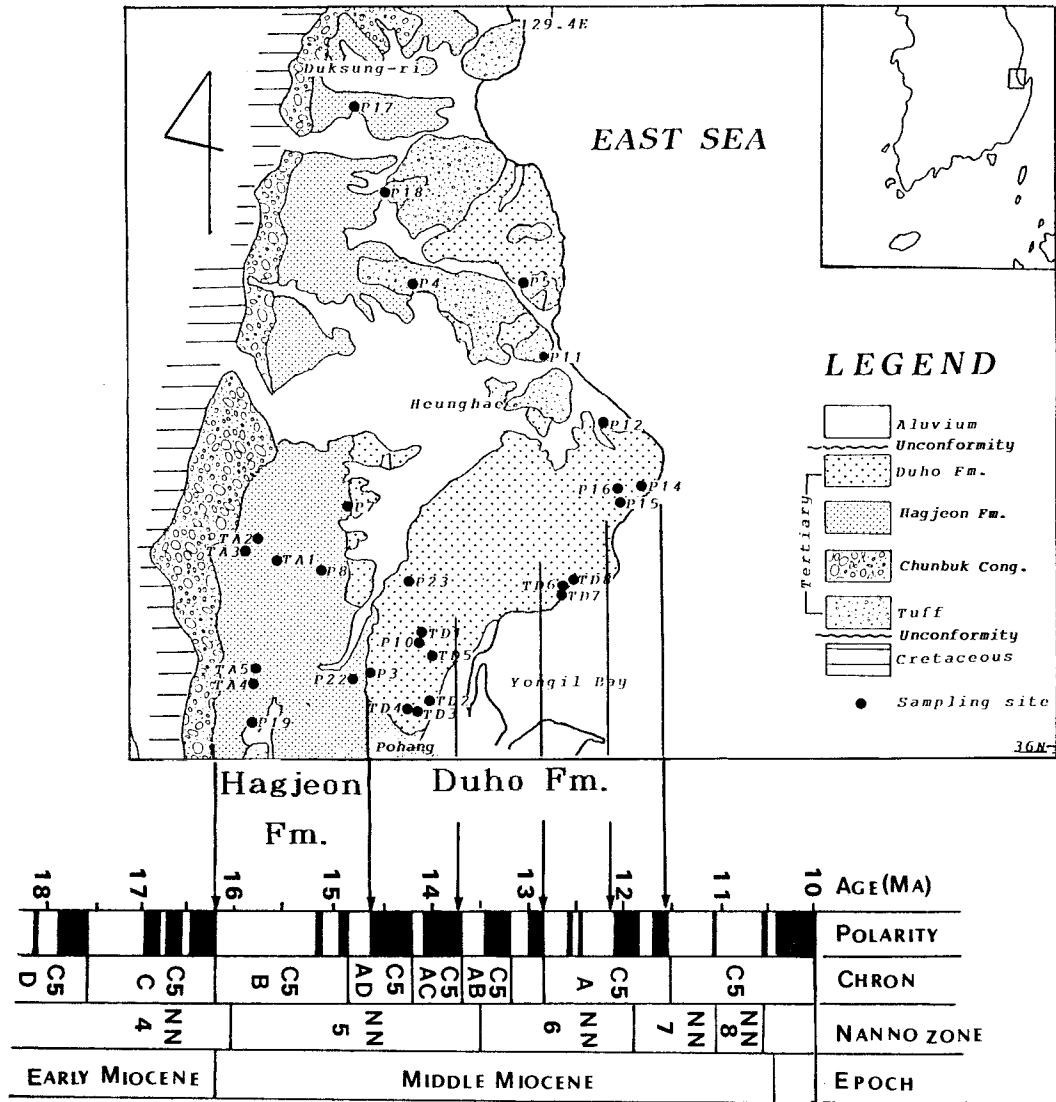


Fig. 8. Comparison of magnetic polarity time scale (Berggren et al., 1985) and biostratigraphical time scale by Backman et al. (1990) to the lithostratigraphic units.

점을 보이지 않는 시료는 두 성분, 즉 퇴적시기와 관련된 역자극기의 자화성분과 그 이후 정자극기 (아마도 Brunhes Normal Chron) 동안에 공극속으로 스며든 미세한 자성광물의 침전에 의한 성분을 갖고 있을 것이다. 2차적으로 공극내에 침전된 자성광물은 1차적으로 퇴적된 자성광물보다 미세할 것으로 (초상자성 입자크기) 추정되며, 따라서 낮은 unblocking temperature 혹은 항자력을 갖고 있을 것이므로 단계적 소자에서 쉽게 소자되는 것으로 추론한다. 이러한 추론은 직교소자도에서 원점을 향하지 않는 직선을 그리는 소자자료에 근거를 둘 수 있고,

학전층의 경우에도 동일한 추론이 적용될 것이다. 암석자기특성 측정 결과도 이러한 시료들에 상당량의 초상자성 입자 크기의 자성광물이 함유되어 있음을 제시하여 상기의 추론을 뒷받침하고 있다. 많은 시료가 400~450°C의 온도에서 불규칙적으로 방향이 변하는데, 그 이유는 이 온도 이상에서 대자율값이 증가하는 것으로 보아 새로운 자성광물이 생기기 때문인 것은 분명하다. Thermomagnetic 실험 및 광석현미경 관찰 결과에 의하면 400~450°C 이상에서 생기는 새로운 광물은 시료내에 존재하는 황철석이 가열에 의하여 변화된 자철석으로, 이 이하의 잔류자화

방향은 퇴적물과 같은 시기에 퇴적된 자성광물 (주로 자철석)에 의하여 기록된 방향이나, 이 온도 이상에서의 불규칙한 방향은 새로 생성된 자철석에 기인한 것임을 제시한다.

연일층군의 지질시대

자화의 시기에 관한 논의에서 학전층과 이동층이 기록하고 있는 특징적 방향 혹은 대원상으로 이동하는 소자 자료의 중점은 1차 자화방향일 것으로 추정하였다. 이러한 추정에 근거하면 학전층의 5개 지점의 시료들은 역자극기에 퇴적된 지층이다. 그런데, 시료가 채취된 지점은 비교적 하부로부터 상부에 걸쳐 분포하므로 학전층 전체가 역자극기를 대표할 가능성이 크다. 천북역암과 학전층 하부의 퇴적 시기는 초미화석에 의하면 16.7~16.0 Ma이며, 와편모충류에 의하면 late Early Miocene이라 하였으므로 (Yun et al., 1990; Yi, 1992), 고생물학적 연구결과와 본 고지자기 연구결과에 의하여 학전층의 시대 하한을 16.2 Ma로 추정한다 (Fig. 8). 학전층의 시대 상한을 결정하기 위하여 다음 몇 가지 연구결과를 참고할 수 있다. 첫째, 학전층 하부와 천북역암을 관입한 현무암들의 K-Ar 연대가 약 15 Ma (이현구 외, 1992)이다. 둘째, 초미화석에 의하여 Yi (1992)는 학전층과 두호층의 경계를 Nanno zone NN5와 NN6의 경계부근 (13.5 Ma)이라 하였다. 셋째, 본 연구결과 학전층은 역자화된 지층이며, 학전층 위에 정합적으로 놓인 두호층 하부 약 50 m의 두꺼운 지층이 정자화되어 있다. 위 3개의 연구결과를 종합하여 학전층의 시대상한은 14.7 Ma일 것으로 추정한다. 이러한 선행의 연대측정 및 고생물 자료와 학전층 전체가 역자극기를 기록하고 있다는 본 고지자기연구 자료를 종합하면, 학전층은 주로 Fig. 8의 磁極期 C5B (Berggren et al., 1985) 혹은 Nanno zone NN5의 前帶 (Backman et al., 1990)의 약 140만년간 퇴적된 지층일 것이며 이 범위를 크게 벗어나지 않을 것으로 추정한다. 두호층의 경우 하부 약 50 m (P3, P23, P10, TD1, 2, 3, 5)는 정자극기를, 중상부 약 30~40 m (P5, TD6~8)는 역자극기를, 그리고 최상부 (P14~16)는 다시 정자극기를 기록하고 있다. 불연속적으로 채취된 시료의 고지자기 자료로 자기층서에 의한 시기를 논하기 어려우나, 두호층 하부의 약 50 m에 달하는 층후가 정자극기를 대표하므로 두호층 하부는 자극기 C5 AD와 C5AC 혹은 Nanno zone NN5 後帶의 지층일 가능성이 크다. 시료 P5, TD6~8가 채취된 두호층 중상부의 역자화된 지층과 최상부의 정자화된 지층은 磁極期 C5A의 역 및 정자극기에 대비될 것으로 추정한다 (Fig. 8 참고).

지구조적 문제

연일층군의 두호층과 학전층으로부터 10지점의 안정중점 자료와 9개 지점의 14개 대원 자료를 Bailey and Halls (1984)의 방법으로 계산하여 구한 방향은 지층의 경사보정 후 편각/북각=8.7°/53.9°로서, 99%의 신뢰도를 갖는 통계학적으로 의미있는 positive tilt test를 보인다 ($k_2/k_1=2.04$). 반면에, 연일층군보다 고기인 장기분지 어일분지 등에 분포하는 화산암류로부터 구한 선행 고지자기 자료 (Kim et al., 1986; Han, 1989; 김인수, 강희철, 1989; 민경덕, 1992)는 북각은 비슷하나 편각은 북동방향 (40~50°)이다. 북동방향의 편각은 장기분지와 어일분지가 수직축 주위로 40~50° 정도 시계방향으로 회전하였음을 의미하며, 민경덕 (1992)은 그 시기를 연일층군의 퇴적 이전일 것이라 하였다. 고지자기 자료 (Kim et al., 1986; Han, 1986; 민경덕, 1992)에 의하면 장기분지와 어일분지의 화산암류 중 연일층군과 유사한 시기 또는 제 4기의 화산암류들은 본 연구결과와 크게 다르지 않은 편각을 보인다. 이러한 점으로 미루어 보아 한반도 동남해안을 따라 분포하는 제 3기층의 회전이 일어난 시기가 연일층군 퇴적 이전임을 거의 확실한 것 같다. 그리고, 한반도로부터 일본열도가 분리 이동되어 동해가 확장되던 동안-하부마이오세 후기에 시작하여 중부마이오세 초기에 완료된 (Otofuji et al., 1991; 그 외 여러 논문)-연일층군은 지구조적으로 별로 변동을 받지 않은 것으로 해석한다. 연일층군은 동해가 열리는 기간인 하부마이오세후기~중부마이오세와 거의 그 시기를 같이하는데, 연일층군이 이러한 사건을 기억하지 않고 있음은 특기할 만하다. 그러면, 장기분지 및 어일분지의 중부마이오세 이전 지층이 기록하고 있는 시계방향으로의 회전 (40~50°)이 과연 동해의 확장 사건에 의한 것인지 아니면 이와는 무관하며 다만 한반도 내에서 일어난 단층운동과 관계가 있는지 생각해볼 문제이다.

결 론

한반도 동남부 형산강 이북의 포항분지에 분포하는 제 3기 연일층군의 고지자기 연구를 수행하여 positive fold test와 reversal test를 만족하는 자료를 얻었으며, 이를 토대로 다음과 같은 결론을 내린다.

1. 학전층의 시료는 단계적 소자실험에서 안정중점방향 (stable-endpoint)을 보이지는 않으나 소자자료들의 궤도가 대원을 그리며 역자극기의 방향으로 이동하므로, Halls (1976)의 방법으로 구한 대원의 교점 방향은 편각/북각=

192.0°/-60.9° ($\alpha_{95}=4.2^\circ$, $k=113.8$)이며, 본 지층은 역 자극기에 퇴적된 지층으로 그 시기는 16.2~14.7 Ma일 것으로 추정한다.

2. 두호층 상부와 하부의 시료들은 정자극기의 안정종 점방향을 보이며, 이로부터 구한 방향은 편각/복각=7.8°/48.3° ($\alpha_{95}=3.7^\circ$, $k=174$)이다. 반면에, 두호층 중부는 시료들의 소자자료가 학전층의 경우와 같이 대원상을 따라 역자극기의 방향으로 이동하므로 역자극기의 지층일 것이다. 따라서, 두호층의 하부는 정자화, 중상부는 역자화, 상부는 정자화되어 있으며, 두호층의 시대 상한은 12 Ma 전후의 정자극기일 것이다. 안정종점자료와 대원상의 자료를 Bailey and Halls (1984)의 방법으로 계산하여 두호층으로부터 편각/복각=8.0°/52.1° ($\alpha_{95}=4.0^\circ$, $k=103.9^\circ$)를 구하였다.

3. 신생대 제 3기 (마이오세)의 학전층과 두호층의 자료를 Bailey and Halls (1984)의 방법으로 평균한 연일층군의 방향은 편각/복각=8.7°/53.9° ($\alpha_{95}=4.2^\circ$, $k=74.8$)이며, 이로부터 계산한 자극의 위치는 위도/경도=82.7°/230.2° ($\delta p=2.8^\circ$, $\delta m=5.9^\circ$)이다. 장기분지, 어일분지 등에 분포하는 제 3기층에 대한 선행 연구 (Kim et al., 1986; Han, 1989; 김인수, 강희철, 1989; 민경덕, 1992)는 북동방향의 편각을 측정하고, 장기분지와 어일분지가 시계방향으로 40~50° 회전하였을 것으로 추론하였는 바, 본 연구에서 형산강 이북의 포항분지 (연일층군)는 수직축 주위로 회전되지 않았으며 따라서, 동해의 확장이나 일본열도의 분리가 연일층군에 구조적으로 별로 영향을 주지 않았을 것으로 해석한다.

사 사

본 연구의 고지자기 및 암석자기 측정은 영국 Liverpool 대학교의 Geomagnetism Laboratory에서 수행되었으며 이를 허락해준 J.D.A. Piper 교수께 감사할 드린다. 본 논문은 교육부의 기초과학연구소 학술조성연구비 및 전략광물자원연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드린다. 또한, 본 연구지역에 대한 선행 연구자료를 제공 해준 윤혜수 교수에게 감사드린다

참고문헌

김봉균 (1970) 한국의 신세 3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학 회지, 6권, p. 77-96.
 김인수, 강희철 (1989) 魚日盆地 일대에 분포하는 제 3기층에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.
 민경덕 (1992) "한반도 신생대 및 중생대 암류에 대한 고지자기

연구" 중 "신생대 암류에 대한 고지자기 연구". '91 목적기초 연구과제 제 1차 중간보고서, 한국과학재단.
 엄상호, 이동우, 박봉순 (1964) 한국지질도 (1 : 50,000), 포항 도록. 국립지질조사소.
 李鉉具, 文熙壽, 閔庚德, 金仁洙, 尹惠洙, 板谷徹丸 (1992) 浦項 및 장기盆地에 대한 古地磁氣, 層序 및 構造研究; 火山岩類의 K-Ar 年代. 광산지질, 5권, p. 337-349.
 全希永 (1982) 浦港지역에 분포하는 신세 3기층군의 고식물군 연구. 한국동력자원연구소, 조사연구보고, 제 14호, p. 7-23.
 Backman, J., Schineider, D. A., Rio, D. and Okada, H. (1990) Neogene low-latitude magnetostratigraphy from site 710 and revised age estimates of Miocene nannofossil datum events. In Duncan, R. A., Backman, J., Peterson, L. C., et al. (eds), Proc. ODP, Sci. Results, 115: College Station, TX (Ocean Drilling Program), p. 271-276.
 Bailey, R. C. and Halls, H. C. (1984) Estimate of confidence in paleomagnetic directions derived from mixed remagnetization circle and direct observational data. J. Geophys., v. 54, p. 174-182.
 Berggren, W. A., Kent, D. V. and Flynn, J. J. (1985) Paleogene geochronology and chronostratigraphy. In Snelling, N. J. (ed.), Geochronology and the Geological Record. Memoirs of the Geological Society, No. 10. Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 141-195.
 Bong, P. Y. (1985) Paleontology of the Neogene strata in the Pohang sedimentary basin. Ph.D. Thesis, Seoul National Univ., 239p.
 Choe, M. Y. and Chough, S. K. (1988) The Hunghae Formation, SE Korea: Miocene debris aprons in a back-arc intraslope basin. Sedimentology, v. 35, p. 239-255.
 Day, R., Fuller, M. and Schmidt, V. A. (1977) Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain size and compositional dependence. Phys. Earth Planet. Inter., v. 13, p. 260-267.
 Halls, H. C. (1976) A least-squares method to find a remanence direction from converging remagnetization circles. Geophys. J. R. Astron. Soc., v. 45, p. 279-304.
 Han, J. (1989) Miocene paleomagnetic data from southeastern Korea: implication on models for opening of the Japan sea. M. S. Thesis, Texas A & M University, 132p.
 Kienzle, J. K. (1968) Paleomagnetism of Plio-Pleistocene volcanic rocks from South Korea and studies of the earth's ancient magnetic field. Ph.D. Thesis, Washington University, St. Louis, Missouri, 122p.
 Kim, B. K. (1965) The stratigraphic and paleontologic studies on the Tertiary (Miocene) of the Pohang area, Korea. Seoul National Univ. J. Sci. and Tech. Series, v. 15, p. 32-121.
 Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W. ((1986) Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks for Guryongpo area, Korea. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 19, p. 231-237.
 Kim, W. H. (1990) Significance of Early to Middle Miocene planktonic foraminiferal biostratigraphy of the E-core in the Pohang basin, Korea. J. Paleont. Soc. Korea, v. 6, p. 144-164.
 Kirschvink, J. L. (1980) The least squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. Geophys. J.R. Astron. Soc., v. 62, p. 699-718.
 Koh, Y. K. (1986) Silicoflagellates, Ebridians and Nannofossils

- from the Pohang (Neogene) and the Ulleung (Late Quaternary) Basins, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National Univ., 210p.
- Lallemand, S. and Jolivet, L. (1986) Japan Sea: A pull-apart basin? *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 76, p. 375-389.
- Lee, Y. G. (1975) Neogene diatom of Pohang and Gampo area, Kyeongsangbugdo, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 11, p. 99-114.
- Lee, Y. G. (1978) Diatom flora of the middle part of the Yeonil Group, in the vicinity of Cheongha, Gyeongsangbugdo, Korea. *Res. Rev. Kyungbuk Nat'l Univ.*, v. 25, p. 215-222.
- McElhinny, M. W. (1964) Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, v. 8, p. 338-340.
- Otofujii, Y. I. and Matsuda, T. (1983) Paleomagnetic evidence for the clockwise rotation of southwest Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 62, p. 349-382.
- Otofujii, Y. I. and Matsuda, T. (1984) Timing of rotational motion of southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 70, p. 373-382.
- Otofujii, Y. I., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985) Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of northeastern Japan-rifting process of the Japan Arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 75, p. 265-277.
- Otofujii, Y. I., Itaya, T. and Matsuda, T. (1991) Rapid rotation of southwest Japan-paleomagnetism and K-Ar ages of Miocene volcanic rocks of southwest Japan. *Geophys. J. Int.*, v. 105, p. 397-405.
- 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. (editor) "Physical Geology of Central and Southern Part of Korea", Kyoto University, p. 41-84.
- Tateiwa, I. (1924) Geological atlas of Chosen: no. 2. Enrichi-Kyuroho and Choyo Sheet. Chosen Geol. Survey.
- Yi, S. (1992) Miocene calcareous nannoplankton from the Pohang basin, Korea. Ph.D. Thesis, Chungnam National Univ., 119p.
- Yoon, S. (1975) Geology and paleontology of the Tertiary Pohang Basin, Pohang district, Korea; part 1. Geology. *J. Geol. Soc. Kor.*, v. 2, p. 137-154.
- Yun, H. (1986) Emened stratigraphy of the Miocene formation in the Pohang basin; part 1. *J. Paleontol. Soc. Kor.*, v. 2, p. 54-69.
- Yun, H., Min, K. D., Moon, H. S., Lee, H. K. and Yi, S. S. (1991) Biostratigraphic, chemostratigraphic, and tephrochronological study for the correlation of Tertiary formations in southern part of Korea: Regional tectonics and its stratigraphical implication in the Pohang basin. *J. Paleont. Soc. Korea*, v. 7, p. 1-12.
- Yun, H., Paik, K. H., Chang, S. K. and Yi, S. (1990) Microfossil assemblages from the Bomun area. *J. Paleont. Soc. Korea*, v. 6, p. 1-63.
- Zijderveld, J. D. A. (1967) AC demagnetization of rocks: Analysis of results. In *Methods in Paleomagnetism*, edited by D. W. Collinson et al. Elsevier, London.

1993년 3월 18일 원고접수