

삼척지역에 분포하는 평안누층군에 대한 고지자기 연구

도 성 재*

Paleomagnetism of the Pyongan Supergroup in the Samcheok Area

Seong-Jae Doh*

ABSTRACT: Paleomagnetic data have been obtained from the Upper Carboniferous-Permian Komok and Cheolam Groups which are exposed in the E-W trending Baekunsan syncline comprising the Pyongan Supergroup in eastern Korea. Two ancient components of magnetization are recovered in these groups by detailed thermal demagnetization: a post-folding component and a pre-folding component. The post-folding component ($D/I=54.0/54.6^\circ$, $\alpha_{95}=14.6^\circ$) is a magnetic signature of the Daebo Orogeny and appears to have been confined mainly to Cretaceous Normal Superchron. It has been rotated clockwise since this magnetization has been acquired. The pre-folding components ($D/I=341/-9.2^\circ$, $\alpha_{95}=7.2^\circ$, paleopole at $335.7^\circ E$, $44.6^\circ N$ for Upper Carboniferous; $D/I=358.3/11.5^\circ$, $\alpha_{95}=6.3^\circ$, paleopole at $311.9^\circ E$, $58.7^\circ N$ for Permian) pass fold and reversal tests. These paleopoles correspond only with the contemporaneous poles from the North China Block: they are removed from the poles from the South China Block. If the results of this study are corrected for the clockwise rotation deduced from the pre-folding component, the enhanced agreement with North China Block can be achieved. Therefore, a first-order correlation between the Korean Peninsula and North China at least since Upper Paleozoic times is identified in this study.

서 론

동아시아는 중생대에 시작되어 오늘날까지 진행되는 지구조 운동에 의하여 여러 지판들이 모여져서 이루어진 복잡한 집합체라 할 수 있다. 고지자기 연구는 지판들의 운동에 관한 정량적인 정보를 제공하여 주므로, 많은 연구자들에 의하여 지판 운동 연구에 중요한 연구수단으로 이용되고 있다. 고지자기 연구에 의하면 중생대 초기와 중기에 동아시아의 지구조 운동이 활발히 일어난 후, 백악기 시기에 와서 현재의 동아시아 형태로 이루어졌음이 밝혀졌다(예, Enkin *et al.*, 1992). 또한, 동아시아를 구성하는 각 지판의 고지자기극 위치가 시료채취 장소를 중심으로 소원상에 분포하는 것과 같은 복잡성을 띠는 경우가 흔히 있다. 이러한 고지자기극의 분포 특성은 지판들이 내부적인 변형을 받았음을 제시하며, 이 변형은 적어도 부분적으로 인도판의 충돌과 관련되어 동아시아를 이루고 있는 지판들이 받은 영향에 기인한 것으로 이 영향은 오늘날까지 지속되고 있는 것으로 알려져 있다(Mol-

nar and Tapponnier, 1977).

동아시아 대륙의 일부인 한반도는 지체구조학적 관점에서 서쪽에 위치한 여러 지판들과의 관계에 대하여 이론이 많다. 예를들면, 전통적으로 한반도는 북중국과 같이 단일의 중국-한국(Sino-Korean) 지판으로 취급되었다. 그러나, 최근에 와서는 한반도가 남중국 지판에 속한다는 의견(Lee *et al.*, 1987) 혹은 독립된 개별지괴일 가능성(Enkin *et al.*, 1992), 그리고 호남 전단대를 경계로 남쪽의 영남지괴는 북중국 지판에 북쪽의 경기지괴는 남중국 지판에 속한다는 견해(Cluzel *et al.*, 1990 and 1991) 등이 있다. 한반도의 지체구조학적 위치에 대한 명확한 해답을 얻기 위하여는 지괴운동에 대한 자료를 제공하여 주는 고지자기 연구가 필수적이다. 한반도의 고지자기 연구는 수년 전부터 여러 연구자들에 의하여 수행되고 있으나, 대부분의 연구는 지질학적으로 비교적 최근에 해당되는 신생대에서 중생대 말기의 지층을 대상으로 한다. 그러나, 한반도의 동아시아 대륙에서의 지체구조학적 위치에 대한 해결을 위하여는 동아시아 대륙의 지괴운동이 활발히 일어난 중생대 초기와 중기 그리고 그 이전에 대한 고지자기 자료가 필수적이다. 한반도의 중생대 중기 이전의 지층에 대한 고지자기 연구는 몇 연구자들에 의하여 수행되었으

* 고려대학교 지구환경과학과 (Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

Table 1. Stratigraphic Succession of the Pyongan Supergroup exposed in the Samcheok Area.

Period	Epoch	Group	Formation	No. Sites
-----Daebo Orogeny-----				
-----Songlim Disturbance-----				
Triassic	Scythian to Tr2(?)	Hwangji	Tonggo	
-----Unconformity-----				
Permian	Zechstein (Tartarian) (Kazanian) (Kunkurian)	Cheolam	Kohan	6/4
			Tosagok	6/5
			Hambaeksan	4/0
			Changseong	3/0
-----Unconformity-----				
Carboniferous	Moscovian	Komok	Kumcheon Manhang	1/0 10/10

The sites column gives the number of sites sampled and the number of sites yielding significant paleomagnetic results.

나, 신빙성 있는 한반도의 지체구조학적 위치 확립을 위하여는 보다 더 많은 고지자기 자료가 요구된다. 이러한 관점에서 본 연구는 옥천대의 북서부에 위치한 비변성대인 (Lee, 1987) 삼척지역 일대에 발달한 백운산 향사대에 분포하는 평안누층군 중 고생대 말에 속하는 지층들을 대상으로 고지자기 연구를 수행하여, 이 시대의 고지자기 극 위치를 확립하고 연구지역의 동아시아 대륙에서 지체구조학적 위치에 관한 자료를 제공하고자 한다.

일반지질 및 시료채취

강원도 삼척지역 일대에 발달한 백운산 향사대에 분포하는 평안누층군은 지질시대가 석탄기 말에서 트라이아스기 초로, 캄브리아기에서 오도비스기에 걸쳐 퇴적된 하부의 조선누층군을 부정합으로 피복하고 있다. 평안누층군은 하부로 부터 상부로 석탄기의 모스코비안(Moscovian)에 퇴적된 고목층군, 페름기의 아린스키안(Arlinskian)에서 타타리안(Tartarian)에 걸쳐 퇴적된 철암층군, 그리고 최상부에 시시안(Scythian)에서 Tr2(?)까지로 알려진 황지층군으로 구성되어 있다(정창희, 1969) (Table 1). 이들 층군 사이의 경계는 부정합 관계를 이루고 있다. 고목층군은 만항층과 금천층으로, 철암층군은 장성층, 함백산층, 도사곡층 및 고한층으로 세분된다. 연구지역에 분포하는 황지층군은 동고층이다. 평안누층군은 트라이아스기 중엽에 일어난 송림변동에 의하여 퇴적이 중단되었다. 송림변동에 의하여 연구지역의 습곡구조가 형성되기 시작하였으며, 그후 류라기에서 백악기 초에 걸쳐 일어난 대보조 산운동에 의하여 향사구조가 형성되었다(Lee, 1987).

고지자기 연구를 위한 시료채취는 고목층군과 철암층

군을 대상으로 야외용 착암기를 이용하여 직경 2.5 cm의 코아를 채취하였으며, 각 코아의 방향은 주변 지형지물을 기준으로 브란톤 컴퍼스 및 태양 컴퍼스가 부착된 정향기를 이용하여 현장에서 측정하였다. 이러한 방법으로 고목층군 및 철암층군에서 각각 11개 및 19개의 노두에서 총 367개의 독립된 정향 코아시료들을 채취하였다(Fig. 1). 연구지역에 분포하는 황지층군의 동고층은 고지자기 연구결과가 이미 발표되었으므로(도성재, 1993), 본 연구에서는 제외하였다.

실험방법

야외에서 채취한 정향코아들을 고지자기용 비자성 커팅휠(cutting wheel)이 부착된 암석 절단기를 이용하여 길이 2.2 cm로 절단한 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 극저온자력계(cryogenic magnetometer)를 사용하였다. 모든 실험은 지구자기장 및 실험실의 자기장이 차폐된 내부자기장의 강도가 25 nT 이하인 공간에서 수행되었다. 열소자는 300°C까지는 100°C 단계, 500°C까지는 50°C 단계, 그리고 500°C 이상에서는 20°C 단계로 최대 700°C 혹은 각 시료의 잔류자화를 기록하는 자성광물의 큐리온도까지 수행되었다.

고지자기 자료처리는 벡터 다이어그램(vector diagram, Zijdeveld, 1967) 상에 나타나는 방향변화를 주성분 분석법(principal component analysis, PCA, Kirschvink, 1980)을 통하여 각 방향의 성분을 추출하였다. PCA 적

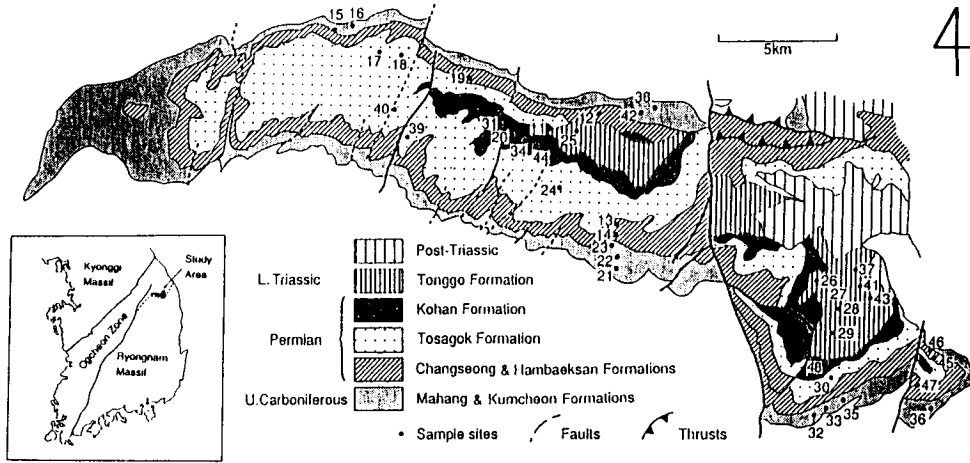


Fig. 1. Geologic map of the Samcheok area, showing the locations of the paleomagnetic sampling sites.

용시에는 일직선 상에 나타나는 최소한 3점들 혹은 그 이상의 점들에 적용하였다. 마지막 부분에서는 원점과 연결하여 PCA를 수행하였다. 열소자 단계에 따른 잔류자화의 방향변화가 원점을 향하지 않으나 등면적 투영도(equal-area stereonet) 상에서 대원을 따라 방향이 변할 경우는 McFadden and McElhinny(1988)의 구역제한(sector constraints)을 이용한 대원법(great circle method)을 이용하여 특성잔류자화를 추출하였다.

고지자기 결과

연구시료들의 소자실험 전 자연잔류자화 방향은 다소 분산되어 있기는 하지만, 대부분의 시료들이 북쪽의 정자화를 기록하며 연구지역의 현재 지구자기장 방향($D/I = 352.6/52.4^\circ$)으로 우세하게 모여있다(Fig. 2). 이러한 현재 지구자기장 방향의 자연잔류자화 방향은 한국에 분포하는 암석에 대한 기존의 고지자기 연구결과와 일치한다(예, Shibuya *et al.*, 1985; Otofujii *et al.*, 1986; Lee *et al.*, 1987; 도성재, 1993). 본 연구시료들의 자연잔류자화 방향이 평균 지구축 쌍극자기장(mean axial dipole field) 방향($D/I = 0/56.6^\circ$)보다 연구지역의 현재 지구자기장 방향과 유사한 것은 자연잔류자화에 기록된 2차잔류자화 성분이 주로 현재 지구자기장에 의하여 유도된 점성잔류자화(viscous remanent magnetization)로 사료된다.

고목층군

고목층군의 하부층인 만항층에서는 10개의 노두에서 총 108개의 적색사암 및 세일 시료를 채취하였다. 이들 시

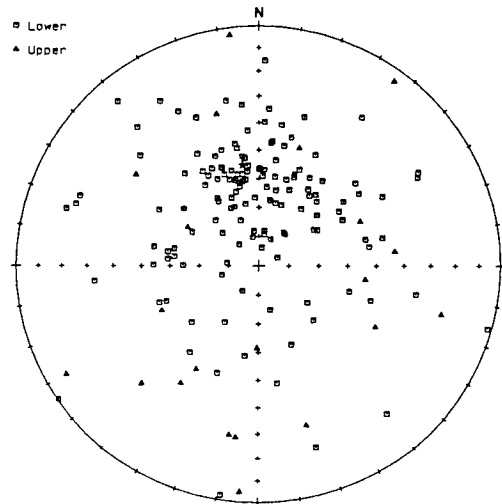
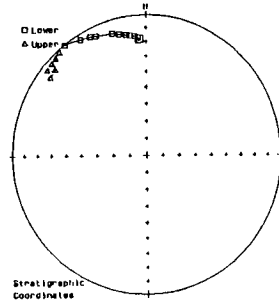
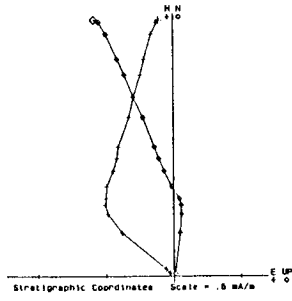
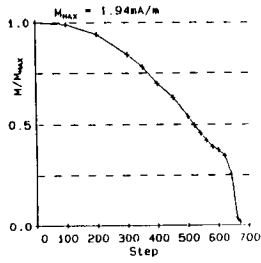


Fig. 2. Total NRM directions in geographic coordinates.

료의 단계적 열소자 결과, 대부분의 시료들에서 고온성분이 원점을 향하는 2~3성분의 고지자기 방향을 추출할 수 있었다(Fig. 3a와 b). 그러나, 일부시료들은 봉쇄온도 스펙트럼(blocking-temperature spectrum)이 중첩되어 열소자 단계의 증가에 따른 방향이 원점으로 소멸되지 않으나, 등면적 투영도 상에서 대원을 따라 이동하는 양상을 보여준다(Fig. 3c). 이러한 양상을 보여주는 시료들은 대원을 따라 이동하는 부분에 대하여 구역제한을 이용한 대원법(McFadden and McElhinny, 1988)을 적용하여 고온성분을 추출하였다. Fig. 3a의 시료 21-1은 2성분의 고지자기 방향을 보여주는 예로, 주로 자철석에 의한 600°C 이하에서 추출되는 저온성분(low blocking-temperature component)

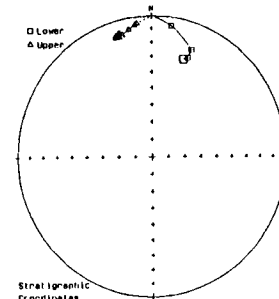
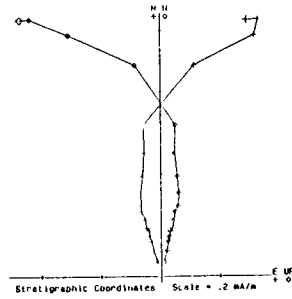
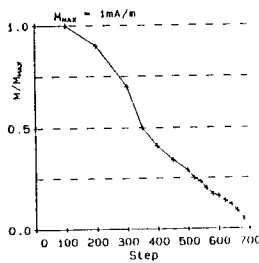
a) 21-1

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



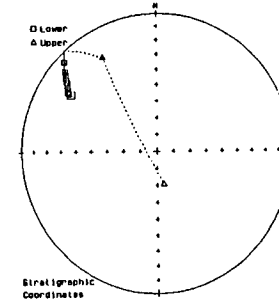
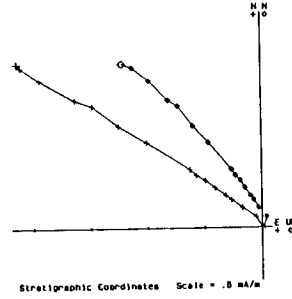
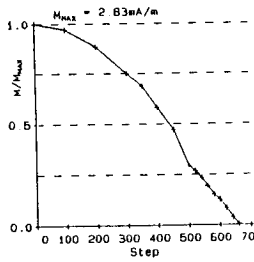
b) 23-3

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



c) 35-4

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



d) 15-5

NRM T100 T200 T300 T350 T400 T450 T500

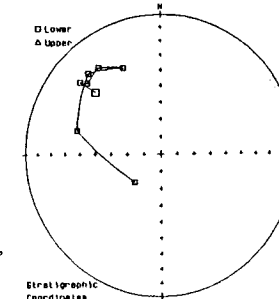
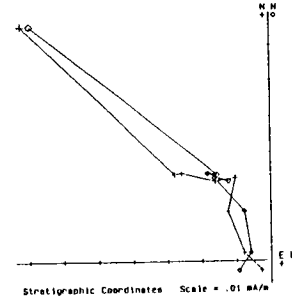
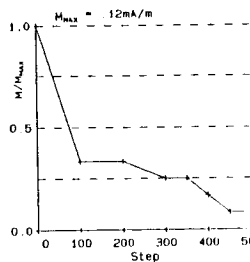


Fig. 3. Typical demagnetization results (normalized intensity curves, Zijderveld diagrams, and equal-area projections in stratigraphic coordinates) from samples of the Komok Group. Demagnetization steps are shown below sample number.

Table 2. Paleomagnetic results of the Komok Group in the Samcheok area.

Site	n/N	Dg	Ig	Ds	Is	k	α_{95}	
16*	6/9	258.2	16.9	246.4	5.8	50.3	12.4	G6
21*	17/17	306.6	19.7	312.2	-6.0	38.1	5.9	D13, G4
22*	12/12	324.1	29.6	323.6	-10.3	85.1	4.7	D12
23	7/7	336.1	22.3	336.6	-7.5	155.1	4.9	D7
32	9/9	190.4	-47.7	165.4	11.1	86.2	5.6	D9
33*	10/10	235.1	17.0	230.9	10.8	48.1	7.0	D10
35*	20/20	273.1	71.2	299.5	-4.9	30.1	6.1	D16, G4
36	7/8	359.6	74.6	341.4	-9.0	48.8	8.7	D7
38*	4/7	282.8	-12.9	288.9	-6.9	38.6	15.0	D4
42*	9/9	196.2	-45.5	189.2	9.7	301.3	3.2	D3, G6
Ave	3	351.8	49.3	341.1	-9.2	296.2	7.2	($k_2/k_1=37.5$)

n/N; number of samples used in average/measured, Dg and Ig; *in situ* declination and inclination, Ds and Is; tilt-adjusted declination and inclination, k; Fisherian precision parameter (k_1 ; *in situ*, k_2 ; tilt-adjusted), α_{95} ; radius of cone of 95% confidence interval, D and G; number of direct observations and great circles, respectively, *; site means omitted in calculation of average (see text for explanation).

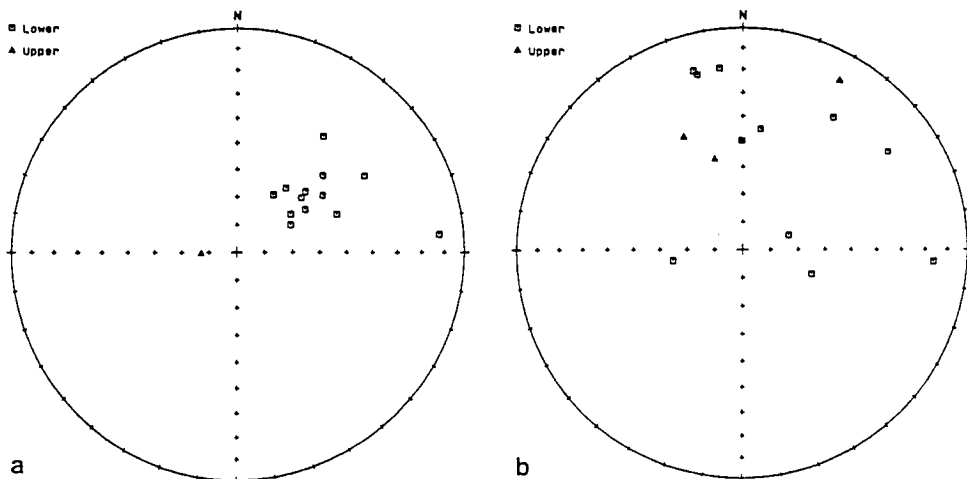


Fig. 4. Equal-area projections of the post-folding components (a; geographic coordinates, b; stratigraphic coordinates).

과 620°C 이상에서 열소자 단계의 증가에 따라 잔류자화의 방향이 원점을 향하는 적철석에 의한 고온성분(high blocking-temperature component)을 보여준다. Fig. 3b의 시료 23-3은 3성분의 고지자기 방향을 보여주는 예로, 현재 지구자기장 방향의 점성성분으로 사료되는 성분은 300~400°C의 온도에서 제거되며, 자철석의 큐리온도인 약 580°C 이하의 저온성분과 580°C 이상에서 원점을 향하는 고온성분으로 분리된다. 저온성분은 다소 분산되어 있으나 지층경사보정 전의 방향이 주로 NE에서 E의 정자화를 기록하고 있으며, 지층경사보정 후의 분산도가 보정 전에 비하여 월등히 증가하여($k_2/k_1=0.15$) 백운산 향사대 구조 형성 이후에 획득된 성분임을 지시한다(Fig. 4). 지층경사

보정 후의 고온성분은 낮은 복각값을 기록하고 있으며, 4개의 노두들(16, 32, 33 및 42)은 정자화를, 6개의 노두들(21, 22, 23, 35, 36 및 38)은 역자화를 기록하고 있다(Table 2). 각 노두에서 시료들의 방향은 서로 잘 일치하고 단일 극성(polarity)을 기록하고 있다. 그러나, 각 노두의 평균 방향은 경사보정 전·후 모두 분산되어 나타난다(Fig. 5). 정자극기(역자극기)의 지구자기장 방향은 편각이 0°(180°) 내외의 값을 보이나, 복각은 북반구에서는 양(음)의 값을 남반구에서는 음(양)의 값을 갖는다. 본 고목층군에서는 음(양)의 복각을 갖는 시료들의 편각은 0°(180°)와 가까운 값을 가지므로(Table 2), 본 층군의 퇴적장소가 남반구임을 지시한다. 그러므로, 정자화를 기록하는 시료들은 역자극

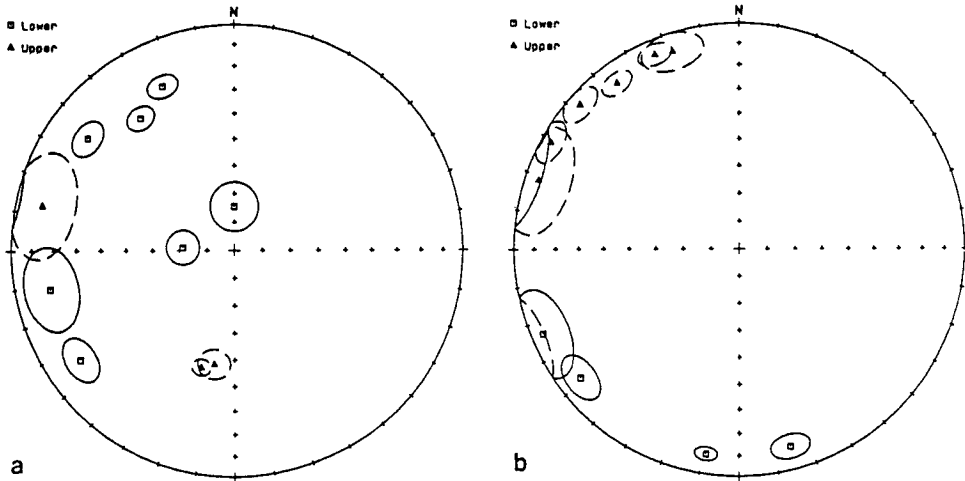


Fig. 5. Site mean directions and 95% confidence circles of the pre-folding components from the Komok Group (a; geographic coordinates, b; stratigraphic coordinates).

기에, 역자화를 기록하는 시료들은 정자극기에 퇴적되었다. 경사보정 전·후의 방향을 비교하면, 경사보정 전의 노두 35와 36의 방향이 경사보정 후에는 다른 노두들의 방향과 동일하거나 반대 위치로 이동을 한다. 또한, 경사보정 전과는 달리 경사보정 후에는 노두의 방향들이 수평에 가까운 북각값을 가지며, 수직축에 대하여 대원을 따라 분포한다(Fig. 5b). 이러한 방향의 분포는 야외에서 측정된 국지적인 지층의 방향에 의한 지층경사보정이 불력의 회전과 같은 광역적 변위를 완전하게 보정하지 못하였을 가능성을 의미한다(MacDonald, 1980). 또한, 각 노두에서 구한 자극들이 시료채취 장소(128.8°E, 37.2°N) 근처에 위치한 점을(129.4°E, 40.2°N) 중심으로하는 원호상에 분포하는 양상도 불력의 회전을 제시하고 있다(Fig. 6). 불력회전과 같은 광역적 변위의 정확한 특성은 현재로서는 알 수 없으며, 앞으로 이에 대한 체계적인 연구가 요망된다. 이러한 상황에서는 상호 반대방향을 이루는 노두들의 자화방향이 연구 지층에 기록된 자화방향을 가장 잘 대표할 것이다. 역자화를 기록하는 노두 23과 36의 방향은 정자화를 기록하는 노두 32의 방향과 서로 거의 정확히 반대방향을 이루고 있다(Table 2 및 Fig. 5b). 이 3 노두들은 서로 멀리 위치하고 있어, 동일한 구조적인 변동을 받았을 가능성이 적다. 또한, 이들의 자극위치는 북중국 지판의 자극위치와 잘 일치한다(고찰 및 결론 참조). 이러한 사실들은 상기한 3 노두들은 다른 노두들과는 달리 불력회전과 같은 구조적 변동을 받지 않았거나 적어도 적게 받았음을 지시한다. 그러므로, 본 지층의 평균자화 방향은 이들 3 노두들의 방향을 이용하여 계산하였다(Ta-

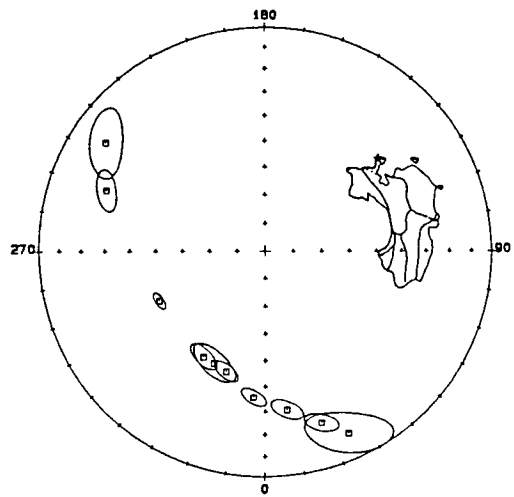


Fig. 6. Pole positions from the Komok group showing the arcuate distribution and the location of the sampling district (star).

ble 2). Fig. 7a는 이들 방향 중 정자화의 반대방향(antipodal direction)을 역자화의 평균방향과 비교한 것으로, 하나의 방향이 다른 방향의 α_{95} 원 안에 포함되어 이들 방향은 95%의 신뢰도를 가지면서 역전시험을 통과한다.

만항층은 하부 모스크오비안에 퇴적된 것으로 알려져 있으며(Lee, 1987), 이 기간은 페름기-석탄기 역자화 슈퍼크론(Permo-Carboniferous reversed superchron)에 해당된다. 그러나, 본 연구의 만항층에서는 정자화와 역자화가 모두 측정되었다. 정자극기의 자기장을 기록하고 있는 시료들은 다음 두 가지 이유에 의하여 설명할 수 있다. 첫째,

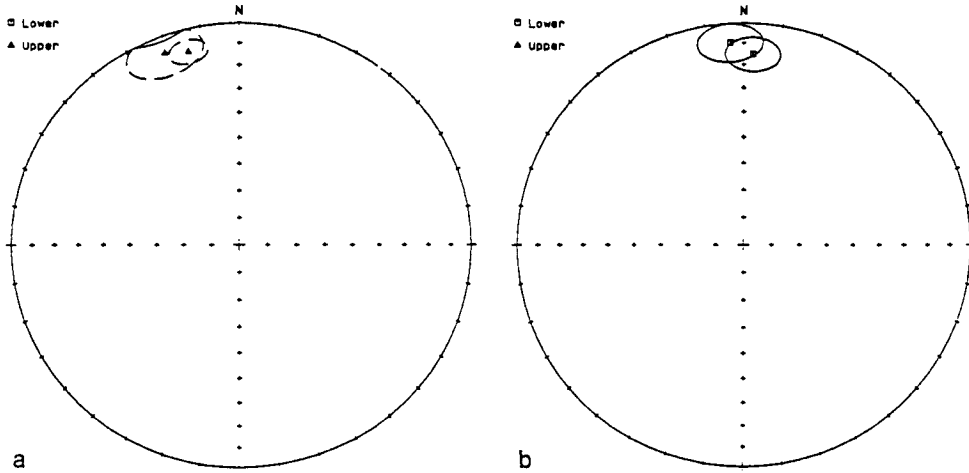


Fig. 7. Reversal test applied to selected site mean directions (see text) from the (a) Komok and (b) Cheolam Groups. The mean of each polarity population is calculated and one population is reversed for comparison with the other; 95% confidence circles are shown.

Table 3. Paleomagnetic results from the Cheolam Group in the Samcheok area.

Site	n/N	Dg	Ig	Ds	Is	k	α_{95}	
20	6/6	171.0	-52.4	174.6	-5.7	23.8	16.5	D1, G5
31	6/8	174.2	-58.8	176.9	-11.8	82.3	9.6	G6
34	8/8	174.9	-59.4	177.3	-1.5	70.8	7.7	G8
44*	7/9	152.8	-52.6	156.6	-4.0	22.5	15.7	G7
18	5/7	182.8	-3.9	176.0	-19.6	393.4	5.7	G5
24*	4/5	323.3	41.9	323.5	11.9	459.9	5.0	D2, G2
30	7/7	9.1	47.1	2.8	13.3	127.7	5.6	D5, G2
39	9/9	5.8	20.1	2.6	16.9	31.2	9.8	D4, G5
40*	7/7	213.4	-19.8	213.2	-18.0	26.7	12.4	D4, G3
Ave	3	351.8	49.3	341.1	-9.2	296.2	7.2	($k_2/k_1=37.5$)

n/N; number of samples used in average/measured, Dg and Ig; *in situ* declination and inclination, Ds and Is; tilt-adjusted declination and inclination, k; Fisherian precision parameter (k_1 ; *in situ*, k_2 ; tilt-adjusted), α_{95} ; radius of cone of 95% confidence interval, D and G; number of direct observations and great circles, respectively, *; site means omitted in calculation of average (see text for explanation).

페름기-석탄기 역자화 슈퍼크론 동안 역자화만 지속된 것이 아니라, 지구자기장의 방향변화가 있었을 가능성이 있다. 예를 들면, 이 역자화 슈퍼크론내에 해당되는 하부 모스크비안과 대비되는 Westphalian B에 정자화 기간이 발견되고 있다(Khramov, 1987; Khramov *et al.*, 1981). 두번째로, 만항층의 연대를 측정한 식물화석이 어느 층군에서 채취되었는지는 모르지만, 본 연구의 정자극기의 자기장을 기록하는 시료들은 만항층의 하부 혹은 중하부에서 채취되어 식물화석을 채취한 층군보다 하부일 가능성이 있다. 이러한 경우, 측정된 자화는 페름기-석탄기 역자화 슈퍼크론 이전의 지구자기장을 나타낸다. 만약, 만항층에서 측정된 정자극기의 자화가 상기한 두 가지 가능성에 의한

것이 아니라면, 이 자화의 획득시기가 지층퇴적 이후일 것이다. 그러나, 이 자화성분은 적어도 본 지역의 지층습곡 이전에 획득한 것이다.

만항층의 상부 지층인 금천층에서는 회색사암 시료들을 채취하였으나, 낮은 소자단계에서 시료의 자화강도가 극저온자력계에 의하여도 측정결과와 해석이 불가능할 정도로 약하여 현재 지구자기장 이외의 고지자기 방향을 추출할 수 없었다(Fig. 3d).

철암층군

철암층군의 하부층인 장성층과 함백산층에서는 각각 3

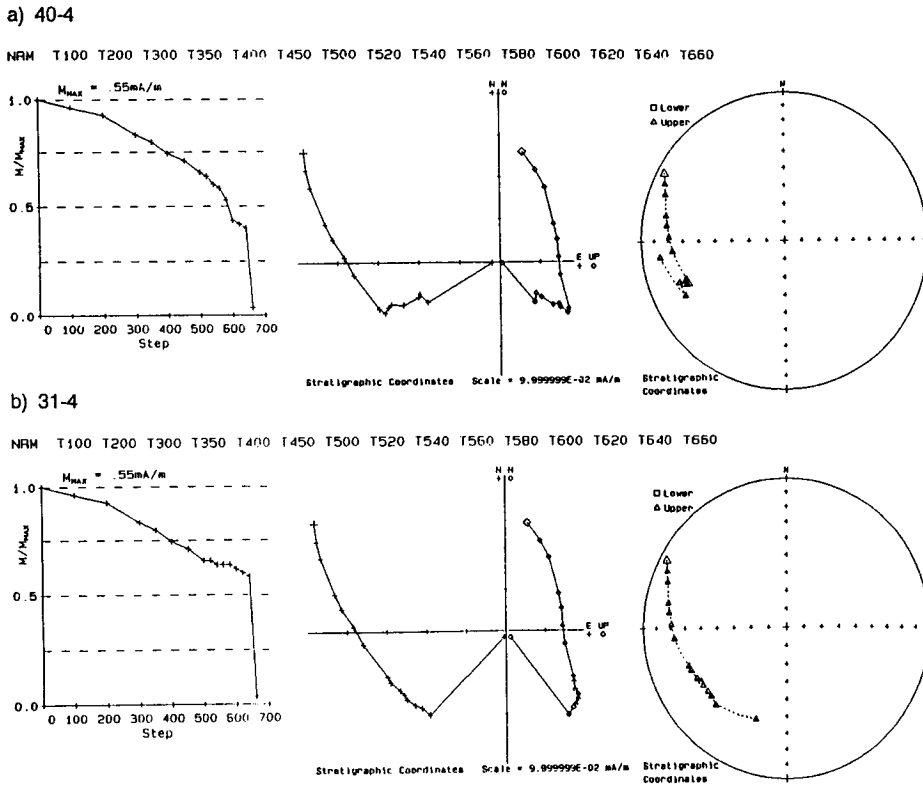


Fig. 8. Typical demagnetization results (normalized intensity curves, Zijderveld diagrams, and equal-area projections in stratigraphic coordinates) from samples of the Cheolam Group. Demagnetization steps are shown below sample number.

개소와 4개소의 노두들에서 시료를 채취하였으나, 고목층군의 금철층과 같이 현재 지구자기장 방향 이외의 고지자기 방향을 측정할 수 없었다. 도사곡층과 고한층에서는 각각 6개소의 노두(총 12개)에서 총 97개의 시료를 채취하였으나, 회색세일로 구성된 도사곡층 노두 1개소와 고한층 노두 2개소에서 채취한 시료들은 자화강도가 매우 낮아 현재 지구자기장 방향 이외의 고지자기 방향을 측정할 수 없었다. 그러나, 적색세일 및 사암으로 이루어진 나머지 9개 노두들(도사곡층 5개소 및 고한층 4개소)에서는 고지자기 방향을 추출할 수 있었다. 이들 시료의 일부는 2성분의 고지자기 방향을 기록하고 있다(Fig. 8a). 그러나, 대부분의 시료들은 적철석에 의하여 기록되는 고온성분과 저온성분의 봉쇄온도 스펙트럼이 중첩되어 McFadden and McElhinny(1988)의 대원법을 이용하여 고온성분을 추출하였다(Fig. 8b 및 Table 3). 봉쇄온도 스펙트럼이 중첩되지 않은 시료에서 측정된 저온성분들은 현재 지구자기장 방향이나 NE 방향을 기록하고 있다. 도사곡층은 정자화(24, 30 및 39)와 역자화(18 및 40)를 기록하고 있으며, 고한층은 4개 노두 모두 역자화를 기록하고 있다.

이들 방향은 95%의 신뢰도를 가지면서 역전시험을 통과한다(Fig. 7b).

철암층군의 도사곡층은 페름기-석탄기 역자화 슈퍼크론 말에 해당되는 카자니안(Kazanian)에 퇴적된 것으로 알려져 있다(Lee, 1987). 그러므로, 정자화와 역자화를 기록하는 도사곡층의 자화성분은 지층퇴적 이후에 획득한 후기 퇴적잔류자화(post-depositional remanent magnetization) 혹은 초기 숙성작용시에 획득한 화학잔류자화(chemical remanent magnetization)임을 시사한다.

고온성분을 기록하는 철암층군의 9개 노두들 중에서 3개의 노두들(24, 40 및 44)의 방향은 다른 6개의 노두들의 방향과 복각은 유사하나 편각의 차이를 보인다(Table 3 및 Fig. 9). 이러한 편각의 차이는 시료 채취시 야외에서 인지하지 못한 국지적인 지구조운동에 기인한 것으로 추정된다. 그러므로, 본 층군의 평균값 계산시 편각차이를 보이는 3개 노두들의 방향을 제외하였다(Table 3).

고찰 및 결론

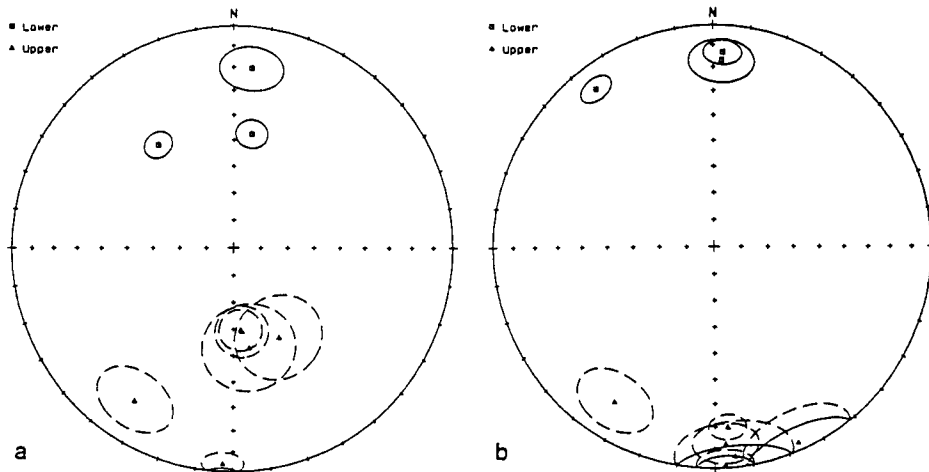


Fig. 9. Site mean directions and 95% confidence circles of the pre-folding components from the Cheolam Group (a; geographic coordinates, b; stratigraphic coordinates).

Table 4. Summary of paleomagnetic poles from this study.

Age	n/N	Pole Position	A ₉₅	Fold Test	Reversal Test
U. Permian	41/6	311.9°E, 58.7°N (358.3°E 47.4°N)*	4.1	99%	Pass
U. Carboniferous	23/3	335.7°E, 44.6°N (7.3°E 28.2°N)*	6.9	99%	Pass

n/N; Number of samples/sites, *; corrected for regional clockwise rotation.

본 연구지역에 분포하는 평안누층군에 대한 고지자기 연구는 이미 Otofujii *et al.*(1989)에 의하여 수행되었으나, 이들은 현재 지구자기장 방향 이외의 고지자기 방향을 추출하는데는 실패하였다. 이들의 소자결과는 대부분의 시료들이 300~400°C의 온도에서 자화를 잃어서 잔류자화를 기록하는 주 자성광물이 자류철석임을 지시한다. 이러한 결과는 본 연구에서 현재 지구자기장 이외의 고지자기 방향을 추출하지 못한 회색세일이나 사암에서도 동일한 양상을 보여준다. 또한, 열자기시험 결과에서도 이 시료들에 함유된 주 자성광물이 자류철석임을 나타낸다. 그러나, 적색층에서 채취한 시료들은 2~3 성분의 방향을 가지며 과거 지구자기장 방향을 기록하고 있다. 고목층군과 철암층군의 고온성분의 평균 고지자기 방향은 모두 습곡시험 및 역전시험을 각각 99%(고목층군: $k_2/k_1=37.5$, 철암층군: $k_2/k_1=9.4$, McElhinny, 1964) 및 95%의 신뢰도를 가지며 통과한다(Table 2와 3). 그러나, 고목층군에서 측정된 NE 혹은 N 정자화 방향의 저온성분은 습곡시험을 통과하지 못한다. 이러한 사실은 고목층군과 철암층군의 고온성분으로부터 구한 평균 고지자기 방향은 백운산 향사대 구조형성 이전에 획득한 성분임을 지시한다. 이들 방향으로부터 구한 고지자기극의 위치는 Table 4에 요약하였다.

고목층군의 저온성분에 대한 경사보정 전의 노두별 평균방향(site mean level)은 다소 분산되어 있으나, 이들 방향은 거의 유사한 복각과 편각의 분산도를 가지며 NE 상한에 집중되어 분포한다(Fig. 4a). 이러한 분포는 이 방향이 구조적 운동에 의한 영향을 크게 받지 않았음을 지시한다. 더욱이 이 성분은 경사보정 후에는 분산도가 커져서($k_2/k_1=0.15$), 통계학적으로 95%의 신뢰도를 가지며 습곡시험을 통과하지 못하여, 본 성분이 백운산 향사대 구조형성 이후인 백악기 초 이후에 기록된 성분임을 지시한다. 이들의 평균방향은 $D/I=54.0/54.6^\circ$, $\alpha_{95}=14.6^\circ$ 이며, 이로부터 계산한 고지자기극의 위치는 $200.8^\circ E$, $48.6^\circ N$ 이다. Table 5는 지체구조학적으로 비교적 안정된 분지로 알려진 경상분지에 분포하는 경상누층군 암석에서 측정된 백악기 시대의 고지자기 방향과 본 연구에서 백악기에 획득한 것으로 추정되는 저온성분의 방향을 비교한 것이다. 두 방향의 복각은 상호 유사하나, 편각은 약 25~30° 정도의 차이를 보인다. 이러한 두 방향의 편각차이는 연구지역이 경상분지에 대하여 시계방향으로의 회전이 일어났을 가능성을 지시한다. 이러한 결과는 연구지역에 분포하는 평안누층군의 최상부층인 동고층에서 측정된 백악기 성분에서 관찰된 결과(도성재, 1993)와 일치한다. 본 성분의 NE 편각은 Kim and Van der Voo(1990)에 의한

Table 5. List of the selected Cretaceous poles.

Location	D	I	α_{95}	N	Reference
Kyongsang Basin	28.3	58.2	6.4	3 Sites	Otofuji <i>et al.</i> (1986)
Kyongsang Basin	28.1	57.5	5.8	19 Sites	Lee <i>et al.</i> (1987)
Kyongsang Basin	29.3	56.8	3.3	20 Sites	Doh <i>et al.</i> (1993)
Study Area (Tonggo F.)	58.8	55.5	5.1	33 Sites	Doh (1993)
Study Area	54.0	54.6	14.6	9 Sites	This study

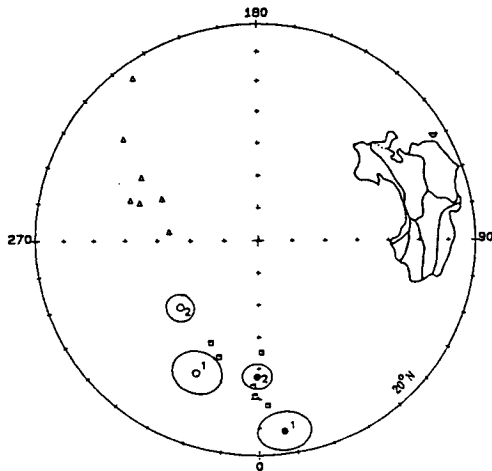


Fig. 10. Paleopoles for the North (open squares) and South (open triangles) China Blocks of Permian results as defined by quality selected poles (Enkin *et al.*, 1992) and compared with the poles of this study. The poles from this study are plotted both adjusted for local tilt (open circles: 1; the Komok Group, 2; the Cheolam Group) and corrected for the regional clockwise rotation (closed circles) recognized from the post-folding component.

쥬라기 화강암에서 관찰된 편각과 일치한다. 이러한 사항들을 고려할 때, 본 저온성분은 대보조산운동과 관련된 재자화 성분임을 제시한다. 본 성분의 방향은 1개소의 노두에서 채취한 시료를 제외한 모든 시료들이 정자화를 기록하고 있다. 이러한 사실들은 본 성분이 백악기 초 이후에 정자화가 장기간 지속된 기간인 Cretaceous Long Normal Superchron(CLNS) 동안에 주로 획득한 성분임을 제시한다.

대보조산운동은 화강암의 관입을 수반하며(Lee, 1987), 이와 관련된 재자화의 원인으로 다음의 두 가지를 생각할 수 있다: 1) 화강암의 관입과 관련된 광역적 열변성작용으로 인한 재자화 2) 연구지역 북부에 나타나는 지각의 이동 및 중첩현상 등과 같은 육천대의 지구조 운동에 의한 유체(fluid) 이동과 관련된 재자화(예, Oliver, 1986). 전자에 의하여는 암석이 부분 열잔류자화(partial thermorema-

nence)를 획득하며, 후자의 경우에는 적철석의 생성으로 인하여 화학잔류자화(chemical remanence)가 기록된다. 본 연구의 저온성분은 주로 자철석에 의하여 기록되어 있어, 재자화의 원인으로 전자의 경우임을 지시한다.

적철석에 의하여 기록된 고온성분은 습곡시험과 역전 시험을 모두 통과하여, 본 성분이 지층형성 당시 혹은 적어도 지층경사(습곡) 이전에 획득한 1차성분임을 나타낸다. 이들의 노두별 평균방향은 시료채취 장소를 중심으로 하는 소원(small circles)을 따라 분포하여 구조적 복잡성을 보여주며, 이러한 현상은 동아시아 지역의 고지자기 연구에서도 흔히 보고되는 현상이다(Enkin *et al.*, 1992). 이러한 고지자기 방향의 분포는 철암층군에 비하여 고목층군에 두드러지게 나타나서, 고목층군의 퇴적시기인 상부 석탄기와 철암층군의 퇴적시기인 상부 페름기 사이에 존재하는 부정합 기간에 구조적인 운동이 있었음을 지시한다.

본 연구의 고온성분에 의하여 계산된 연구지역의 고위도는 석탄기에는 5°S, 페름기에는 6°N이다. 연구지역에 분포하는 평안누층군의 최상부층인 동고층의 퇴적시기인 트라이아스기의 고위도는 10°N이다(도성재, 1993). 이러한 고위도의 분포는 연구지역이 평안누층군이 퇴적되는 기간에 적도부근에 위치하였음을 나타낸다. 이러한 고위도는 연구지층에서 산출되는 석탄층이 적도지방에서 형성되었음을 의미하여, 유럽과 북미의 동부지역에서 산출되는 동시대의 석탄층과 같이 저위도 지역에서 형성되었다.

Fig. 10은 본 연구지층의 고온성분으로부터 구한 고지자기극과 북중국과 남중국 지판의 상부 고생대 고지자기극들의 위치를 비교한 것이다. 본 연구지층의 고지자기극의 위치는 남중국보다 북중국의 고지자기극 위치와 유사하여, 연구지역이 지층퇴적 시기에 북중국과 동일한 지판에 속하였거나 적어도 북중국과 매우 유사한 위치에 있었음을 제시한다. 더욱이, 본 연구의 고지자기극 위치를 백악기 재자화성분으로부터 제시된 약 30°의 시계방향으로의 회전에 대한 보정을 하면, 고지자기방향과 극의 위치는 석탄기의 고목층군은 $D/I=311.1/-9.2^\circ$, $7.3^\circ E$, $28.2^\circ N$ 이며, 페름기의 철암층군은 $D/I=148.3/-11.5^\circ$,

358.3°E, 47.4°N으로 바뀌어 동시대의 북중국 고지자기 극들의 위치와 거의 정확히 일치한다(Fig. 10). 이러한 결과는 연구지역이 석탄기와 페름기에 북중국과 동일 지판에 속하였음을 제시한다. 연구지역에 분포하는 평안누층군의 최상부 지층인 트라이아스기 초에 퇴적된 황지층군의 동고층에 대한 고지자기 연구에 의하면(도성재, 1993), 이 시기의 고지자기극 위치도 본 연구결과와 같이 북중국 고지자기극들의 위치와 일치한다. 이러한 결과들을 종합하면 연구지역은 적어도 중생대 초까지는 북중국과 동일한 지판에 속해 있었음을 지시한다.

사 사

본 연구는 전략광물자원연구센터 및 1994년도 교육부 기초과학육성연구비(BSRI-94-5403)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드린다. 야외조사 및 시료채취시 도움을 준 공주대학교 이동우 교수 및 고려대학교 황창수, 도면작성에 도움을 준 고려대학교 박용희 및 김방연에게 감사드린다. 끝으로, 본 논문을 세심하게 심사하여 많은 조언을 해주신 이윤수 박사께 깊은 사의를 표한다.

참고문헌

- 도성재 (1993) 백운산 향사대에 분포하는 동고층에 대한 고지자기 연구. 광산지질, 26권, p. 383-393.
- 정창희 (1969) 강원도 삼척탄전의 층서 및 고생물 연구 (I). 지질학회지, v. 5, p. 13-54.
- Cluzel, D., Cadet, J. P. and Laperre, H. (1990) Geodynamics of the Ogcheon Belt (South Korea). *Tectonophysics*, v. 183, p. 41-56.
- Cluzel, D., Jolivet, L. and Cadet, J. P. (1991) Early middle Paleozoic intraplate orogeny in the Ogcheon belt (South Korea), a new insight on the Paleozoic buildup of East Asia. *Tectonics*, v. 10, p. 1,130-1,151.
- 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.
- 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.
- Khramov, A. N. (1987) *Paleomagnetology*. Springer-Verlag, New York, 308p.
- Khramov, A. N., Pechersky, D. M., Molostovsky, E. A. and Rodionov, V. P. (1981) Paleomagnetic scale of Paleozoic and Mesozoic of the USSR. In *Magnitostroi i geodynamika. Radio i svyaz*, Moscow, p. 38-51.
- 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. 3,659-3,669.
- 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.
- Molnar, P. and Tapponnier, P. (1977) Relation of the tectonics of eastern China to the Indian-Eurasian collision: application of strike-line field theory to large-scale continental tectonics. *Geophysics*, v. 5, p. 212-216.
- 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., Katsuragi, 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 Paegun-san 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.
- 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.