

양산단층지역에 분포하는 퇴적암 및 화성암류에 대한 고자기 연구*

강희철** · 김인수** · 손 문** · 정현정**

Palaeomagnetic Study of Sedimentary and Igneous Rocks in the Yangsan Strike-slip Fault Area, SE Korea*

Hee-Cheol Kang**, In-Soo Kim**, Moon Son** and Hyun-Jung Jung**

ABSTRACT : It is a well known fact that the remanent magnetization direction of the Tertiary rocks is deflected significantly clockwise (about 50°) in the Tertiary basins of the southeastern part of Korean peninsula. This fact has been interpreted as an evidence of north-south spreading of the East Sea (Sea of Japan) and dextral strike-slip motion of the Yangsan fault. As deflection (rotation) of remanent magnetizations is frequently reported from various regions of the world in the vicinities of strike-slip fault, such phenomena are to be expected in the Yangsan fault region also. It was the purpose of this study to clarify whether such premise is right or not. A total of 445 independently oriented core samples were collected from Cretaceous rocks of various lithology (sedimentary rocks, andesites and I-type granites) in the Yangsan fault area. In spite of through AF and thermal demagnetization experiments, no sign of remanent magnetization deflection was found. Instead, palaeomagnetic poles calculated from formation-mean ChRM directions are very similar to those of contemporary (Barremian, and late Cretaceous-Tertiary) sedimentary and plutonic rocks in the other parts of Kyōngsang basin as well as those of China. Therefore, possibility of tilting of granite plutons and horizontal block rotation of study area is excluded. It is also concluded that the Yangsan fault did not take any significant role in the Cenozoic tectonic evolution of southeast Korea and the East Sea region. The boundary between rotated and unrotated region of remanent magnetization is not the Yangsan fault line, but must lie further east of it.

서 언

그동안 포항이남의 제3기분지 지역에서 수행된 여러 고자기학적 연구결과들에 의하면 (김인수, 강희철, 1989; Han, 1989; 김광호, 도성재, 1994; 민경덕 등, 1994) 이곳 대부분 암석들의 잔류자기가 약 50° 시계방향으로 편향되어 있음이 알려지고 있다. 이러한 잔류자기의 편향현상은 동해의 성인, 그리고 인근의 양산단층이나 울산단층의 운동과 연관을 가지는 것으로 추론된다 (김인수, 1992). 따라서 잔류자기 편향범위의 시간적, 공간적인 파악은 남한

제3기 분지의 성인과 발달의 역사를 규명하는 데에 중요한 자료가 되는 것이며 나아가서는 동아시아대륙 연변지역에서의 신생대 지구조운동의 역사의 일부를 밝힌다는 중요한 의미를 갖는다.

본 연구의 목적은 동해안 제3기분지들에서 발견된 잔류자기의 편향현상이 서편으로 어디까지 계속되는지를 알아내고자 하는 데에 있다. 김인수 (1992)의 가설에 의하면 동해가 확장되는 동안 한반도 동해안에 가해진 응력 (simple shear)은 당시에 이미 존재하던 약대인 양산단층이나 울산단층의 재활성 (reactivation)에 의해서 해소 (release)되었을 가능성이 크다. 따라서 잔류자기 편향현상의 공간적 한계는 울산단층이나 양산단층선이 될 것으로 본다. 본 연구에서는 양산단층 지역의 백악기~제3기 초 암석들에 대하여 잔류자기 연구를 실시하고 잔류자기의 편향여부 및 그 범위를 규명하는 데에 있다.

* 이 논문은 1994년도 부산대학교 기성회 학술연구조성비 지원에 의하여 부산대학교 기초과학연구소에서 연구 수행되었음 (RIBS-PNU-94-501).

** 부산대학교 지질학과 (Department of Geology, Pusan University, Pusan 609-735, Korea)

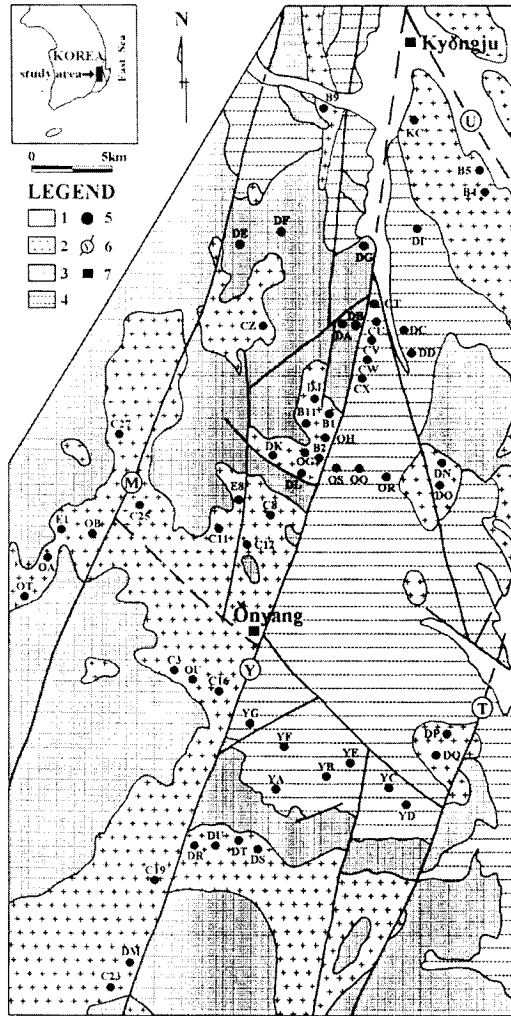


Fig. 1. Geologic and sample site map of the Yangsan fault area (after Lee, Kang, 1964; Kim *et al.*, 1971; Lee, Lee, 1972; Hong, Choi, 1988). 1; Alluvium, 2; Granitic rocks, 3; Andesitic rocks of the Yuch'on Group, 4; Sedimentary rocks of the Hayang Group (so called Taegu Formation), 5; Sample site, 6; Fault, Y; Yangsan fault, M; Moryang fault, T; Tongnae fault, U; Ulsan fault, 7; Town.

지질 개요

연구지역은 경상분지 밀양지괴의 동쪽부분에 해당하며, 양산단층의 중부지역인 양산시와 경주시 사이의 지역이다 (Fig. 1). 본 연구지역은 백악기 중엽에서 시작하여 제 3기초까지 계속되었던 화산 및 심성활동의 지역이다. 초기에는 이 지역에 여러종류의 화산암류가 분출 내지 관입하였으며 뒤를 이어서 불국사화강암류로 알려진 심성암의 관입이 있었다 (민경덕 등, 1982). 이 화강암류를 방사

능연령에 의한 관입시기로 대분하면 크게 115-90 Ma, 90-70 Ma, 68-41 Ma의 3가지 군으로 나뉘어진다고 한다 (이윤중, 1980). 본 연구 시료채취 지역에서의 화강암류의 방사능연령은 (진명식 등, 1991; 민경덕 등, 1982) 대체로 80-50 Ma에 속하고 있다.

단층서편의 대부분지역과 단층동편의 남부지역은 유천층군의 화산암류로, 단층 동편의 북부지역은 육성퇴적층인 하양층군의 대구층으로 구성되어 있어, 양산단층선 동, 서편의 지질구조가 서로 상이하다. 양산단층선 서편의 북부지역, 즉 경주시 서편에 분포하는 퇴적암류는 모량도폭 (김남장 등, 1971)에서 암상에 따라 대구층과 건천리층으로 분류되어 있다. 전자는 경주군 모량리와 화천리 일원에 주로 분포하며 적색세일, 사암, 그리고 흑회색세일로 구성되며 일부는 호온펠스화되어 있다. 후자는 경주군 화곡리와 덕천리 일원에 주로 분포하며 흑회색세일로 구성되며 역시 대부분이 호온펠스화되어 있다. 퇴적암류는 북서 방향의 주향과 남서방향의 경사를 주로 나타내고 있으나 단층 및 화성암류의 관입의 영향으로 곳에 따라서 교란되어 있다.

중부지역의 퇴적암류, 즉 신불산과 양산군 원동면 이천리 일원에 분포한 퇴적암류는 유천층군 화산암류에 포획되어 소암체로 연속성 없이 분리되어 나타나는데 주로 연녹색과 암회색의 세일의 호층으로 구성되어 있으며 호온펠스화되어 있다. 언양도폭 (이윤중, 이인기, 1972)에서는 본암을 대구층보다 상위의 지층으로 기재하고 있다.

양산단층 동측지괴의 퇴적암류는 대개 울산군 삼동면에서 경주군 용산리에 이르기까지 광범위하게 분포하며 구성암석은 주로 적색사암과 세일, 암녹색 또는 암회색의 이암, 세일 그리고 사암이 우세하고 간혹 역질사암을 협재한다. 모량도폭 (김남장 등, 1971)과 언양도폭 (이윤중, 이인기, 1972)에서는 본 암류를 대구층으로 기재하고 있다. 총리면의 자세는 불국사화강암류의 관입 및 단층들에 의하여 교란되어서 일정한 방향성이 없으며 경사각은 10~80° 범위로 다양하다. 특기할 만한 점은 양산단층선 양측지괴 모두에서 단층선으로 접근될 수록 지층의 경사가 고각도로 변화된다는 것이다.

유천층군 화산암류는 본역 전반에 걸쳐 광범위하게 분포하며 주로 안산암 및 안산암질용회암, 유문석영안산암으로 구성된다. 안산암 및 안산암질용회암은 외견상 암질이 다양하며 암청색, 청녹색 및 암회색을 띠며 치밀 견고한 조직을 보여주나 간혹 사장석과 각섬석 반정등이 관찰되고 또한 화산력용회암이 협재된다. 산출양상도 용암류보다도 화산쇄설물이 대부분이다.

연구지역내의 화강암류는 대부분 언양화강암류로 알려

Table 1. Sampled stratigraphic units and lithology for the study in the Yangsan fault area.

Stratigraphic units	Locality names	No. of samples	Lithology	Geographic coord.	
				lon.(°E)	lat.(°N)
Bulguksa Intrusive Group	CZ	8	biotite-hornblende granite	129.156	35.704
	KC	7	biotite granite	129.217	35.803
	DJ	8	xenolith-rich granite	129.172	35.680
	DK	9	granodiorite	129.134	35.648
	DL	6	quartz monzodiorite	129.148	35.643
	DM	9	porphyritic biotite granite	129.053	35.411
	DN	12	granodiorite	129.232	35.652
	DO	8	granodiorite	129.231	35.651
	DP	8	granodiorite	129.226	35.518
	DQ	7	granodiorite	129.228	35.519
	DR	8	hornblende-biotite granite	129.092	35.474
	DS	7	hornblende-biotite granite	129.107	35.472
	DT	7	hornblende-biotite granite	129.102	35.474
	DU	6	hornblende-biotite granite	129.097	35.471
	OA	6	porphyritic biotite granite	129.021	35.607
	OB	7	biotite granite	129.039	35.617
	OG	10	quartz monzodiorite	129.162	35.657
	OH	6	biotite granite	129.163	35.658
	OT	7	porphyritic biotite granite	128.983	35.582
	OU	9	biotite granite	129.098	35.550
	B1	2	biotite granite	129.168	35.662
	B2	2	biotite granite	129.163	35.657
	B4	3	biotite granite	129.257	35.752
	B5	4	biotite granite	129.257	35.753
	B9	2	biotite granite	129.162	35.813
	B11	3	biotite granite	129.160	35.660
	C3	2	porphyritic biotite granite	129.094	35.550
	C8	3	xenolith-rich granite	129.131	35.601
	C11	2	biotite granite	129.102	35.587
	C12	1	xenolith-rich granite	129.118	35.582
	C16	2	biotite granite	129.100	35.548
	C19	2	porphyritic biotite granite	129.068	35.451
	C23	2	porphyritic biotite granite	129.054	35.399
C25	3	biotite granite	129.068	35.606	
C27	4	xenolith-rich granite	129.059	35.753	
E1	3	porphyritic biotite granite	129.030	35.617	
E8	3	xenolith-rich granite	129.114	35.611	
Yuch'o'n Group	DA	7	andesite	129.173	35.702
	DB	7	andesite	129.175	35.701
	DE	8	andesite	129.122	35.738
	DF	8	andesite	129.151	35.747
	DG	6	andesite	129.135	35.742
	DI	4	andesite	129.212	35.743
Hayang Group (Taegu Fm.)	CT	9	red sandstone	129.199	35.711
	CU	15	red shale	129.198	35.706
	CV	15	red sandstone	129.197	35.699
	CW	12	red ssndstone	129.198	35.125
	CX	7	red shale	129.194	35.699
	DC	12	red sandstone	129.213	35.125
	DD	11	red sandstone	129.180	35.701
	OS	14	red/green shale	129.220	35.690
	OQ	10	red/green shale	129.180	35.650
	OR	9	red/green shale	129.209	35.649

Table 1. Continued.

Stratigraphic units	Locality names	No. of samples	Lithology	Geographic coord. lon.(°E) lat.(°N)	
Hayang Group (Taegu Fm.)	YA	10	green/red sandston	129.142	35.512
	YB	10	green/gray sandstone	129.176	35.518
	YC	12	green/red sandstone	129.196	35.515
	YD	15	green sandstone/red shale	129.204	35.512
	YE	16	green sandstone/red shale	129.175	35.520
	YF	10	green/gray sandstone	129.141	35.530
	YG	21	green/gray sandstone	129.126	35.535
Total	60 sites	445 samples			

진 암체이며 연구지역 동측에는 암주상의 다른 소암체가 나타난다. 연양화강암류는 대부분 흑운모화강암이지만, 국부적으로는 다양한 암상을 보이는데 가장 염기성인 것은 인보리부근과 궁근정리일대의 석영문조섬록암 내지 화강섬록암이다. 화산암류와의 접촉부에 가까워질 수록 포획암을 함유하는 세립질화강암상을 보인다. 단층선 동측의 암주상 암체들은 퇴적암류를 관입하여 주변부에 호 온펠스를 형성시켰으며 암체의 연변상은 주로 반상석리를 보이고 때로는 문상석리가 나타나기도 한다.

연구방법

시료채취

시료채취는 언양을 중심으로한 국도 및 지방도로에서 실시되었는데, 화강암질암 노두 37개소, 안산암질암 노두 6개소, 퇴적암노두 17개소 등 모두 60개소 (Table 1, Fig. 1)로부터 모두 445개의 정향시료가 채취되었다. 단층으로부터의 거리에 따른 잔류자기 편향각의 체계적인 변화 여부를 검토하고자 일부시료들은 양산단층선에 직각인 방향으로 채취되었다. 시료채취시 퇴적암 노두에서는 지층면 식별에 문제가 없었으나 화산암과 화강암류의 경우에는 암석 정치당시의 수평면의 인지가 곤란하여 이들의 고 자기학적 자료들은 모두 현장 노두상태 (in-situ)로 나타낼 수밖에 없었다.

모든 시료들은 다이아몬드 비트를 장착한 가솔린 연료의 휴대용 착암기를 사용하여 직경 1인치의 코어시료로 노두 현장에서 채공되었다. 각 코어시료들은 노두현장에서 정향 (orientation)되었으며, 정향작업과 지층의 주향경사 측정 작업 모두에서는 지질조사용 주향경사계 (clinocompass)가 이용되었다. 시료채취시, 자기층서학적 고찰에 필요한 자화극성 정보를 최대한 확보하기 위하여 각 시료채취 장소별로 가능한 넓은 수직 층위범위를 망라하도록 하였다.

각 착공간의 수직적 층위간격은 최소 1 m이었는데 통상 2~3 m에 달하였다.

자기세척실험

자기세척실험을 위해서는 Molspin AC demagnetiser와 Schonstedt TSD-1 thermal demagnetizer가 이용되었다. 잔류자기의 크기와 방향은 Molspin rock magnetometer를 이용하여 측정하였다. 모든 자기세척실험과 잔류자기측정은 철근건물로부터 15 m 이상 떨어진 단독 목조건물내에서 실시하였다.

우선 각 노두별로 2~3개의 시편 (모두 직경 2.54 cm 높이 2.3~2.4 cm의 원주형)을 골라 단계적인 교류 자기 세척실험을 실시하였다. 세척단계는 자연잔류자기 (NRM)의 재측정으로부터 시작하여 최고 (peak) 교류자장을 5~10 mT씩 증가시켜가며 최고 100 mT에 이르도록 하였다. 각 시료마다의 총 교류 세척단계는 10~20 단계에 이르렀다. 이러한 세척에도 불구하고 단일자화성분이 분리되지 않거나 잔류자기의 현저한 감소를 나타내지 않는 시료들에 대해서는 단계적 열자기세척실험을 적용하였다. 세척온도가 500°C에 이르기까지는 100°C간격으로 단계별의 가열온도를 높여 갔으며, 그 이상의 온도에서는 50°C, 혹은 경우에 따라서 20°C간격으로 온도차를 줄였고 600°C이상의 고온구간에서는 10°C 이내 내지 2~3°C 간격으로 단계별 세척온도차를 더욱 줄였다. 이렇게 함으로써 최고 가열온도인 690°C까지에 이르는 동안 시료별로 14~20 단계까지의 세척실험이 실시되었다. 열세척실험의 각 단계에서는 정해진 최고온도에 도달한 후 30~40분간 그 온도를 유지시켜 시료중심내부까지 온도의 평형이 이루어지도록 했으며, 냉각시에는 40~50분 이상 충분히 환풍시킴으로써 시료의 중심이 상온까지 냉각되도록 하였다. 한편, 가열에 의한 자성광물의 광물학적 변화를 감지하기 위하여 매 세척단계마다 대자를 측정기

(Molspin Minisep)를 이용하여 상온에서의 총대자율 (bulk magnetic susceptibility)을 측정하였다.

세척에 따른 잔류자기의 방향과 크기의 변화양상은 vector diagram (Zijderveld diagram: Zijderveld, 1967)과 등적 입체투영도 (equal-area net, Schmidt net)를 이용하여 고찰하였다. 이렇게 각 노두별 3개 이상씩의 시료들에 대하여 교류자기세척과 열자기세척실험을 수행하고 공통이 되는 최적의 세척방법과 강도를 결정하였다. 나머지 시료들은 이 최적 세척강도 전후 5~6단계에 걸치며 일괄 세척처리하였다. 그 결과가 vector diagram에서 원점을 향하여 직선으로 나타나는 시료들만을 선별하여 구면통계처리 (Fisher, 1953)에 회부함으로써 각 노두별의 평균 특성잔류자기 (ChRM: characteristic remanent magnetization) 방향을 계산하였다. 한편, 동일노두에서 시료 개개의 자기세척습성이 다른 경우에는 전 시료에 대하여 교류 및 열자기세척실험을 실시하여 ChRM을 구하였다. 이상의 과정에서 총대자율이 초기값(NRM 상태)의 두배이상으로 증가된 열세척단계의 결과들은 더 이상의 고찰에서 제외하였다. 또한 대자율값이 앞 단계에 비하여 2배 이상 급격히 증가하는 시료들도 결과 취합에서 제외시켰다.

한편 벡터다이아그램에서 최소한 세점이상이 직선을 이루는 부분이 나타나는 경우에 대해서는 Kirschvink(1980)의 주성분 분석법 (PCA, principal component analysis)을 적용시켜서 세척시 소거된 잔류자기의 방향을 산출해내었다. 또한 입체투영도에서 대원 (great circle, remagnetization circle)을 이루는 부분에 대해서는 시료별로 이에 가장 잘 일치하는 (best fitting) 대원 (great circle)을 설정하고 여러시료 대원들의 교점을 이용하여 (Halls, 1976) 그 노두의 평균 잔류자기방향을 도출해 내었다.

자기세척실험 및 결과

연구지역의 시료들은 앞서에서 말한 바와 같이 퇴적암, 안산암, 화강암인 바, 자연잔류자기 (NRM)의 세기는 각각 1~65 mAm⁻¹, 12~1650 mAm⁻¹, 7~550 mAm⁻¹의 범위인 것으로 나타났다. 이들 시료들에 대해서 교류 및 열자기세척실험을 실시한 결과는 다음과 같다.

퇴적암류

퇴적암(하양층군 대구층) 시료들은 대부분 적색 또는 녹색색 사암과 셰일로서, 교류자기장으로는 효과적인 세척이 이루어지지 않으며 (Fig. 2A) 오로지 580~내지 600°C 이상의 고온가열에서만 급격한 잔류자기의 감소와

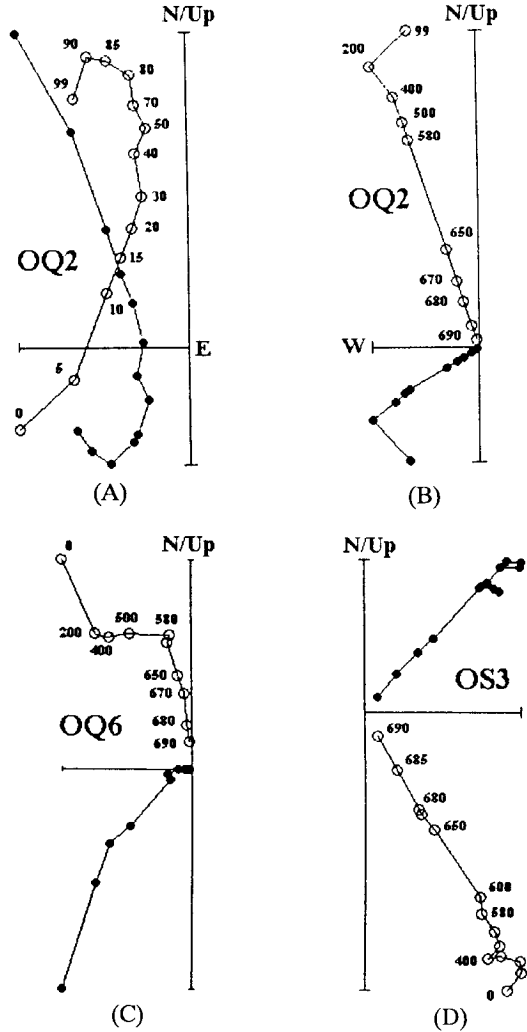


Fig. 2. Examples of AF and thermal demagnetization of red shale samples from the Taegu Formation. All the vector (Zijderveld) diagrams in this paper are depicted in in-situ coordinates with the solid (open) symbols projected onto the horizontal (vertical) plane.

단일성분 (ChRM)의 유리가 이루어졌다 (Fig. 2B, C, D). 이들 퇴적암의 잔류자기 강도는 650~690°C의 구간에서 급격한 감소를 보여 (Fig. 3A) 구성 자성광물이 주로 적철석임을 알 수 있다. 한편, 세척온도에 따른 대자율의 변화는 680~690°C에서 다소 증가되는 것으로 나타났다 (Fig. 3B). 그러나 대자율의 증가와 잔류자기방향의 변화가 나타나는 온도는 상호연관되지 않았다.

여기서 특기할 것은 퇴적암 시료 중 OQ site의 2번과 6번 두 시료가 역자화된 것이라는 사실이다. 전자의 경우는 교류자기세척과정에서 역자화가 드러났으며 후자의

경우는 자연잔류자기 상태에서부터 역자화를 보이고 있었다. 열자기세척을 통하여 두 시료 모두로부터 단일 ChRM 성분은 추출할 수 있었는데 (Fig. 2B, C) 대자율은

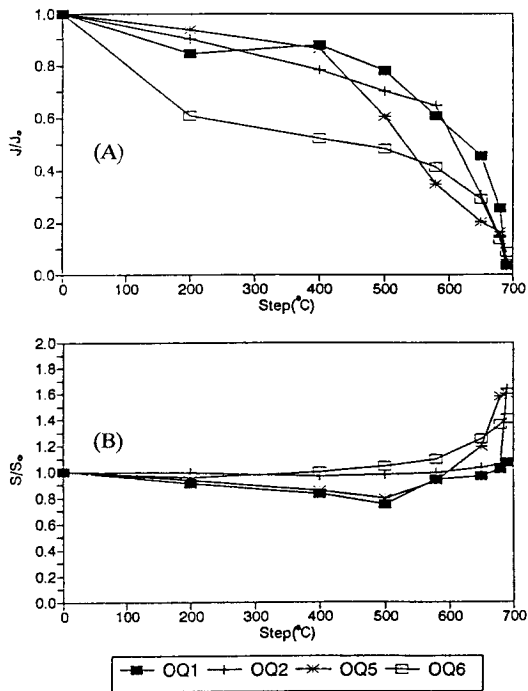


Fig. 3. Variation of remanent magnetization intensity (A) and magnetic susceptibility (B) against heating temperature (in °C) of red shale samples from the Taegu Formation.

NRM에서 부터 690°C까지 별다른 변화가 없었다 (Fig. 3B). OQ site 8개 시료들의 ChRM들은 역전검사 (reversals test)를 통과하였다 (2, 6번 역자화 시료: 나머지 6개의 정자화 시료).

한편 본 연구지역 17개소에서 채취된 퇴적암류들 중 6개소의 시료들은 Fig. 4에 도시된 바와 같이 단일 ChRM이 분리되지 않은 것들로서, 자기세척 마지막 무렵에서 다른 성분의 징후가 나타나기도 하지만 완전한 성분 분리가 이루어지지 않는다. 특히 OR, DC, CU, YG 노두에서는 소규모 단층대를 따라 관입된 dyke들이 관찰되는데, 이 노두들의 경우에는 dyke관입시의 열수용액이나 단층과쇄대를 따르는 지하수의 영향으로 이차적 열점성잔류자기 (TVRM)나 화학잔류자기 (CRM)가 중첩되었을 것이 의심된다.

이상 하양층군 대구층의 퇴적암 11개소에서 구한 특성 잔류자기 (ChRM)를 보면 (Table 2, Fig. 5) 지층경사보정후 평균자화방향 및 고자기극의 위치는 $d=22.73^\circ$, $i=54.7^\circ$, $\alpha_{95}=2.8^\circ$, $k=236.3$, $n=11$ 및 $213.8^\circ E$, $71.6^\circ N$ ($dp=2.7^\circ$, $dm=3.9^\circ$)으로써 지층경사보정후 k 값이 6.6배 증가되어 99%의 신뢰도를 가지며 습곡검사 (McElhinny, 1964)를 통과한다.

안산암류

본 연구지역의 북쪽에서 채취된 유천층군 안산암류들의 시료들은 모두 자기적으로 불안정한 세척습성을 보여 ChRM추출에 실패하였다. 이 안산암 노두들에서도 역시

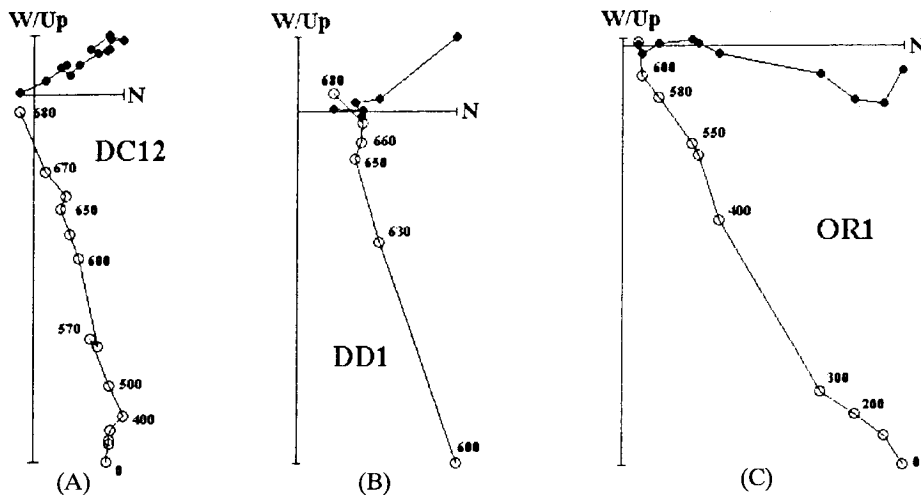


Fig. 4. Examples of thermal demagnetization of the greenish sandstone from the Taegu Formation. Remanent magnetization of OR site is overwhelmed by the recent field remanance, while that of DC and DD sites do not collapse exactly toward the origin of the vector diagram and preserve some of the original reverse magnetization. Coordinates and symbol conventions are same as those in Fig. 2.

Table 2. Site-mean ChRM directions of Sedimentary rocks in the Yangsan fault area.

Formation	Site	Treat. level	n	Before bedding correction			After bedding correction			Palaeomagnetic north pole			Palaeo-lat(° N)	Polarity			
				d(°)	i(°)	α_{95} (°)	k	d(°)	I(°)	α_{95} (°)	k	lat(° N)			lon(° E)	dp(°)	dm(°)
Hayang Group. Taegu Fm.	YA	550-580°C	5	30.5	51.8	5.2	144.6	13.4	59.8	5.2	144.7	78.2	188.9	5.9	7.9	40.7	N
	YB	550-580	7	23.7	45.2	7.3	52.7	15.7	55.3	7.3	53.2	77.3	213.0	7.4	10.3	35.9	N
	YC	550	7	32.8	50.0	4.6	130.1	20.1	55.5	4.6	130.3	73.7	211.3	4.7	6.6	35.9	N
	YD	550-580	7	39.4	43.9	3.2	282.9	29.4	51.3	3.3	276.4	65.3	219.0	3.0	4.5	31.9	N
	YE	550-570	7	30.8	51.7	4.4	147.2	19.3	60.1	4.4	145.6	73.9	193.2	5.0	6.6	41.1	N
	YF	580-600	5	36.0	37.9	5.4	135.4	14.1	50.9	5.8	151.6	77.6	233.7	4.9	7.3	31.6	N
	OS	650	7	58.9	54.8	8.0	57.3	28.8	51.5	6.7	81.4	65.9	219.3	6.2	9.1	32.1	N
	CW	680	7	58.9	51.3	8.9	47.0	25.0	49.1	4.6	176.9	68.3	227.3	4.0	6.0	30.0	N
	CX	680	7	76.0	66.6	8.3	54.0	25.8	57.2	6.7	80.9	69.1	204.2	7.2	9.8	37.8	N
	CV	680	10	71.5	50.1	6.3	59.1	33.4	55.4	6.3	59.9	63.0	208.7	6.4	9.0	36.0	N
	OQ	670	8	56.6	64.7	6.9	66.0	53.4	53.4	7.1	62.2	71.7	218.1	6.8	9.8	33.9	N+R
mean	11 sites			44.8	52.8	7.1	35.8	22.7	54.7	2.8	236.31	71.6	213.8	2.7	3.9	35.2	

앞서 설명한 퇴적암 노두들 (OR, DC, CU sites)에서와 마찬가지로 단층작용에 따른 파쇄대 또는 소단층을 따라

관입한 소규모 암맥들이 관찰되는 것으로 보아 이차차화의 영향이 컸던 것으로 판단된다.

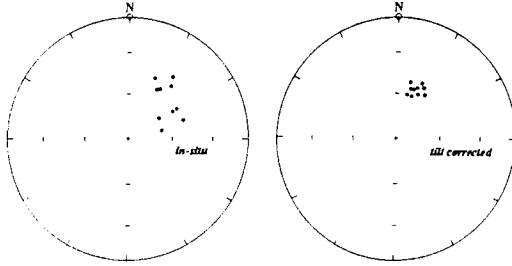


Fig. 5. Site-mean characteristic remanent magnetizations (ChRMs) obtained from 11 sites of the Taegu Formation. All the pair of equal-area stereogram (Schmidt net) in this paper is so arranged that the left (right) one is drawn in in-situ (bedding) coordinates with the solid (open) symbols representing downward (upward) inclination.

화강암류

37개소로부터 197개의 정향 코어시료가 채취되었던 화강암류의 경우 또한, 교류자기세척보다 열자기세척이 단일성분의 추출에 효율적인 것으로 나타났다. 교류자기세척의 예 (Fig. 6A, B)를 보면 잔류자기들이 벡터다이아그램의 원점을 벗어나며 소멸되거나 (Fig. 6A), 30 mT전후의 세척에서 자기적으로 불안정해지는 것 (Fig. 6B)으로 드러났다. 그러나 열자기세척의 경우, 400~550° 내지 550~580°C 에서 단일 ChRM성분이 추출되고 그 이후 온도까지 잔류자기 방향이 안정하게 유지되며 (Fig. 6C, D) 온도증가에 따른 대자율의 변화도 없음을 알 수 있다

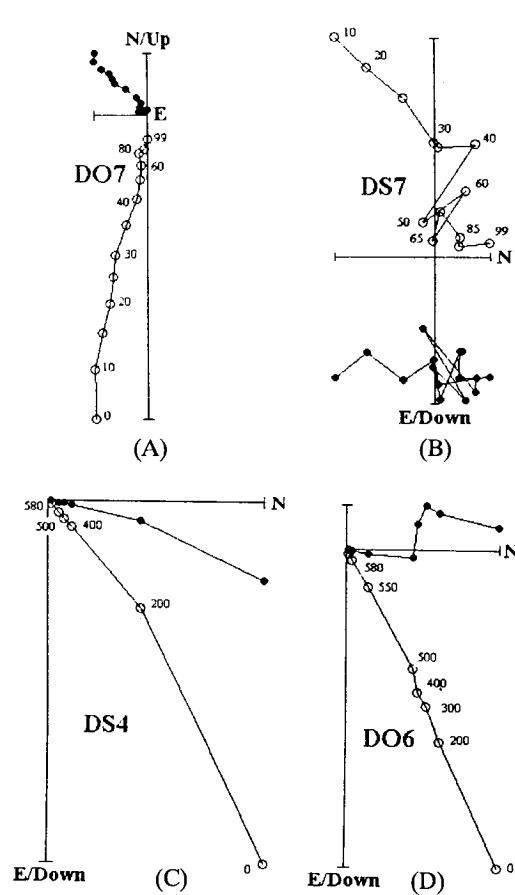


Fig. 6. Examples of AF and thermal demagnetization of granitic rocks in the yangsan fault area. AF demagnetization was not effective. Coordinates and symbol conventions are same as those in Fig. 2.

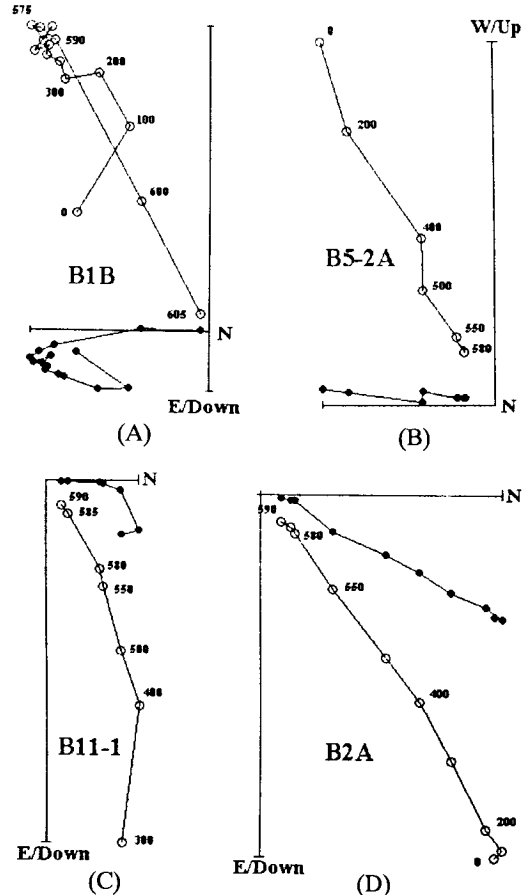


Fig. 7. Further examples of thermal demagnetization of granitic rocks. Coordinates and symbol conventions are same as those in Fig. 2. Note the reversed ChRM direction of some samples.

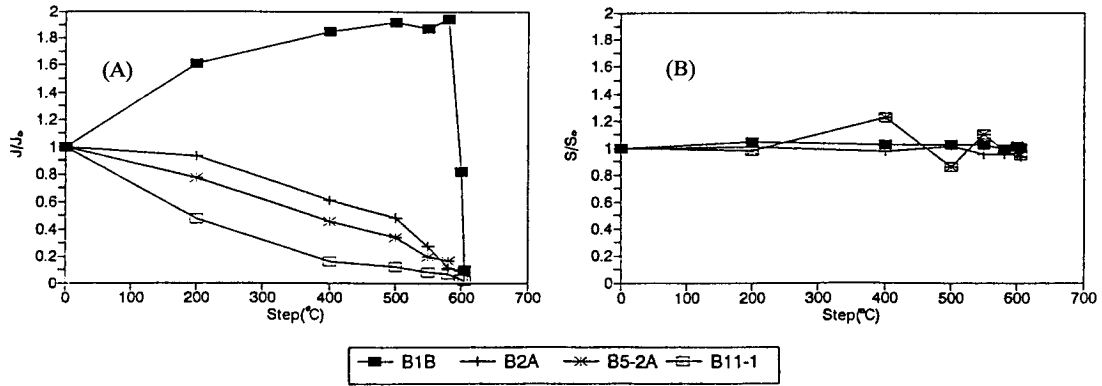


Fig. 8. Variation of remanent magnetization intensity (A) and magnetic susceptibility (B) against heating temperature (in °C) of granitic rock samples.

Table 3. Site-mean ChRM directions of granitic rocks in the Yangsan fault area.

Formation	Site	Treat. level	n	Before bedding correction			Palaeomagnetic north pole				Palaeolat(° N)	Polarity
				d(°)	i(°)	α_{95} (°)	lat(° N)	lon(° E)	dp(°)	dm(°)		
Bulguksa Intrusive Group	KC	550°C	3	16.3	59.8	15.6	76.3	193.3	17.7	23.5	40.7	N
	DJ	580	4	192.2	-51.5	8.5	79.3	235.1	7.9	11.6	32.1	R
	DK	853	3	8.3	53.7	2.7	83.0	228.6	2.6	3.7	34.2	N
	DL	583	3	352.9	48.6	7.3	81.5	355.9	6.3	9.6	29.6	N
	DN	580	4	18.5	59.2	8.8	74.8	197.3	9.9	13.2	40.0	N
	DO	585	3	4.6	57.9	10.6	85.3	179.7	11.4	15.5	38.5	N
	DP	550	4	5.6	46.4	11.7	80.8	276.5	9.7	15.1	27.7	N
	DQ	550	4	31.9	52.5	14.1	63.7	215.2	13.4	19.5	33.1	N
	DR	550	4	36.5	52.3	14.3	59.9	213.2	13.5	19.6	32.9	N
	DS	550	3	9.3	56.3	17.7	82.4	206.2	18.4	25.5	36.8	N
	DT	550	4	9.3	53.1	13.0	82.1	229.4	12.5	18.0	33.7	N
	DU	580	3	5.9	51.9	23.9	84.3	248.3	22.3	32.6	32.5	N
	OA	583	5	357.8	52.7	2.7	87.0	347.7	2.5	3.7	33.3	N
	OB	580	6	18.3	62.1	8.3	73.9	184.5	10.1	13.0	43.4	N
	OG	583	2	193.1	-45.3	4.7	74.7	254.0	3.8	5.9	26.8	R
	OH	585	2	196.2	-52.5	6.2	76.4	225.4	5.9	8.5	33.1	R
	OT	580	6	3.0	50.4	5.1	84.9	278.9	4.6	6.8	31.1	N
	OU	580	4	16.6	50.4	4.8	75.4	231.9	4.4	6.5	31.2	N
	B1	600.70 mT	2	189.8	-66.2	24.3	75.2	335.3	32.6	39.7	48.6	R
	B2	585	2	13.7	48.7	8.7	77.0	243.0	7.5	11.4	29.6	N
B4	550	2	9.1	52.4	5.0	82.0	237.1	4.8	6.9	32.9	N	
B5	580	4	191.4	-55.8	4.3	80.8	212.1	4.4	6.1	36.4	R	
B9	590.40 mT	2	348.8	45.7	23.1	77.1	359.7	18.8	29.6	27.1	N	
B11	580	3	3.9	59.5	2.6	84.4	161.2	3.0	4.0	40.3	N	
C3	580	1	15.5	55.6	-	77.4	211.9	-	-	36.1	N	
C8	550	3	18.2	61.3	7.4	74.3	187.9	8.7	11.3	42.1	N	
C16	580	1	193.5	-51.8	-	78.4	230.8	-	-	32.4	R	
C23	550	2	357.7	54.4	7.1	88.0	25.9	7.1	10.1	34.9	N	
C25	590	3	4.3	56.7	5.7	86.2	192.5	6.0	8.2	37.2	N	
C27	585	4	3.6	54.6	8.7	87.0	229.8	8.7	12.3	35.1	N	
E1	580	2	356.8	46.9	16.1	82.0	329.7	13.4	20.8	28.1	N	
E8	580	3	12.1	50.8	7.0	79.1	237.8	6.4	9.4	31.5	N	
mean	32 sites			9.4	54.2	2.4	82.2	223.4	2.3	3.3	34.7	

(Fig. 8B). 이러한 실험결과는 특성잔류자기 (ChRM)를 지배하는 자성광물이 티탄자철석계열임을 지시한다. 자기 세척실험을 통하여 자기적으로 불안정하거나 잔류자기가 원점으로 소멸되지 못하는 것으로 판명된 시료들을 제외한 후, 화강암류의 각 노두별 평균ChRM 방향들을 종합하면 Table 3과 Fig. 9와 같다. 이들 중 6개소에서는 역자화가, 26개소에서는 정자화의 극성이 나타났으며, 이들 방향들은 역전검사 (reversals test)를 통과하고 있다. 화강암류 32개소에서 구한 ChRM의 평균방향과 고자기 극의 위치는 $d=9.4^\circ$, $i=54.2^\circ$, $\alpha_{95}=2.4^\circ$, $n=32$ 와 $233.4^\circ E$, $82.2^\circ N$ ($dp=2.3^\circ$, $dm=3.3^\circ$)이다.

결과 및 토의

본 고자기 연구를 위해서 시료가 채취된 곳은 양산단층 일원 총 60개소로써 백악기 하양층군의 퇴적암 17개소, 유천층군 안산암류 6개소, 그리고 화강암류 37개소이다. 이들중 앞장에서 밝힌 바와 같이 퇴적암 6개소, 안산암류 6개소, 그리고 화강암류 5개소에서는 특성잔류자기 (ChRM)가 추출되지 않았다. 이들을 제외한 특성잔류자기가 추출된 노두들에 대한 결과는 Table 2, 3 및 Fig. 5, 9, 10에 도시되어 있다.

자기층서학적 고찰

화석 및 방사능연령 측정연구 결과에 의한 양산단층일원을 포함한 경상분지 지층들의 지질연대는 상당히 넓은 시간대역을 보이고 있다. 특히 본 연구지역 퇴적암이 속속된 경상누층군 하양층군의 시대는 전기 백악기로부터

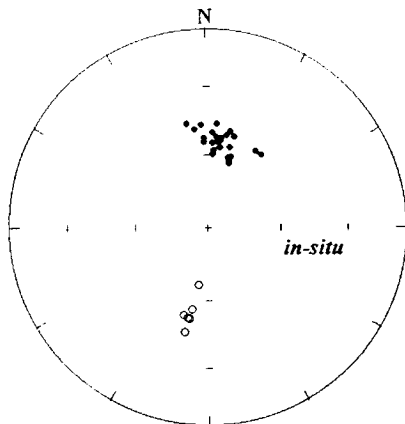


Fig. 9. Site-mean characteristic remanent magnetizations (ChRMs) of granitic rocks.

후기 백악기 Cenomanian에 이르는 것으로 알려지고 있다 (Yang, 1978; Choi, 1985; Choi, Park, 1987; 서승조, 1985; 전희영 등, 1990). 이와 같이 넓은 연령의 폭은 본 연구의 결과를 이용하여서 좁힐 수가 있다. 즉, 잔류자기의 극성비교와 자극의 위치비교를 지층의 대비와 연령결정의 수단으로 삼을 수 있는 것이다. 범세계적 자기층서학적 연구로부터 잘 알려져 있는 바에 의하면 (Harland *et al.*, 1990; 등) 백악기의 124~83 Ma 동안에는 지구 자기장이 오랜동안 정자극의 상태 (Cretaceous Normal Polarity Superchron)에 있었는데 그 전후는 지구 자기장이 빈번히 역전되던 기간이었다. 앞서에서 본 바와 같이 본 연구지역의 대구층 (하양층군) 1개소 (OQ site)와 화

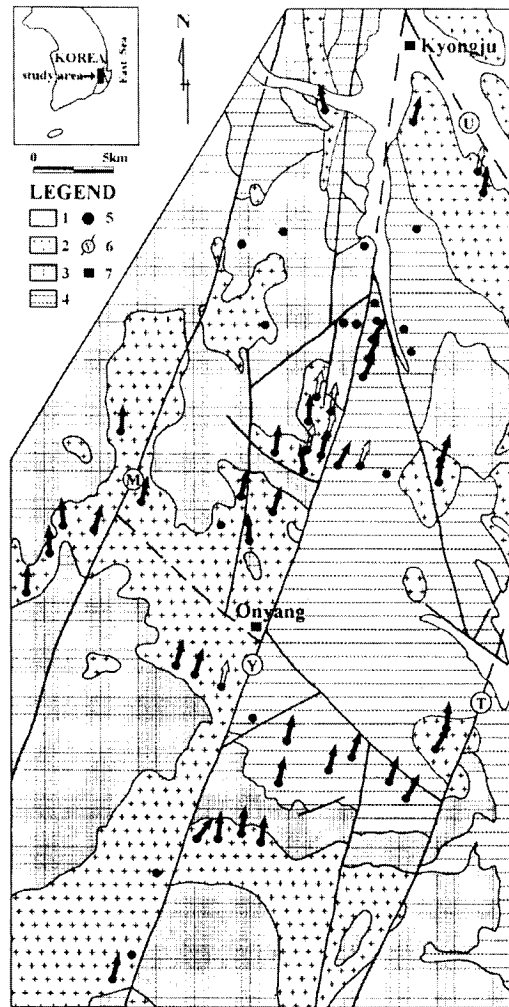


Fig. 10. Map showing the results of the study. Arrows represent palaeomagnetic site-mean ChRM directions. Sites with no arrow revealed no stable ChRM direction. Black (white) thick arrows indicate normal (reversed) polarity.

강암류 6개소 (DJ, OG, OH, B1, B5, C16 sites)에서 역자화가 나타나고 있다. 이밖에 본 연구지역이외의 다른 경상분지 지역에서도 역자화 지층들이 발견된 바 있는데 (강희철, 1995) 이들의 예로써는 진주지역의 낙동층, 하산동층, 진주층, 칠곡층, 함안층 (본 연구지역의 대구층에 대비), 영양지역의 동화지층, 가송동층, 도계동층, 그리고 의성지역의 진주층, 점곡층과 건천리지역의 주사산층 등의 다수가 있다. 또한 Lee *et al.* (1987)과 이기동 (1990) 역시 대구지역의 칠곡층, 함안층, 의성지역의 일직층, 구계동층원, 영양지역의 도계동층에서 역자화를 보고한 바 있다. 따라서 본 연구 및 상기한 기존 고자기학적 연구 결과들 그리고 화석연구 결과들을 종합하여 볼 때, 경상분지 밀양지괴의 하부 함안층 (본 연구지역의 대구층과 대비), 영양지괴의 중부 가송동층, 의성지괴의 하부 점곡층 그리고 이들 하부의 경상누층군 퇴적암들은 124 Ma 이전의 정자극과 역자극이 빈번히 교호되던 시기에 퇴적된 것임을 추정할 수 있다.

한편, 본 연구지역 화강암류의 지질연대는 자기극성 및 절대연령 측정결과를 토대로 할 때, 83 Ma보다 젊은 것으로 판단된다.

지구조운동에 관한 고찰

세계 여러 주향이동 단층지역에서의 고자기학적 연구 결과에 의하면 단층작용에 수반되어서 연결지괴의 수평회전운동이 흔하게 일어난다고 한다 (Kissel, Laj, 1989). 이러한 견지에서 볼 때, 수조의 주향이동단층이 달리는 경상분지의 밀양 및 의성 소분지에서의 지괴의 수평회전운동 여부는 많은 관심의 대상이다. 특히 양산단층은 서론에서 언급한 바와같이 제3기분지의 형성 및 발달 그리고 동해지역에서의 지구조운동의 역사와 깊게 관련되었을 것으로 추정되므로 그 연결지괴에서의 잔류자기 수평회전운동여부는 당연한 관심의 대상이 되겠다. 결론부터 말하자면 본 연구로부터 밝혀진 이에 대한 대답은 기대되었던 수평회전운동이 없었다는 것이다. 이는 양산단층 일원의 지역이 제3기동안 동해안을 따라 일어난 지구조운동의 영향을 받지 않았음을 의미하는 것이다. 따라서 동해안의 제3기분지 지역에서 발견된 바 있는 잔류자기 편향현상의 서편 한계는 양산단층이 아니고 울산단층이거나 또는 보다 동쪽에 있을 것이다.

Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구지역 하양층군 대구층의 평균 자화방향 및 자북의 위치는 경상분지 다른 지역의 신평-하양층군으로부터의 것들과 (강희철, 1995) 오차의 한계내에서 모두 잘 일치하고 있다. 또한

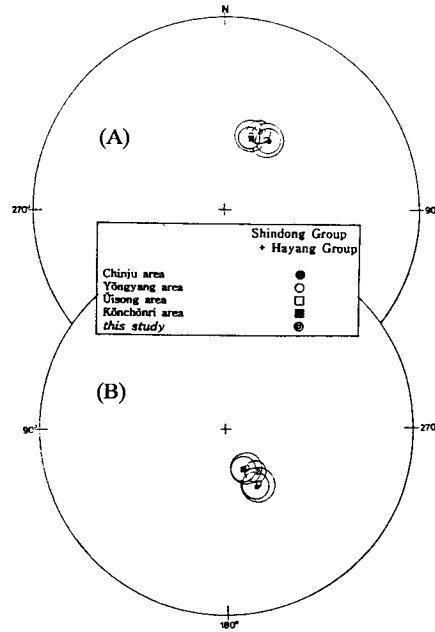


Fig. 11. ChRM directions (A) and palaeomagnetic pole positions (B) calculated from Group-means of the Shindong and Hayang Groups in the Chinju, Yongyang, Uisong, Kŏnchŏnri areas (Kang, 1995), and this study.

본 연구지역의 하양층군 평균자북위치는 Kim, Jeong (1986), Otofujii *et al.* (1986)의 대구지역 하양층군으로부터의 자북위치인 67°N 202°E, Lee *et al.* (1987)의 대구-안동지역 하양층군으로부터의 자북위치인 67.6°N 205.1°E, 도성재, 김광호 (1994)와 도성재 등 (1994)의 대구지역 밀양지괴와 의성지괴에서 구한 전기백악기 지층으로부터의 평균 자북위치인 66.1°N, 202.5°E 모두들과 오차의 한계내에서 역시 잘 일치하고 있다. 따라서 경상분지내 각 지괴간의 회전운동은 전혀 없었으며 만약 있었다고 하더라도 무시될 정도로 불과하였다고 말할 수 있겠다. 아울러 노두현장 (in-situ) 상태에서 계산된 본 연구지역의 화강암류와 의성지역 불국사관입암군의 자북위치 모두가 한반도나 중국에서 일반적으로 알려진 백악기말 내지 고제3기의 자북위치와 같다는 사실은 이 모든 화성암노두들이 정치이후에 경동 (tilting)되지 않았음을 의미하고 있다.

한편, 양산단층선에 직각으로 배열된 퇴적암 및 화강암 노두들 (Fig. 1, 언양동남부)의 특성잔류자기방향들을 보면 단층선으로부터의 거리에 따른 자화방향 (편각)의 체계적인 변화가 나타나지 않는다 (Fig. 10). 따라서 단층작용에 수반된 주변지괴에서의 국지적 잔류자기 편향작용도 일어나지 않았음을 알 수 있다. 부연으로 의성소분지에서도 단

층작용에 관련된 주변지괴에서의 잔류자기 편향현상이 관찰되지 않는 것으로 보고된 바 있다 (김인수 등, 1993).

결 론

본 연구에서는 양산단층 주변에 분포된 퇴적암, 안산암, 화강암류를 대상으로하여 주로 잔류자기의 편향현상 여부의 규명을 중심으로하는 고자기학적 연구를 실시하였다. 이로부터 얻어진 결론들은 다음과같이 요약된다.

1. 퇴적암류의 특성잔류자기를 지배하는 주 자성광물은 자철석과 적철석이며, 화강암류의 경우는 티탄함량이 보다 적은 티탄자철석계열의 광물이 대부분인 것으로 판단된다. 따라서 연구지역 화강암들은 모두 자철석 계열 (혹은 I-형) 화강암으로 분류된다.
2. 퇴적암 노두의 경우 통계학적 신뢰도 99%로 습곡검사 (fold test)를, 화강암 노두의 경우 95%의 신뢰도로 역전검사 (reversals test)를 통과한다. 이는 본 연구를 통하여 구해진 특성잔류자기가 암석생성 당시에 형성된 일차 잔류자기임을 지시한다.
3. 연구대상 화강암류들의 특성잔류자기 (ChRM) 방향이 거의 남북방향임을 고려할 때 이 화강암들은 모두 백악기말-제3기초에 정치된 것으로 판단된다. 이러한 추정 은 방사능연령 측정결과들과 (46~84 Ma: 이윤중, 植田良夫, 1976; 이윤중, 1980; 민경덕 등, 1982; 진명식 등, 1991; 이미정 등, 1995)에 의해서도 지지된다.
4. 자기층서학적 견지에서 고찰할 때 (Harland *et al.*, 1990), 역자화를 포함하는 하부 대구층 이하의 지층들은 Barremian 즉 124 Ma보다 오래된 지층이며, 화강암류들은 83 Ma보다 젊은 연령의 것이다.
5. 양산단층지역 하양층군의 평균 자북위치와 경상분지내 다른 지역 동시기 지층들의 자북위치들은 서로 잘 일치하고 있다. 이는 이들 지층이 퇴적된 이후에 경상분지내 각 지역 (지괴, 소분지)에서 상대적인 지괴회전운동 (vertical-axis rotation)이나 변위 (displacement)가 일어나지 않았음을 지시한다.
6. 또한 연구지역 화강암류들의 자북위치는 현장상태 (in-situ)에서 경상분지 타지역 화강암류의 자북위치나 중국 동시대 지층의 자북위치와 유사하게 나타난다. 이는 경상분지내 화강암류들이 정치이후 경동되지 않았음을 의미한다.
7. 백악기말 내지 신생대동안 제3기분지를 포함한 한반도 동남부의 지체구조 발달에서 양산단층의 역할은 기대 하였던 것보다 미미하였던 것으로 보인다. 양산단층 주변 암석들의 잔류자기 방향은 편향되지 않았으며, 백악기-신

생대의 동아시아 지자기 방향과 일치되는 것으로 보아 양산단층은 제3기동안 동해안을 따라 작용하였던 우향 전단력 (김인수, 1992)의 영향을 크게 받지 않았던 것으로 생각된다.

참고문헌

- 강희철 (1995) 경상분지에 분포하는 경상누층군 및 화성암류에 대한 고자기학적 연구. 부산대학교 대학원 이학박사학위논문, 190p.
- 김광호, 도성재 (1994) 양남분지에 분포하는 제3기 지층의 고지자기 연구. 지구과학회지, 15권, p. 36-45.
- 김남장, 권영일, 진명식 (1971) 한국지질도 (1:50,000), 모량도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 김인수 (1992) 새로운 東海의 成因모델과 양산단층계의 주향 이동운동. 지질학회지, 28권, p. 84-109.
- 김인수, 강희철 (1989) 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.
- 김인수, 이현구, 윤혜수, 강희철 (1993) 의성지역 백악기 암석에 대한 고자기 연구. 광산지질, 26권, p. 403-420.
- 도성재, 김광호 (1994) 의성지역에 분포하는 백악기 지층에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27권, p. 263-279.
- 도성재, 황창수, 김광호 (1994) 밀양 소분지에 분포하는 경상누층군 퇴적암류에 대한 고지자기 연구. 지질학회지, 30권, p. 211-228.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론적 적용성 연구 (I). 광산지질, 15권, p. 123-154.
- 민경덕, 김원균, 이대하, 이윤수, 김인수, 이영훈 (1994) 포항 일원에 분포하는 제3기 암류에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27권, p. 49-63.
- 서승조 (1985) 경상분지 중앙부 하부백악계의 지질과 고생물 (윤조화석). 경북대학교 이학박사학위논문, 177p.
- 이기동 (1990) 경상분지 백악계지층의 고지자기학적 연구. 1989년도 전국대학 기초과학연구소 지구과학(지질)분야 학술심포지움 발표논문집, 4집, 서울대학교 자연과학종합연구소, p. 43-57.
- 이민성, 강필중 (1964) 한국지질도(1:50,000), 양산도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 이미정, 이종익, 이민성 (1995) 경주지역의 A-형 알칼리 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31권, p. 583-607.
- 이윤중 (1980) 연양 및 울산지역 화강암질암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 13권, p. 69-79.
- 이윤중, 植田良夫 (1976) 한국 경상남도 연양도폭 및 북서부 울산도폭지역산 화강암질암의 K-Ar 연대. 광산지질, 9권, p. 127-134.
- 이윤중, 이인기 (1972) 한국지질도(1:50,000), 연양도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 전희영, 김동학, 엄상호, 봉필윤, 이호영, 최성자, 김복철, 권영인, 이동영, 박영수, 최영섭 (1990) 한반도 진화생물에 의한 퇴적분지연구 (II). 과학기술처, 288p.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1991) 한국 동남부지역 화강암류의 회전트랙 및 K-Ar 연령; 화성활동사와 지체구조적 의의. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-90-1B-2, p. 57-98.
- 홍승호, 최범영 (1988) 한국지질도(1:50,000), 유천도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소.
- Choi, D.K. and Park, J.B. (1987) Palynology of the Jinju Formation (Lower Cretaceous), Waegwan-Daegu and

- Jinju areas, Korea. *J. Paleont. Soc. Korea*, v. 5, p. 28-43.
- Choi, D.K. (1985) Spores and pollen from the Gyeongsang Supergroup, southeastern Korea and their chronologic and paleoecologic implications. *J. Paleont. Soc. Korea*, v. 1, p. 33-50.
- Fisher, R.A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*, A217, p. 295-305.
- 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.
- 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.
- Harland, W.B., Armstrong, R.L., Cox, A., Craig, L.E., Smith, A.G. and Smith, D.G. (1990) A geologic time scale 1989. Cambridge Univ. Press, 263p.
- Kim, K.H. and Jong, B.I. (1986) A study on the paleomagnetism of southern Korean since Permian. *J. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 67-83.
- 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.
- Kissel, C. and Laj, C. (Eds.) (1989) *Paleomagnetic Rotations and Continental Deformation*. Kluwer, 516p.
- Lee, G., Besse, J. and Courtillot, V. (1987) Eastern Asia in the Cretaceous: New paleomagnetic data from south Korea and a new look at Chinese and Japanese data. *J. Geophys. Res.*, v. 92, p. 3580-3596.
- McElhinny, M.W. (1964) Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, v. 8, p. 338-340.
- Otofuji, Y., Kim, K.H., Inokuchi, H., Morinaga, H., Murata, F., Katae, H. and Yaskawa, K. (1986) A paleomagnetic reconnaissance of Permian to Cretaceous sedimentary rocks in southern part of Korean peninsula. *J. Geomag. Geoelectr.*, v. 38, p. 387-402.
- 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, London, p. 254-286.

1996년 11월 27일 원고접수