Econ. Environ. Geol.
Vol. 29, No. 3, p. 357-367, 1996.

남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구*: 1. 장기지역

김인수** · 강희철**

Palaeomagnetism of Tertiary Basins in Southern Korea*: 1. Changgi Basin

In-Soo Kim** and Hee-Cheol Kang**

ABSTRACT : **A total of 113 samples (basalts, tuffs, and siltstones from coal-bearing sediments) was collected from 14 sites of the Tertiary Changgi basin in southeastern Korea, and studied palaeomagnetically. Site-mean declination of the ChRM from 5 sites was found to be deflected clockwise about 30°. Other 5 sites showed no vertical-axis deflection of ChRM direction. In consideration of previous palaeomagnetic data from other Tertiary basins in the vicinity, it is interpreted that the deflection of ChRM directions has been caused by NNW-SSE simple shear associated with the opening of the East Sea, and the time of rotation should be about 16 Ma. Other 2 sites showed counterclockwise deflection of site-mean ChRM. These sites might be located among lager tectonic blocks which were rotating clockwise. AMS (anisotropy of magnetic susceptibility) study revealed NE→SW directed magnetic lineation at two tuffaceous sites. This might indicate flow direction of tuffs during the time of deposition. Most of the other sites showed load-foliation lying subparallel to the bedding plane. This must have been caused by gravitational loading acted vertically to the strata.**

서 론

한반도의 제3기 지층들은 아시아대륙 연변해 (marginal sea)의 하나인 東海를 따라서 소규모로 산재되어 있다. 김봉균 (1970)은 이들을 북으로부터 길주-명천, 북평, 영해, 포항, 어일 및 울산분지로 명명하였다. 이들 제3기 분지들은 서로 격리되어 분포할 뿐 만아니라 상당한 암상의 차이를 보이는 관계로 층서상의 상호대비가 용이치 않다. 따라서 자기층서학적 데이타 등의 여러 지층대비의 수단들이 요구되고 있다. 아울러서 길주-명천분지와 북평분지를 제외한 이들 제3기 분지들은 북동으로 달리는 양산단층과 그에 평행한 단층들에 의하여 규제되고 단절되며 발달되어 있는 특성상, 구조지질학 내지 지구조학적 측면에서도 이들 분지의 생성메카니즘이나 분지발달사에 대한 관심이 크다. 근래의 포항이남 양산-울산단층계 동편 제 3기 분지지역에서의 고자기 연구 (Kim *et al.*, 1986; 김인수, 강희철, 1989; Han, 1989; 김인수, 1990a; 이현구 등, 1992; 김광호 등, 1994; 민경덕 등, 1994; Kikawa *et al.*, 1994)를 보면, 중기 Miocene인 약 16 Ma보다 더 오랜 지층들은 대부분 시계방향으로 수평회전된 잔류자기를 보이고 있음이 밝혀졌으며, 그를 초래한 지구조운동의 원동력이 동해의 남북확장으로부터 기원되었음이 주장된 바 있다 (김인수, 강희철, 1989; 김인수, 1990a, b). 이러한 해석은 한반도와 남서일본열도 지역, 그리고 나아가서는 東아시아 지역에서의 여러가지 신생대 지질현상들을 총괄적으로 이해하는데 있어서 중요한 관건이 되는 것이므로 (김인수, 1992) 우리나라 여러 제3기 분지지역에서 보다 많은 고자기학적인 데이타들이 수집되고 취합되어야 할 필요가 있다. 본 연구는 이

* 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음 (과제번호: 01-D-0154)
** 부산대학교 지질학과 (Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea)

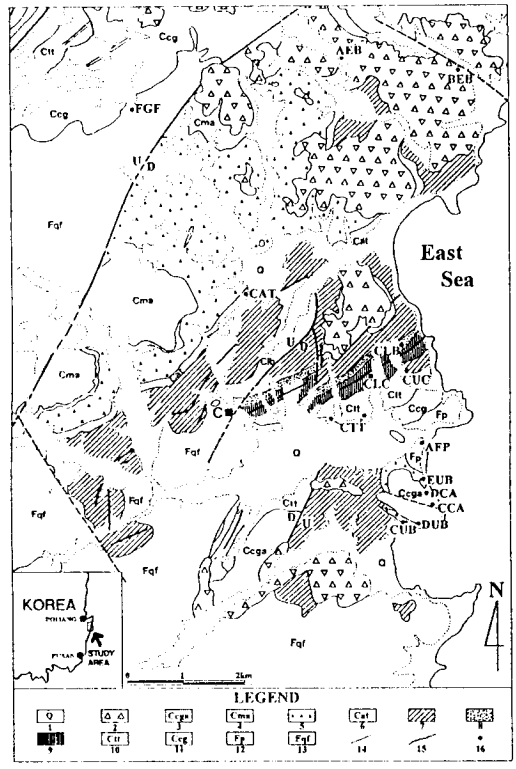

Fig. 1. Geologic (adapted from Tateiwa, 1924) and sample sites (Table 1) map of the study area. 1. Alluvium, 2. Yonil Basalt, 3. Changam Andesite & Tuff, 4. Manghaesan Andesite & Tuff, 5. Upper Basaltic Tuff, 6. Kumori Andesitic Tuff, 7. Upper Coal-bearing Formation, 8. Lower Basaltic Tuff, 9. Lower Coal-bearing Formation, 10. Nuldaeri Trachytic Tuff, 11. Jangki Conglomerate, 12. Quartz Porphyry, 13. Bulguksa Granites, 14. Geologic boundary, 15. Fault, 16. Sample sites, C: Changgi-eup (town).

러한 취지의 일환으로 수행되었다.

연구지역인 장기분지는 포항분지와 어일분지 사이에 위치하고 있으며 (Fig. 1) 지리적인 중심좌표는 35.92°N, 129.50°E이다. WMM90 (World Magnetic Model 90) (Quinn *et al.*, 1991)에 의거한 연구지역에서의 현재 지구자기장의 편각 (declination)은 7.3°W이며 복각 (inclination)은 51.0°, 총 자기장의 세기 (total magnetic field intensity)는 49,267 nT (γ)이다. 분지내에 분포하는 제3기 지층들은 층리발달 상황이 양호하고 많은 부분들이 자연잔류자기 (NRM) 강도가 강한 현무암질암이나 응회암질암 등의 화산암으로 구성되어 있어 어일분지와 함께 남한의 제3기 분지들 중, 고자기학적 연구조건이 비교적 양호한 곳이다. 따라서 어일분지 지역 (김인수, 강희철, 1989)에 이어 이 장기분지 지역을 우선적인 후속연구 대상으로 선택하였다. 본 연구에 앞서 몇몇의 기존 연구자들이 이 지역 소수의 노두에서 시료를 채취한 바 있다 (김인수, 강희철, 1989; Han, 1989; 김인수, 1990; 김광호, 도성재, 1994). 본 연구는 장기분지 개별지역에 전념하며 모든 지층들을 망라하기 위한 것이다.

본 장기분지와 주변지역의 지질과 층서에 관한 연구로써는 Tateiwa (1924), 김봉균 등 (1975), 김봉균, 윤선 (1982), 윤선 (1988), Yoon (1982, 1992) 등의 몇가지가 있다. 이들 중에서 Tateiwa (1924)의 지질도와 설명서가 가장 상세한 관계로 이를 본 연구에서의 야외작업과 지층구분의 기준으로 삼았다 (Fig. 1, Table 1).

층서와 지질

연구지역에서 최하위의 기반암을 이루는 것은 산성 내지 중성의 화성암류이다. Tateiwa (1924)는 이 화성암류를 불국사 화강암류의 구성원으로 보아 후기 백악기의 연령으로 생각하였다. 그러나 근래 진명식 등 (1988)의 K-Ar 및 횟션트랙법에 의하면 이들의 연령은 60~40 Ma, 즉 Paleocene말 내지 Eocene말로 나타나고 있다.

이 화성암류는 제3기의 육성퇴적암류들과 화산암류에 의하여 부정합으로 덮힌다. Table 1은 장기일원에서의 Tateiwa (1924)의 제3기 층서계통을 보이는 것이다. Tateiwa (1924)는 층서상 범곡리층군이 장기층군을 부정합으로 피복한다고 보았으며 지질시대는 거의 비슷하다고 하였다. 이들 층군내에 분포하는 퇴적암류는 역암, 수매의 갈탄층, 사암과 이암 그리고 화산쇄설성 퇴적암으로 이루어져 있고 화산암류는 응회암 (용결응회암, 화산력응회암, 결정질응회암), 조면암질안산암, 현무암 등을 포함하고 있다. 이들 장기층군과 범곡리층군은 연일층군에 의하여 다시 부정합으로 피복된다. Tateiwa (1924)는 층서적 관계와 식물화석으로부터 연일층군의 지질시대를 중기 Miocene-초기Pliocene에 해당하는 것으로 보았으며, 연일현무암이 분출된 시기는 제3기말 내지 제4기초인 것으로 추정하였다.

이러한 Tateiwa (1924)의 견해에 대하여 김봉균 등 (1975)이나 윤선 (1988, 등)은 제3기 지층의 자세한 분대나 층서에서 다소 異見들을 제시하고 있다. 김봉균 등 (1975)의 층서계통은 대국적으로 Tateiwa의 것과 거의 유사하다. 이에 반하여 윤선 (1988)의 것은 Tateiwa의 장기층군을 오천층으로, 범곡리층군을 망해산층으로 묶은 점에서 구별된다. 윤선 (1988)은 또한 제3기분지의 모든 현무암질 암석들을 "어일현무암질안산암질화산암류"로 명명하고 연일층군의 바로 아래, 제3기 장기층군의 최상

Table 1. Sampled stratigraphic units for the study.

Stratigraphic unit	Sample site	Lithology	No. of samples
Yonil Basalt	AEB	basalt	6
	BEB	basalt	9
Pomgokri Gr. Changam Andesite & Tuff	CCA	tuff	9
	DCA	tuff	7
Changgi Gr. Upper Basaltic Tuff	CUB	tuff	7
	DUB	tuff	5
	EUB	basalt	7
Kumori Andesitic Tuff	CAT	tuff	6
Upper Coal-bearing Fm.	CUC	sediments	7
Lower Basaltic Tuff	CLB	basalt & tuff	14
Lower Coal-bearing Fm.	CLC	sediments	8
Nuldaeri Trachtic Tuff	CTT	tuff	14
Cretaceous(?) basement rocks	AFP	welded tuff	6
	FGF	granite	9
Total	14 sites		113

Gr. : Group, Fm. : Formation

부로 가져다 놓고 있다.

그러나 이와같은 층서적인 이견과는 달리, 이 지역 제3기 암석들의 생성시기에 대해서는 세 연구 모두 Eocene~Miocene으로 보는 점에서 견해가 일치되고 있다.

시료 채취

본 연구를 위한 시료채취작업은 Tateiwa (1924)의 지층구분을 따르면서 장기일대의 제3기지층 모두를 대상으로 하여 고자기학적 시료를 채취하기에 적합한 장소(sampling site, 노두)들을 찾으며 시행되었다 (Table 1). 이 장소들의 암석은 주로 잔류자기강도가 높은 현무암질 화산암, 층리발달이 양호한 응회암질암과 응회질 사암, 그리고 Tateiwa (1924)가 후기백악기로 기재한 불국사 화강암류였다.

地磁氣의 長年變化 (secular variation) 효과를 상쇄시키기 위하여 각각의 장소 (site)에서 가능한 한 넓은 수직층서 범위를 망라하며 시료채취를 시행하였다. 모든 시료들은 휴대용 착암기를 이용하여 길이 약 4~6 cm의 착공시료 (core sample)로 획득되었으며, 지질조사용 compass를 사용하여 core의 orientation값과 지층면의 주향/경사값이 측정되었다. 불국사 화강암류의 경우에는 古수평면의 인지가 곤란하였다. 그러나 古수평면 여부의 참고자료로 삼기 위하여 광물들의 배열 면구조를 측정하였다. 이와같이 하여 모두 3개 장소에서 현무암질암 시료를, 8개 장소에서 응회질암 시료를, 2개 장소에서 퇴적암 시료를, 그리고 1개 장소에서 화강암질암의 시료를 채취하였다. 그 결과 총 14개 장소로부터 도합 113개에 이르는 착공시료가 얻어졌다 (Fig. 1, Table 1).

자기세척실험

본 연구의 잔류자기 측정을 위해서는 영국 Molspin사의 스피너 자력계 (spinner magnetometer: Minispin)가 사용되었으며 잔류자기의 안정성 여부를 검토하기 위해서는 Molspin AC demagnetiser (교류자기세척기)와 Schonstedt TDS-1 thermal demagnetizer (열자기세척기)가 이용되었다. 교류자기세척실험은 시료채취 장소별로 4개 이상의 pilot specimens을 선택하여 5 mT로부터 시작하여 10 mT씩 단계적으로 외부교류자장을 증대시키며 최고 100 mT에 이르기까지 11단계의 세척실험을 시행하였다. 세척실험시 vector diagram (orthogonal vector plot, Zijderveld diagram: Zijderveld, 1967)에서 잔류자기가 원점을 향하여 소멸되는지를 검토하였다. 동일 시료채취장소에서 획득된 시료들 사이에서도 잔류자기의 소멸양상이 서로 다르게 나타난다거나 잔류자기 벡터가 원점을 향하여 소멸되지 않는 경우, 그리고 잔류자기가 최고의 교류자기세척자장인 100 mT에서도 자연잔류자기 (NRM)의 절반이상이 소멸되지 않는 경우에는 실험 시편수를 추가시키며 열자기세척실험을 속행하였다. 잔류자기의 소멸이 원점을 벗어나는 실험결과에 대해서는 Kirschvink (1980)의 최소자승법에 의한 주성분 분석법 (PCA: principal component analysis)을 시행하였다.

본 연구에서 나타난 자기세척실험 결과들 중 대표적인

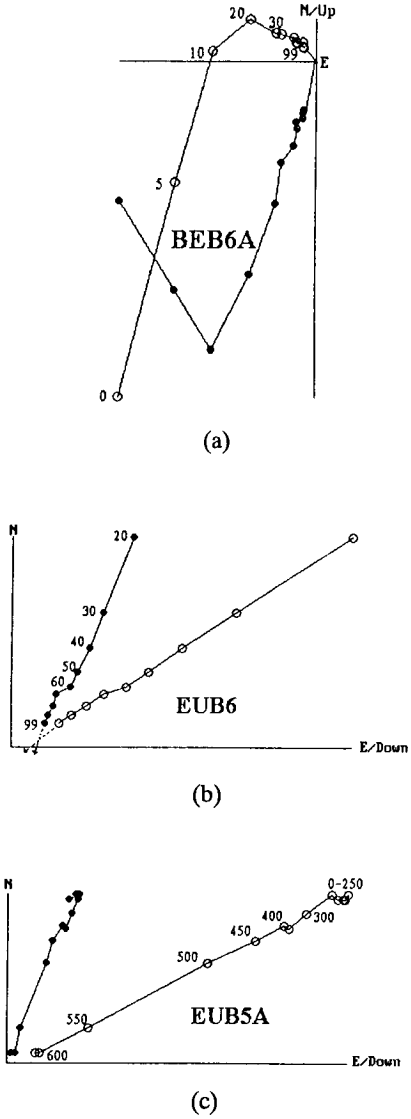

Fig. 2. Demagnetization examples of basalt specimens. (a) In some specimens, a single component ChRM direction was easily isolated by about 20 mT AF field, (b) In other cases, AF demagnetization was not effective for isolation of ChRM direction, (c) Thermal demagnetization on the other specimens from the same site as in (b), by which a single ChRM component was successfully isolated. All the vector diagrams in this paper are depicted in the geographic (in-situ) coordinates, and closed (open) symbols represent projections onto the horizontal (vertical) plane.

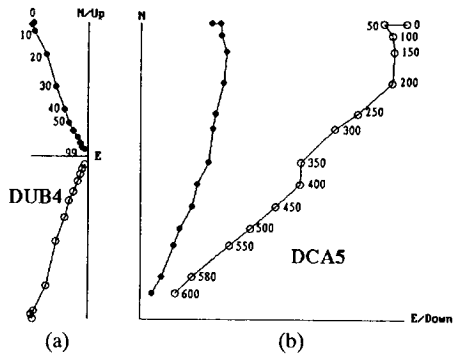

Fig. 3. Demagnetization examples of tuff specimens. (a) AF demagnetization, (b) Thermal demagnetization.

것들을 암종별로 소개하면 다음과 같다. 우선, 현무암시료가 채취된 장소는 3개소인 바, 이들 중 2개소 (AEB, BEB)의 시료들에서는 10~20 mT 정도의 약한 교류세척 자기장에 의하여 2차자화성분이 쉽게 제거되고 단일 ChRM (Chracteristic remanent magnetization, 특성잔류자기) 성분이 분리되었다 (Fig. 2a). 그러나 다른 1개소 (EUB)의 시료들은 100 mT까지의 교류자기세척에도 불구하고 잔류자기가 원점을 향하여 소멸되지 않는 양상을 보였다 (Fig. 2b). 이 EUB장소의 나머지 시료들에 대해서는 열자기세척실험을 적용함으로써 단일 ChRM성분을 분리해내었다 (Fig. 2c). 600℃에서 자화강도가 거의 소멸되는 것으로 보아 이 장소 현무암의 자성광물은 자철석으로 판단된다. 교류자기 세척에서 자화성분의 분리가 일어나지 않은 것은 항자력 스펙트럼의 중첩때문일 것이며 열자기 세척에서 성공적인 것은 큐리온도에서는 차이가 있는 데에 의거할 것이다.

Fig. 3a, b는 응회질암의 자기세척실험결과를 보이는 예이다. 이 응회질암의 경우에서는 10~20 mT의 교류세척만으로 원점으로 소멸하는 단일성분을 보이는 것 (Fig. 3a)과 열자기세척에 의하여서만 단일성분이 분리되는 것들 (Fig. 3b)로 나뉘어졌다. 그러나 어떤 시료들 (CLB, CTT)에서는 교류 및 열자기세척의 양 방법의 시행에도 불구하고 원점으로 소멸하는 단일자화성분이 분리되지 않았다. 이들에 대해서는 Kirschvink (1980)의 PCA방법을 써서 특성잔류자기 (ChRM)를 계산하였다.

퇴적암류의 경우에는 잔류자기의 강도가 전술한 화산암류의 1% 정도에 불과하였기 때문에 vector diagram상에서 깨끗하게 직선을 이루는 단일자화성분을 얻어내기가 용이하지 않았다. 따라서 이들 퇴적암류 (CLC)에 대해서도 PCA를 적용하여 ChRM을 계산하였다.

마지막으로 본 연구지역의 기반암인 화강암류의 경우에는 교류 및 열자기세척의 두 실험에서 서로 방향이 잘 일치되는 단일자화성분이 드러났다 (Fig. 4a, b).

이상과 같은 자기세척실험의 결과들을 토대로 하여 각

시료채취장소에 해당하는 최적의 세척강도를 결정하고, 나머지 모든 시편들에 대해 이 최적 세척강도 전후의 3~4단계의 강도를 적용하여 그 결과가 vector diagram에서 직선으로 나타나는지를 검토하였다. 직선으로 나타나는 시료들에 대해서는 상기 최적세척강도에서의 잔류자기방향을 ChRM으로 하였으며, 명확히 원점으로 소멸되는 직선을 보이지 않는 시료들에 대해서는 원점에 걸치는 PCA법을 적용하여 ChRM을 산출해내었다. 이상의 결과로 나타난 평균 ChRM방향들 (site means)은 Table 2와 Fig. 7에 종합되어 있다. CUC장소의 경우에는 이상의 방법들을 적용하였으나 시료마다의 자화방향들이 분산되어 나타났다. 그러나 일부 CUC시편들은 stereonet상에서 다른 시료채취장소들의 평균 ChRM방향을 향하여 大圓 (great circle)을 그리며 달려가는 잔류자기방향을 보여주는 것으로 보아 (Fig. 5), 이 CUC장소 역시 다른 곳들과 거의 동일한 방향의 ChRM을 보유하고 있는 것으로 파악된다. 그러나 이렇게 대원을 나타내는 시편의 갯수가 충

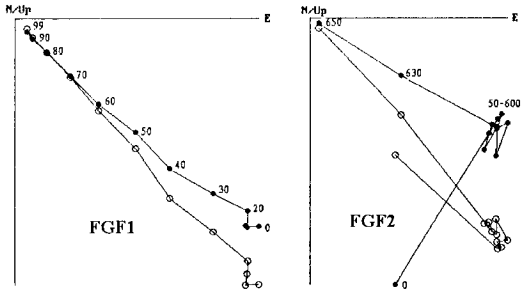

Fig. 4. Demagnetization examples of granite specimens (a) AF demagnetization, (b) Thermal demagnetization.

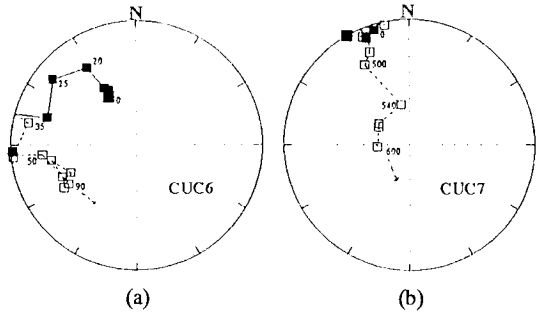

Fig. 5. Some sediments specimens from CUC site showing great-circular variation of RM direction during successive AF demagnetization. Equal-area lower hemisphere projection in the stratigraphic coordinates.

Table 2. Summary of study results (ChRM directions from each site).

Site	Step	n	GDECL	GINCL	$G\alpha_{95}$	BDECL	BINCL	$B\alpha_{95}$
Yonil Basalt								
AEB	50 mT	6	4.5	28.5	6.4	6.1	14.1	6.4
BEB	20 mT	10	198.0	-7.4	6.6	191.9	-48.0	6.6
Pomgokri Group								
CCA	500°C	5	22.2	59.6	4.9	22.2	59.6	4.9
DCA	400°C	7	24.1	42.2	19.4	18.3	38.2	19.1
Changgi Group								
CUB	20 mT	7	359.5	45.1	6.8	7.5	40.1	6.8
DUB	40 mT	5	349.0	46.4	24.3	30.9	40.0	23.5
EUB	40 mT, 450°C	8	26.6	55.9	6.4	0.6	47.1	6.4
CAT	20 mT, 350°C	6	336.7	71.2	27.8	326.8	38.7	27.8
CUC	mean direction not determined							
CLB	PCA	6	38.9	62.8	18.0	25.2	58.6	19.8
CLC	PCA	6	336.8	42.1	12.3	336.6	23.7	12.4
CTT(A)	PCA	3	40.0	47.8	7.3	22.6	22.8	7.3
CTT(B)	PCA	3	239.2	-41.0	20.7	212.7	-55.0	19.8
Cretaceous(?) basement rocks								
AFP	30 mT	6	114.9	57.6	16.2	4.0	53.5	16.2
FGF	40 mT, 630°C	9	116.6	45.5	5.4	107.0	21.2	5.5

n: number of specimens, G(B)DECL: declination in geographic (bedding) coordinates, G(B)INCL: inclination in geographic (bedding) coordinates, G(B)α_{95}: 95 percent circle of confidence in geographic (bedding) coordinates. CTT tuff site has both normal (A) and reverse (B) polarities of ChRM.

Table 3. Clockwise deflected site-mean ChRMs.

Site	Step	n	GDECL	GINCL	$G\alpha_{95}$	BDECL	BINCL	$B\alpha_{95}$
CCA	500°C	5	22.2	59.6	4.9	22.2	59.6	4.9
DCA	400°C	7	24.1	42.2	19.4	18.3	38.2	19.1
DUB	40mT	5	349.0	46.4	24.3	30.9	40.0	23.5
CLB	PCA	6	38.9	62.8	18.0	25.2	58.6	12.4
CTT(A)	PCA	3	40.0	47.8	7.3	22.6	22.8	7.3
CTT(B)	PCA	3	239.2	-41.0	20.7	212.7	-55.0	19.8
FGF	40mT, 630°C	9	116.6	45.5	5.4	107.0	21.2	5.5
Total mean		7	38.0	56.4	19.3	37.5	46.9	22.7

n: number of specimens, G(B)DECL; declination in geographic (bedding) coordinates, G(B)INCL: inclination in geographic (bedding) coordinates, $G(B)\alpha_{95}$: 95 percent circle of confidence in geographic (bedding) Coordinates. CTT tuff site has both normal (A) and reverse (B) polarities of ChRM.

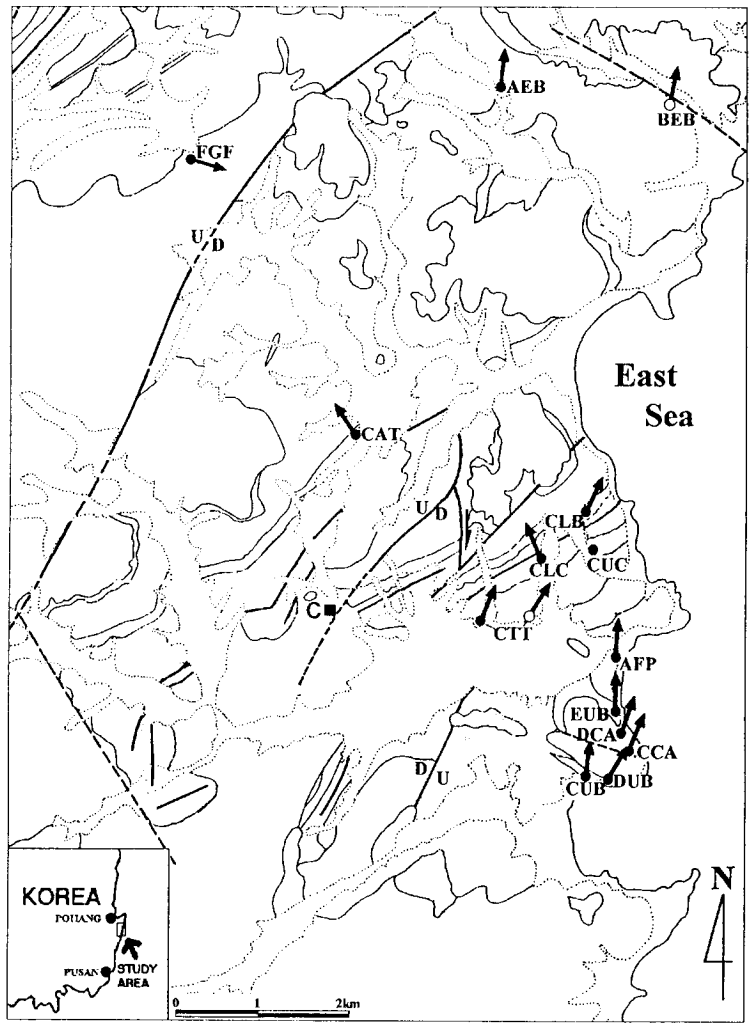

Fig. 6. Site-mean ChRM directions of the study area. Solid (open) symbols represent sample sites with positive (negative) ChRM inclination. Reversed site-mean ChRMs are flipped antipodally into normal polarity. CTT tuff site has both polarities of ChRM.

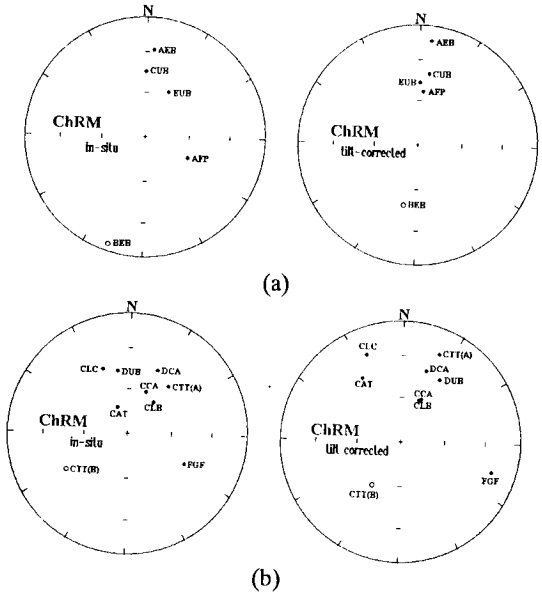

Fig. 7. Site-mean ChRM directions of the study area, subdivided into two groups according to the declination value. (a) A group of ChRM directions which are not significantly deflected from the Cenozoic dipole field direction (i.e. north-south direction) of the area, (b) a group of ChRM directions which are significantly deflected from the Cenozoic dipole field direction of the area. Notice the antipodal disposition (antiparallelism) of the normal and reversed directions in both groups, especially after tilt (bedding) correction, which sugests primary origin of the ChRM directions. CLC, CAT, FGF sites are exceptions and the reason is discussed in the text. Left: Equal-area lower hemisphere projection in the geographic coordinates. Right: Equal-area lower hemisphere projection in the stratigraphic (bedding) coordinates.

분하지 못했던 관계로 Halls (1976, 1978)의 대원기법에 의한 ChRM 방향의 산출은 가능하지 않았다 (Table 2).

세척실험결과 및 토의

전항에서 설명한 자기세척실험을 통하여 얻어낸 결과들 (site-mean ChRMs)은 Table 2, 3과 Fig. 6, 7에 종합되어 있다. 이 결과는 김인수, 강희철 (1989)에 의해서 연구된 어일분지로부터의 고자기 연구결과와 매우 유사하다. Fig. 7a, b 모두에서 좌측의 것은 현재 노두상태에서 (in situ)의 상황을 나타낸 것이고 우측의 것은 층리면을 수평으로 복원한, 즉 지층경사 보정후의 상황을 나타낸 것이다. 지층경사 보정후의 노두평균 ChRM이 현재의 지구 쌍극자 자장방향인 남북방향에 일치하는 것들은 Fig. 7a에 도시하였고 남북방향으로부터 벗어난 (偏向, deviation된) 것들은 Fig. 7b에 도시하였다. 남북방향으로부터 편향되지 않은 前者 (Fig. 7a) 잔류자기 방향들 (site-mean ChRMs)은 제3기 암석들이 생성될 당시의 지자기 방향을 표현하고 있는 것으로 믿어지며, 편향된 後者 (Fig. 7b)의 방향들은 암석생성 이후의 지구조운동에 의하여 지층의 傾動 (tilting)과 수평회전이 초래되어 본래의 남북방향으로부터 벗어나게 된 것들로 해석된다. 그렇다면 전자 지층들의 연령은 후자 지층들의 연령보다 젊을 것인 바, 김인수, 강희철 (1989)은 그 연령의 경계를 16 Ma로 보았다. 이러한 해석에서 외견상으로 한가지 문제가 되는 것은 AFP암석의 연령인데, 이는 Tateiwa (1924)가 이 암석을 석영반암으로 인지하고 백악기 불국사 화강암류와 거의 동시기의 연령으로 보았던 데에 (Fig. 1) 기인한다. 그러나 사실상 이 암석은 용결응회암이며 (필자들의 관찰과 연세대 문희수 교수와의 개인적 의견교환), 지역지질학적 지식에 의거할 때 이 지역에서의 응회암류들의 연령은 신생대 제3기인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 나타난 ChRM자료를 함께 고려한다면 이 AFP암석의 연령은 16 Ma보다 젊을 것이다.

Fig. 7a의 ChRM들은 회전운동의 영향을 받지 않고 현재의 지구자북방향 혹은 이에 反平行 (antiparallel)인 방향으로 배열되어 나타나고 있다. AEB장소를 예외로 할 때 정자화의 평균방향과 역자화방향이 상호 반평행의 관계에 있는 것으로 보아 (reversals test) 이들의 평균은 해당 지층들이 생성된 제3기 시대의 지구자북방향을 지시하는 것으로 여겨진다. 한편, AEB장소 (현무암 노두)의 특성잔류자기가 지층경사 보정후에도 낮은 복각값을 갖는 이유를 확실히 말하기는 쉽지 않다. 아마도 현무암이 분출되던 당시에 초기경사 (initial dip)를 가지면서 고화되었기 때문인 것으로 추측된다. 최근 Baag *et al.* (1995)은 자화강도가 강한 지형에서는 잔류자기의 복각값이 현저하게 낮아질 수 있다는 주장을 하였다 (magnetic terrain effect). 비현실적으로 낮은 복각값을 나타내는 이 AEB장소의 데이타는 총괄적 평균자화방향의 계산에서 제외시키기로 하였다. Fig. 7a에서 AEB장소를 제외한 정자화된 장소들의 평균자화방향은 지층경사 보정전 d=36.7°, i=62.8°, α_{95}=54.5°, k=6.2, n=3이며 지층경사 보정후에는 d=4.2°, i=46.9°, α_{95}=10.9°, k=129.4, n=3의 값을 가진다. 역자화된 장소는 1개소로 이곳에서의 자화방향은 지층경사 보정전 d=198.0°, i=-7.4°, 95=6.6°이며 지층경사 보정후에는 d=191.9°, i=-48°, α_{95}=6.6°가 된다. 정자화된 장소들의 평균자화방향과 이 역자화 방향이 서로 反平行 (antiparallel, antipodal)의 관계를 보이는 것은

역자화 검사 (reversals test)를 통과함을 의미하는 것으로써, 이들이 비록 현재자장방향에 가까운 잔류자기를 가지고 있으나 古期의 일차 (ancient primary) 잔류자기임을 웅변하고 있다. 지층경사 보정을 통하여 군집도가 향상 (특히 AFP)되는 사실도 이를 뒷받침 한다. BEB의 역자화방향을 反轉시켜서 총체적 평균ChRM방향을 구하면 지층경사 보정전에는 d=28.3°, i=48.9°, α_{95}=49.2°, k=4.5, n=4이며 지층경사 보정후에는 d=6.1°, i=47.3°, α_{95}=7.3°, k=160.5, n=4이다. 이 값은 99%의 신뢰도로써 습곡검사를 통과한다. 따라서 이는 본 연구지역에서의 16 Ma이후의 제3기 쌍극자 지구자북방향을 제시하는 것으로 간주되며 이에 의거한 고자기학적 지구자북의 위치는 80.9°N, 273.4°E (dp=6.1°, dm=9.4°)이다.

Fig. 7b에는 CLC, CAT, FGF의 세 경우를 제외한 나머지 ChRM방향들이 지층경사의 보정 여부에 관계없이 공히 현재의 지구 자오선방향 (남북방향)으로부터 동편 (시계방향)으로 평균 약 30°의 회전된 방향을 가리키며 나타나 있다 (Table 3). 이처럼 지층경사의 보정여부에 관계없이 잔류자기방향이 偏向되어 나타나고 있는 사실은 그 원인이 단순한 지층의 傾動 (horizontal-axis rotation)에 있는 것이 아니라, 지층의 생성 이후에 발생한 지구조운동으로 수직축을 중심으로 지층이 수평회전운동 (vertical-axis rotation)을 하게 됨으로써 잔류자기가 함께 회전되었음을 말하여준다. 김인수, 강회철 (1989)과 김인수 (1990a, b, 1992)는 이러한 지층의 회전운동이 동해의 남북확장운동과 관련되어 16 Ma경에 일어난 것으로 주장한 바 있다.

이렇게 시계방향으로 평균 약 30°회전된 잔류자기방향들은 동해의 확장운동에 연관되어 해석될 수 있으나 예외적으로 110°정도 시계방향으로 회전된 FGF노두나 이상의 경우와는 반대인 30°가량의 반시계방향 회전을 보이는 CLC와 CAT노두의 ChRM방향들은 현재의 지식단계로서는 명확한 설명이 곤란하다. 전자인 FGF노두의 경우에는 심성암 (불국사 규장반암)인 관계로 시료채취시 올바르게 古수평면을 인식해내지 못하였을 가능성이 있다. 이밖에도 FGF노두의 위치가 장기분지를 경계짓는 정단층의 바로 외곽에 있는 관계로 (Fig. 1) 정단층작용에 따라 지괴가 보다 많이 끌리며 회전되었을 가능성도 생각할 수 있다. 아울러, FGF노두암석의 연령이 중생대 백악기의 것이라면 지괴회전의 이전부터 상당한 크기의 시계방향 편각을 가지고 있었음이 당연하다. 그렇다면 다른 노두들에서보다 큰 현재 FGF노두의 잔류자기 편각값은 특별히 이상스러울 것이 없는 것이다.

한편, 다른 곳들과는 반대로 西向 반시계방향으로 수평

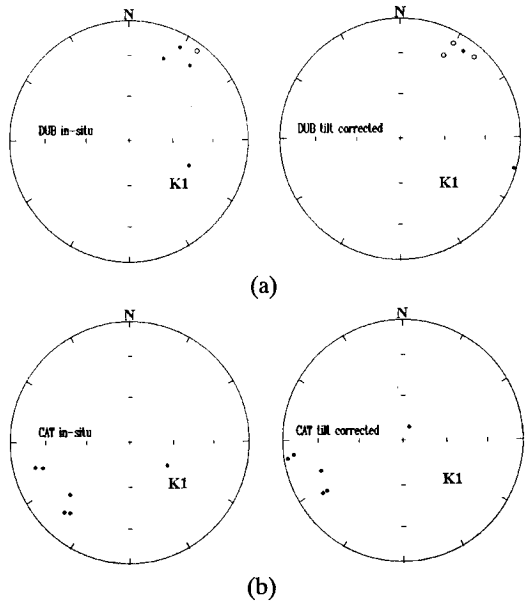

Fig. 8. Two out of fourteen sites showed NE→SW directed magnetic lineation. Left: Equal-area lower hemisphere projection in the geographic coordinates. Right: Equal-area lower hemisphere projection in the stratigraphic (bedding) coordinates.

회전된 (약 30°) CLC와 CAT 두 장소에서의 ChRM방향은 명확한 설명이 더욱 곤란하다. 여기서 상정해 볼 수 있는 가능성은 세 가지가 있다. 첫째는 이 두 장소의 지괴가, 분지가 열리며 시계방향으로 수평회전되던 큰 지괴편 (block)들 사이에 끼인 독립 소지괴로써 톱니바퀴식의 반시계방향 수평회전을 하였을 가능성이다. 지질도에서는 지층의 연장이 좋은 것으로 나타나서 일견 이러한 가능성에 대한 의문이 있을 수 있겠으나 mapping scale 이하의 단층이나 지층의 어긋남이 있을 가능성을 배제할 수 없다. 두번째로는 이 두 장소의 노두연령이 다른 연구장소 노두의 연령들 보다 젊어서, 훗날 (약 15 Ma) 동해의 확장이 만료됨과 동시에 작용되던 대략 남북방향의 좌향 전단력으로 반시계방향의 회전을 하였을 가능성이다 (김인수, 1992). 이와같이 약 15 Ma보다 젊은 제3기지층이 반시계방향의 수평회전을 보이는 사례는 포항분지나 정자분지 등의 다른 제3기분지에서도 알려지고 있다 (김인수, 강회철, 1989; 손문 등 1996, 자원환경지질에 투고중). 세번째로는 CLC와 CAT 두 장소의 시편들이 완벽히 세척되지 못하여 아직도 강력한 VRM (예를들어 TVRM과 같은)을 보유하고 있을 가능성이다. 연구 당사자로서는 이러한 불완전한 세척의 가능성을 믿고 싶지는 않다. 그러나 이 CLC와 CAT 두 장소 시료들의 세척실험시의 거동은 다른 대부분 노두들의

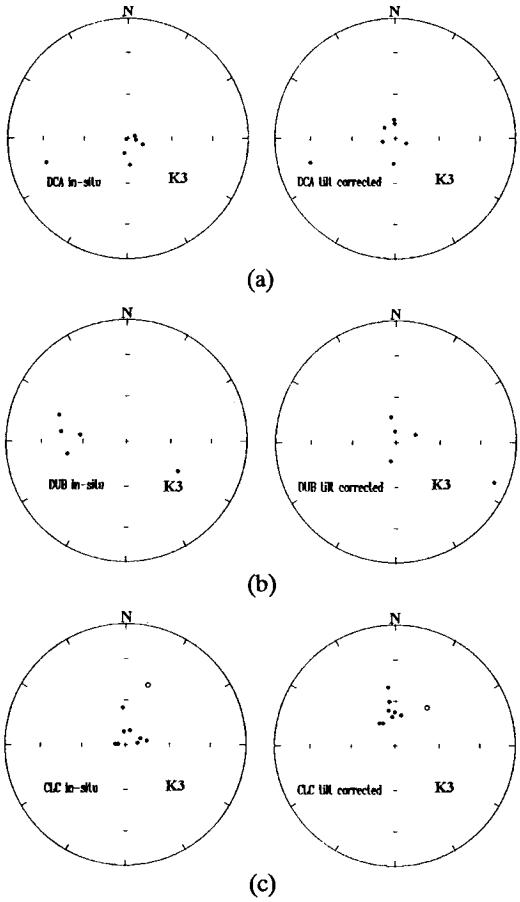

Fig. 9. Thirteen out of fourteen sites showed load foliation. (a) K_3 axes remain perpendicular to the bedding plane either with or without tilt (bedding) correction, (b) K_3 axes become more perpendicular to the bedding plane through tilt (bedding) correction. These (a) and (b) cases indicate that bedding plane is exactly paleohorizontal plane. (c) Perpendicular relationship of K_3 axes become somewhat worsened after tilt (bedding) correction. This suggests initial northward dip of bedding plane.

것들에 비하여 복잡하여, 단일 ChRM성분의 추출이 용이치 않았으며 PCA방법을 통하여 ChRM을 얻을 수 밖에 없었음을 기억하여야 할 필요가 있다. 한편, 지층경사 보정전이 장소들에서의 잔류자기방향은 현재 지구자장방향에 근접하게 놓여있었다는 사실도 (Fig. 7b) 충분히 세척되지 못한 강력한 VRM의 잔류 가능성을 시사한다. 이러한 여러가지 가능성들 중 어느 것이 사실인지는 차후 이 지역에 대한 보다 정밀한 야외지질조사나 보다 많은 고자기학적 시료채취를 통하여 밝혀져야 할 것이다. 본 연구에서는 시간의 한정으로 CLC, CAT, FGF 세 지층들에서 각기 한곳씩에서만 시료를 채취하였다. 그러나 차후의 연구에서는 동일지층에서도 여러 장소 (노두)에 걸치며 시료채취를 시행하여야 할 필요가 있다.

대자율 비등방성

대자율 비등방성 (AMS: anisotropy of magnetic susceptibility) 연구를 위하여 이용된 기기는 영국 Molspin사의 Minisep 대자율 측정기였다. 이를 통하여 서로 수직한 K_1, K_2, K_3의 세 방향과 그 방향으로의 대자율의 크기를 결정하였으며, 그 방향들을 노두별로 등적투영도에 투영하였다. 그 결과 K_1의 방향들이 잘 군집되어 나타나면 그 평균방향을 磁氣的 線構造 (magnetic lineation) 방향으로, K_3의 방향들이 잘 군집되어 나타나면 그 평균방향을 磁氣的 葉理構造 (magnetic foliation: 成因上으로는 tectonic foliation이거나 load foliation)에 수직인 방향으로 규정하였다. 후자인 K_3방향의 경우는 지구조적 응력장 (tectonic force)의 작용방향이거나 또는 지층퇴적시 연직으로 작용하였던 지층하중의 방향으로 해석하게 된다 (김인수, 1990a).

K_1, K_2, K_3 방향들 각각을 노두별로 等積투영도 (Schmidt net)에 투영해본 결과, BEB 하나의 노두 (현무암)에서는 세 방향 모두가 심하게 분산되어 나타났으나 나머지 13개 노두들에서는 대자율 비등방성 (AMS) 구조가 잘 인지되었다. 그러나 이 대자율 비등방성 구조들 모두는 지층면에 대체적으로 평행인 지층하중구조 (load foliation: 김인수, 1990a)이었으며 김인수 (1990a)에서와 같은 지구조적 압축력 (tectonic force)의 방향을 지시하는 자기적 엽리구조 (tectonic foliation)는 나타나지 않았다. 이는 아마도 장기분지의 주변부가 단단한 기반암으로 이루어져 있어 지구조적 압축력을 차단하는 역할을 하고 있었던 때문인 것으로 여겨진다.

자기적 엽리구조를 보이는 13개소의 노두 중에서 DUB와 CAT의 두 노두는 공히 북동에서 남서를 향하여 경사진 자기적 선구조 (magnetic lineation)도 함께 보여주었다 (Fig. 8). 이 두 노두는 응회암으로 이루어져 있는데 (Table. 1) 이 북동→남서의 방향은 퇴적시의 응회암의 흐름방향으로 해석된다. 지층경사를 보정을 실시하면 이 선구조 방향들의 군집도는 다소 향상된다 (Fig. 8). 한편, DUB노두의 ChRM 편각방향은 30.9°인 반면 CAT노두의 ChRM 편각방향은 326.8°로써 서로 판이하게 다른 값을 가지는데 (Table 2) 이는 두 노두들에서 잔류자기 방향과 대자율 비등방성 방향 사이에 상관관계가 없다는 것을 보이는 증거로 받아들여져야 할 것이다. 아울러, 위에서 설명

했던 바와 같이 현무암 BEB노두에서의 대자율 비등방성 구조는 시료들간의 일치를 보이지 않고 분산되어 나타났으나 ChRM에서는 α_{95}=6.6°의 훌륭한 군집도를 보인다는 점도 (Table 2) 이러한 견해를 뒷받침하는 것이다.

자기적 엽리구조 (여기서는 지층하중구조: load foliation)는 자세히 고찰할 때 3개의 부류로 나뉘어진다. 첫째는 지층경사의 보정여부에 별달리 좌우되지 않고 K_3방향들이 대체적으로 지층면에 수직으로 머물어 있는 경우로써 CCA, DCA (Fig. 9a), CUC, AEB, CTT, CLB, CUB의 7개 노두가 이에 해당된다. 두번째의 경우는 지층경사 보정을 통하여 K_3의 평균방향이 지층면에 보다 정확하게 수직하게 되는 경우로써 DUB (Fig. 9b), AFP, CAT의 3개 노두가 이에 해당한다. 이는 야외에서 지층면 (古수평면)의 인식이 훌륭하게 되었음을 지시하는 것이다. 마지막으로 FGF, EUB, CLC (fig. 8c)의 3개 노두에서는 지층경사 보정으로 인하여 평균 K_3방향과 지층면 사이의 수직관계가 다소 나빠진다. 뿐만 아니라, 노두평균의 ChRM 복각값도 지층경사 보정을 실시하므로써 현위도에서 기대되는 복각값으로부터 더욱 멀어지게 된다 (Table 3). 따라서 화강암인 FGF노두의 경우는 古수평면을 잘못 인식하였을 가능성이 우려되고, 현무암인 EUB와 퇴적암인 CLC 노두의 경우에는 지층의 형성 당시 북향의 완만한 초기경사 (initial dip)가 있었던 것으로 해석된다.

결 론

본 연구를 통하여 시료채취 장소별의 평균 특성잔류자기들 (site-mean ChRMs)을 구하여 본 결과 다음과 같은 결론이 나타났다.

1. 14개소의 연구장소 중 5개소의 특성잔류자기는 편각값이 평균 약 30° 시계방향으로 회전된 것으로 나타났다 (Fig. 7b, Table. 3). 이는 포항분지 이남의 다른 제3기 분지지역에서의 선행 연구결과 (잔류자기의 시계방향 회전)를 재확인하는 것이다. 회전 여부와 회전량의 크기는 지층의 경사보정 여부에 크게 관계되지 않는다. 이는 편향의 원인이 지층의 頃動 (horizontal-axis rotation)에 있지 않고 수평회전 (vertical-axis rotation)에 있음을 의미한다.

2. 연구노두들의 화석연령이나 방사능연령 등의 자료가 없는 관계로 잔류자기의 회전시기를 정확하게 말하기는 어렵다. 그러나 여러 선행 고자기연구 결과나 제3기분지 일대와 연관된 기존의 광역적 지구조운동에 대한 지식에 입각할 때, 이 회전의 시기는 종전의 어일분지 지역 연구 (김인수, 강희철, 1989)에서 제안되었던 16 Ma인 것으로 보인다.

3. 연구장소 중 5개소의 특성잔류자기는 편향없는 남북방향의 편각을 보였다 (Fig. 7a). 이들은 역자화를 포함하고 있으며 역자화 검사 (reversals test)를 통과하는 것으로 보아 지층 생성당시의 일차잔류자기로 판단된다. 따라서 이들의 지층경사 보정후의 평균 ChRM방향 d=28.3°, i=48.9° (α_{95}=7.3°, k=160.5, n=4)는 본 연구지역의 16 Ma이후의 제3기 쌍극자 지구자장방향을 제시하는 것으로 간주된다. 이에 의거한 당시의 고자기학적 자북의 위치는 80.9°N, 273.4°E (dp=6.1°, dm=9.4°)이다.

4. 모든 시료채취장소에 걸쳐서 특성잔류자기의 복각값들은 전반적으로 예상치보다 작게 나타나며 현무암노두의 경우 이 현상이 더욱 현저하다. 이는 지층 생성시의 초기경사 (initial dip)나 또는 강하게 자화된 지형에 의한 지형효과 (magnetic terrain effect: Baag *et al.*, 1995) 때문인 것으로 추정된다.

5. 연구장소 중 2개소에서는 특성잔류자기의 편각값이 시계반대방향으로 약 30°가량 회전되어 나타났다. 이러한 잔류자기의 반시계방향 회전은 다른 제 3기 분지에서도 간혹 관찰되는 것으로써 (김인수, 강희철 (1989)의 포항분지 DAD와 TUD 2개소, 손문 등 (투고초안)의 정자분지 3개소 등) 분지발달과정에 수반된 일반현상일 가능성이 있다. 이러한 반시계방향 잔류자기 회전의 명확한 원인 규명은 장래의 보다 세밀한 연구를 필요로 하나, 시계방향으로 회전되는 지괴편 (block)들 사이에 끼워진 소지괴편들의 반시계방향 회전을 생각해볼 수 있다. 그러나 자기세척으로도 완벽히 제거되지 않은 강력 (hard)한 VRM의 잔류 가능성도 배제해서는 않될 것이다.

6. 대자율 비등방성 (AMS: anisotropy of magnetic susceptibility) 연구결과 지구조적 응력 (tectonic force) 작용에 의한 엽리구조 (tectonic foliation)는 나타나지 않는 것으로 판명되었다. 그러나 두 응회암 노두에서 북동→남서 방향의 흐름을 지시하는 자기적 선구조 (magnetic lineation)가 발견되었으며 하나의 현무암 노두를 제외한 다른 모든 노두들에서는 지층하중에 의한 엽리구조 (load foliation)가 인지되었다. 따라서 장기분지 내부를 채우고 있는 화산암과 퇴적암류들은 외부로부터의 지구조적 응력으로부터 보호된 상태에서 비교적 두텁게 퇴적되었던 것으로 추정된다.

7. 대자율 비등방성 구조의 방향과 잔류자기의 방향 사이에는 연관관계가 없는 것으로 나타난다.

사 사

원고에 대한 토론과 제도를 위하여 노력해준 부산대학

교 대학원 지구조학 (tectonics) 연구그룹의 손문과 이동호에게 필자들은 감사한다.

참고문헌

김광호, 도성재 (1994) 양남분지에 분포하는 제3기 지층의 고지자기 연구. 지구과학 회지, 15권, p. 36-45.

김광호, 도성재, 임동성 (1994) 장기반도에 분포하는 제3기 지층의 고지자기. 지구과학회지, 15권, p. 278-285.

김봉균 (1970) 한국의 신 제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6권, p. 77-96.

김봉균, 정창희, 김수진 (1975) 경북 영일지역에 발달하는 갈탄층의 층서적 연구. 지질학회지, 11권, p. 240-252.

김봉균, 윤선 (1982) 한국의 지질과 광물자원, 제 5장 신생대층. 연세대학교 지질학과 동문회, p. 133-154.

김인수 (1990a) 포항이남 제3기분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장. 광산지질, 23권, p. 59-71.

김인수 (1990b) 고자기학적 자료에 의한 동해의 성인과 양산단층의 운동. 1989년도 전국대학 기초과학연구소 지구과학 (지질)분야 학술심포지움 발표논문집, p. 35-41.

김인수 (1992) 새로운 東海의 成因모델과 양산단층계의 주향이동운동. 지질학회지, 28권, p. 84-109.

김인수, 강희철 (1989) 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.

민경덕, 김원균, 이대하, 이윤수, 김인수, 이영훈 (1994) 포항일원에 분포하는 제3기 암류에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27권, p. 49-63.

윤선 (1988) 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구보고서, 20p.

이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸 (1992) 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구; 화산암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 25권, p. 337-349.

진명식, 김성재, 신성천 (1988) K-Ar 및 횃션트랙법에 의한 포항-감포 일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 연구보고서 KR-87-27 동위원소지질연구, 한국동력자원 연구소, p. 51-88.

Baag, C, Helsley, C.E., Xu, S.-z. and Lienert, B.R. (1995) Deflection of paleomagnetic directions due to magnetization of the underlying terrain. J. Geophy. Res., v. 100, p. 10,013-10,027.

Halls, H.C. (1976) a least-squares method to find a remanence direction from converging remagnetization circles. Geophys. J. R. astr. Soc., v. 45, p. 297-304.

Halls, H.C. (1978) The use of converging remagnetization circles in palaeomagnetism. Phys. Earth Planet. Int., v. 16, p. 1-11.

Han, J. (1989) Miocene paleomagnetic data from southern Korea: Implication on model for opening of the Japan Sea. M. S. thesis, Texas A & M Univ., 132p.

Kikawa, E., McCAbe, R., Han, J., Min, K.D., Lee, D., Han, H. and Hwang, J.H. (1994) Miocene paleomagnetic results from southeastern Korea. Tectonophys., v. 233, p. 115-123.

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. J. Korea Inst. Mining Geol., v. 19, p. 231-239.

Kirschvink, J.L. (1980) The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. Geophys. J. R. astr. Soc., v. 62, p. 699-718.

Quinn, J.M., Coleman, R.J., Peck, M.R. and Lauber, S.E. (1991) The joint US/UK 1990 epoch World Magnetic Model. U.S. Naval Oceanographic Office Technical Report TR 304, Oct. 1991.

Tateiwa, I. (1924) Geological Atlas of Chosen, No. 2, Ennichi, Kyuryuho and Choyo sheets. Geol. Surv. Chosen (in Japanese).

Yoon, S. (1982) Tertiary stratigraphy of the Eoil basin, Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 18, p. 173-180.

Yoon, S. (1992) Paleoenvironmental change of the Tertiary Yangnam and Pohang basins of the southern Korean Peninsula. Mem. Geol. Soc. Japan, v. 37, p. 117-124.

Zijderveld, J.D.A. (1967) AC demagnetization of rocks: Analysis of results. In: Collinson, D. W., Creer, K. M. and Runcorn, S. K. (Eds.), Methods in Palaeomagnetism. Elsevier, p. 254-286.

1996년 3월 27일 원고접수