

밀양소분지 건천리 일원의 백악기 암석에 대한 고자기 연구

강희철* · 김인수** · 윤성호***

*부산대학교 기초과학연구소 · **부산대학교 지질학과 · ***부산대학교 지구과학교육과

요 약

경상분지내 밀양소분지의 건천리 지역에 분포하는 백악기 하양층군의 송내동층, 채약산화산암, 건천리층, 그리고 유천층군 하부인 주사산안산암을 대상으로 지층생성 당시의 자북의 위치와 퇴적 시기를 결정하기 위하여 12개 노두에서 106개의 정향시료 채취하여 고자기 연구를 수행하였다. 연구결과 주 자성광물인 적철석과 자철석에 의하여 기록된 이들 지층들의 평균 특성잔류자기 방향은 역전검사 그리고 통계학적으로 99%의 신뢰도를 가지며 습곡검사 통과하였다. 단계적 습곡검사에서는 군집지수 k 값의 변화가 90%의 지층경사보정 단계에서 최대를 보여서 이들 지층들의 특성잔류 자기는 지층경사나 습곡작용 이전 즉, 퇴적 동시기이거나 그 직후에 획득된 1차 잔류자기임을 지시한다. 이들의 평균 방향과 고자기극의 위치는 각각 $D=22.9^\circ$, $I=59.1^\circ$ ($k=410$, $\alpha_{95}=3.0^\circ$, $N=7$ sites)와 $199.6^\circ E$, $71.6^\circ N$ ($K=206.9$, $A_{95}=4.2^\circ$)이다. 이는 중국대륙 및 경상분지내 다른 동시대 지층 들에서 구한 방향들과 오차한계 내에서 동일한 것으로서 연구지역과 이들 지역간에 상대적 변위나 수평회전운동이 거의 없었음을 지시한다. 자기층서학적 전지에서 볼 때, 연구지층들은 백악기 상부 알비안(upper Albian)에서 하부 캄파니안(lower Campanian)의 역자극기까지의 것으로 대비된다. 한편, 채약산화산암과 주사산안산암의 응회암과 및 각력암에서는 분산된 특성잔류자기 방향이 나타났는데 이는 암석들이 잔류자기를 획득한 후에 화산암물 구조운동에 의하여 재동(reworked)되었음을 의미한다.

주요어: 백악기, 고자기 연구, 자기층서, 채약산화산암, 주사산안산암

Kang, Hee-Cheol, Kim, In-Soo, and Yun, Sung Hyo, 2000, Palaeomagnetic Study on the Cretaceous Rocks in the Konchonri Area of the Northern Milyang Subbasin, Korea. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 1, p. 1-12.

ABSTRACT: A palaeomagnetic study was carried out on Early through Late Cretaceous sandstones and volcanic sequences (the Songnaedong Formation, Chaeyaksan Volcanics, Konchonri Formation, and Jusasan Andesite in ascending order) from Konchonri area in the northern Milyang subbasin of the Kyongsang Basin, Korea. A high-temperature stable remanence with direction of $d=22.9^\circ$, $i=59.1^\circ$ ($\alpha_{95}=3.0^\circ$) has been isolated and a corresponding pole was $71.6^\circ N$, $199.6^\circ E$ ($A_{95}=4.2^\circ$). The characteristic high-temperature component resides in both hematite and magnetite. The primary nature of this remanence is confirmed from positive fold and reversals tests. The palaeopole is consistent with those of the Hayang Group in other parts of the Kyongsang Basin. A comparison of the palaeomagnetic pole position from the studied area with the contemporary pole from China west of the Tan-Lu fault presents that Konchonri area has experienced little latitudinal displacement nor vertical-axis block rotation relative to the Chinese blocks since the Cretaceous. Based on the formations indicating dual polarity, radiometric and paleontologic data, the magnetostratigraphic age of the studied sequence from the Songnaedong Formation to the Jusasan Andesite ranges from upper Albian to lower Campanian reverse polarity chronozone. On the other hand, volcanic samples of the Chaeyaksan Volcanics and the Jusasan Andesite showed the scattered directions considered in group, even though individual sample showed a stable remanent magnetization in response to thermal demagnetization. It indicates that they have been reworked after acquisition of the stable remanent magnetization.

Key words: Cretaceous, Palaeomagnetism, Magnetostratigraphy, Chaeyaksan Volcanics, Jusasan Andesite

(Kang, Hee-Cheol, Research Institute for Basic Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea; Kim, In-Soo, Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea; Yun, Sung Hyo, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea; email: kanghc@hyowon.pusan.ac.kr)

1. 서 론

백악기동안 한반도에는 유라시아대륙 연변부의 지판운동에 연관되어 경상누층군의 퇴적과 더불어 격렬한 화산활동이 있었다. 특히 경상분지내 밀양소분지는 화산작용의 주무대로서 학봉현무암, 채약산화산암, 주사산화산암, 그리고 운문사화산암들이 그 산물들이다. 따라서 이 지층들은 백악기의 층서 설정에 있어서 중요한 위치를 차지하고 있는 것이다(장기홍, 1978; 장기홍·박순옥, 1997). 또한 밀양소분지에 분포하는 다수의 환상구조는 화산체의 함몰에 관련된 것으로 경상분지의 구조발달사와 밀접한 연관이 있는 것으로 논의되고 있다(차문성 외, 1985; 윤성효·황인호, 1989; 장기홍·박순옥, 1997; 장기홍 외, 1998).

본 연구는 밀양소분지내인 경상북도 경주시 건천읍 일원에 분포하는 채약산화산암, 주사산안산암, 그리고 주변 퇴적층들에 대한 고자기학적 연구이다. 본 연구지역의 채약산화산암에 대한 고자기 연구로는 Otofujii *et al.* (1982), Lee (1984), 그리고 김광호·김두수(1991)가 있는데 공통적으로 특장잔류자기 방향들이 분산되어 나타나는 것으로 보고되어 있다. Otofujii *et al.* (1982)은 이 분산의 원인을 암석들이 자화된 후에 회전 또는 이동되었기 때문인 것으로 해석하였으며, 김광호·김두수(1991)는 분산된 특장잔류자기 방향의 분포가 대원상으로 나타남을 주장하고 이 화산암들이 지구 자기장의 극이 바뀌던 짧은 시기에 자화되었기 때문인 것으로 해석한 바 있다. 본 연구에서는 이 선행연구에서의 연구결과들을 검토하고자 한다. 또한 연구지역은 화산층서학, 암석학, 방사능 연대 측정, 그리고 고생물학 등의 여러 가지 지질학적 연구들이 비교적 많이 이루어진 곳으로, 연구지역의 화산함몰구조와 관련된 잔류자기 방향의 편향 여부를 검토하는 외에 경상분지내 여러 소분지의 하양층군들간의 지층대비를 위한 기본적인 자기층서 자료를 획득하는 데에도 연구의 목적이 있다.

2. 지질개요

연구지역은 경상분지내 밀양소분지 북부에서 환상 지형구조를 보이는 동반부 지역으로(차문성 외, 1985), 하위로부터 경상누층군 하양층군의 상부지층인 진동층에 대비되는 송내동층, 채약산화산암, 건천리층과 유천층군의 주사산안산암 그리고 이들을 관입하는 불국사화강암으로 구성되어 있다(Fig. 1). 최하부층인 송내동층은 다데이와(立岩, 1929)의 대구층 상부에 대비되며, 연구지역의 북부 일원에서 층후 800 m로 넓게 분포한다(장기홍 외, 1984). 주로 적색, 황갈색 또는 녹회색의 이암, 세일 및 사암으로 구성되며, 상위의 채약산화산암과는 정합적 혹은 단층으로 접한다. 지층의 주향은 채약산화산암의 호상분포와 조화를 이루며 경사는 대체로 10-20°이나 채약산화산암과의 접촉부에서는 30-40°로 변화한다.

채약산화산암은 약 500 m의 층후를 이루는데 성인에 따라 화산쇄설성암층, 용암류, 그리고 라하르 퇴적층(lahar deposits)으로 세분된다(윤성효, 1998). 하부를 구성하는 화산쇄설성암층은 2-30 m 층후의 응회암과 라필리응회암 그리고 최대 층후 약 400 m에 달하는 화산각력암과 응회각력암으로 이루어져 있으며, 10 m 내외의 층후를 가지는 2-3매의 알카리현무암의 용암류를 협재하고 있다. 채약산화산암의 상부를 접하는 라하르 퇴적층은 응회질 사암, 세일의 호층으로 구성되며, 녹회색 사암과 암회색 세일의 호층에서 세일이 우세한 건천리층으로 접이한다. 현무암에 대한 K-Ar 연대 자료는 94±4 Ma 이며(윤성효, 별도발표 예정), Rb-Sr 동위원소비를 이용한 연대측정의 시도는 등시선(isochron)이 이루어지지 않아 성공되지 않았다(윤성효, 1998).

한편, 전희영 외(1990)는 채약산화산암을 주사산안산암질암의 형성에 기인한 화산함몰(cauldron subsidence)과 이로 인한 화산작용의 산물로 인지하고 주사산안산암의 상위부분으로 간주하였다. 또한 이들은 환상분포를 하고 있던 채약산화산암류가 점안

형 환상단층운동(lisric ring faulting)에 기인하여 암설류(debris flow) 및 사면퇴적(slope deposition)으로 재동(reworked)되어 현재의 화산성 쇄설퇴적암류가 형성된 것으로 보았다.

건천리층은 채약산화산암의 환상지형구조의 내부에서 폭 3-5 km로 호상 분포를 한다. 주로 암회색 세일, 이암 및 회색 사암으로 구성되며 본 연구를 위한 CR 및 CS 시료채취 장소에서는 공룡족흔 화석이 발견되기도 하였다. 지층의 주향은 채약산화산암의 환상 분포방향에 나란하며, 경사는 10-20° 내외로 환상지형구조의 중심부를 향하고 있다. 화석연구에 의한 건천리층의 지질시대는 대체로 세노마니안(Cenomanian)-투로니안(Turonian) (Yang, 1978) 또는 아пти안(Aptian)-전기 알비안(Early Albian) (서승조, 1985; Choi, D.K., 1985, 1989; Choi · Park, 1987; Choi, S.J., 1987, 1989; 전희영 외, 1990)인 것으로 알려져 있다.

경상분지에서 유천층군과 하양층군과의 접촉관계는 일반적으로 경사부정합으로 알려져 있으나(장기홍 외, 1984), 본 지역에서는 하양층군 최상위의

건천리층과 유천층군 주사산안산암이 정합적인 관계를 보여준다(장기홍 외, 1984; 차문성 외, 1985). 주사산안산암은 연구지역 남부에 넓게 분포하며, 안산암질각력암, 응회암 및 안산암으로 이루어져 화산층서의 유형과 산출상태에서 채약산화산암과 유사하다. 또한 주사산안산암은 용암류와 화산쇄설암류의 호층을 이루는데 암상에 따라 하부로부터 8개의 층으로 세분되기도 한다(김상욱, 1986). Rb-Sr 전암 동위원소비를 이용한 안산암의 연대는 83.6±11.4 Ma이다(윤성효, 별도발표 예정).

연구지역에서 가장 젊은 암석인 불국사화강암은 흑운모화강암으로서 연구지역의 남동쪽과 남서쪽에서 퇴적암층과 화산암층을 관입하며 분포하고 있다. 이 화강암체에 대한 Rb-Sr 전암-흑운모 연대는 82±1.4 Ma로 알려져 있다(주승환 외, 1982).

3. 연구방법

3.1. 시료채취 및 측정

본 연구를 위한 암석시료(sample)들은 대부분

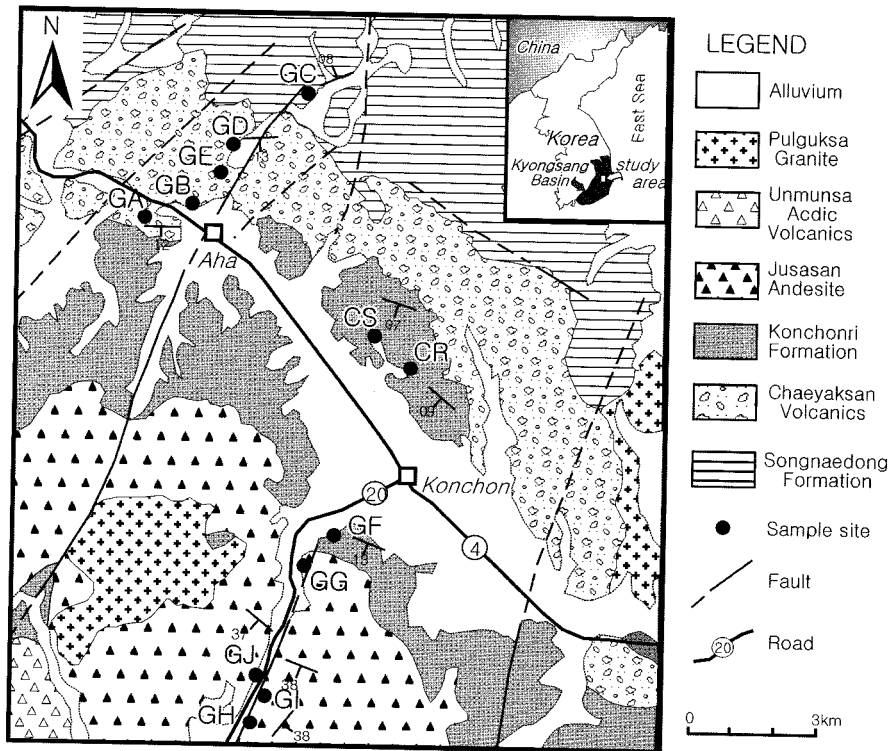


Fig. 1. Geologic and sample site map of the study area (adapted from Cha et al., 1985).

Table 1. Summary of palaeomagnetic sampling and results from the Konchonri area.

Stratigraphic units	Site ID	Strike /dip	n/N	Before bedding correction				After bedding correction				Palaeomagnetic pole		R/N	Lithology
				d	i	α_{95}	k_1	d	i	α_{95}	k_2	lat.	long.		
Yuchon Group	GG	20/26	0/9	scattered directions										andesitic tuff	
	GH	238/8	0/10	unstable										andesite	
Jusasan Andesite	GI	118/38 28/38	5/10	187.0	-39.9	21.3	13.9	211.2	-58.4	11.3	46.6	65.1	202.0	4/1	tuffaceous and gray sandstone
	GJ	136/42 126/37	5/9	207.8	-25.3	17.5	20.1	191.8	-61.1	15.7	24.6	78.9	180.7	3/2	"
Hayang Group Konchonri Fm.	CR	140/9	5/7	25.1	53.5	4.9	248.9	18.4	61.5	4.9	248.9	74.3	188.0	0/7	gray sandstone
	CS	106/7	4/6	22.0	50.6	3.6	640.2	23.1	57.5	3.6	640.2	71.5	205.2	0/4	"
	GF	119/14 129/13	6/12	22.7	46.5	6.5	108.5	19.6	60.1	6.3	115.8	73.8	194.5	0/6	"
Chaeyaksan Volcanics	GA	89/12	0/8	scattered directions								0/8		andesitic tuff	
	GB	141/20 138/12	0/10	scattered directions										andesitic tuff and breccia	
	GD	87/13 175/6	4/4	25.6	52.7	25.5	24.5	24.7	58.0	30.8	17.1	70.2	203.9	0/4	gray sandstone
	GE	85/13	0/11	scattered directions										andesitic tuff	
Songnaedong Fm.	GC	227/8 10/12	7/10	29.4	58.3	11.7	27.5	29.5	55.8	8.6	50.7	66.3	209.2	0/7	gray sandstone
Total mean		7 sites		22.5	47.0	9.2	43.9	22.9	59.1	3.0	410	71.6	199.6	$A_{95}=4.2$	$K=206.9$

Abbreviation: Site ID: site identification; n/N: number of specimens used in mean/sampled; R/N: samples with reversed/normal polarity.

회색사암과 안산암질 응회암 및 각력암으로, 대체로 층리가 잘 발달된 노두들을 대상으로 주로 4번 및 20번 국도변에서 채취되었다(Fig. 1). 시료채취 지역의 지리적 중심좌표는 35.87°N, 129.08°E으로 연구의 대상이 된 지층은 불국사화강암류를 제외한 4개 지층이었다(Table 1). 연구지역의 북부에 분포하는 송내동층은 노두발달 상태가 불량하여 시료채취가 1개 장소에서만 이루어 졌으며 각력암의 경우에는 기질부에서 시료를 채취하였다.

모든 시료들은 휴대용 착암기를 사용하여 직경 1인치의 코어시료(core sample)로 노두현장에서 착공하고 정향(定向, orientation)되었다. 각 시료채취 노두(site)에서는 자기층서적 고찰에 필요한 자기극성 정보를 최대한 확보함과 동시에 지자기 영년변화(secular variation)의 효과를 상쇄시키기 위하여, 비교적 넓은 수직 층서범위를 가지며 시료를 채취하였다. 각 노두에서의 수직층위적 착공간격은 최

소 30 cm 통상 1~2 m에 이르렀다. 이같은 방법으로 12개의 장소에서 106개의 독립정향 시료들을 채취하였는데 이들을 2.2~2.3 cm 길이의 원주형 표품시료(specimen)로 절단하여 측정과 세척실험을 수행하였다.

3.2. 자기세척실험

시료의 잔류자기 측정은 주로 부산대학교의 Molspin 스피너 자력계를 이용하여 수행하였으며, 일부 시료에 대해서는 서호주대학교의 2축 극저온 조건도자력계(2G 755-R)를 사용하였다. 잔류자기의 안정성 검토와 자화성분 분리를 위한 자기세척(magnetic cleaning)은 부산대학교의 Molspin AC demagnetiser와 Schonstedt TSD-1 thermal demagnetizer, 그리고 서호주대학교의 Magnetic Measurements사의 MMTDI thermal demagnetiser를 사용하였다. 열 자기세척과정에서 가열에 따른 자성광물의 광물학적

변화여부의 감지는 세척단계마다 부산대학교의 Molspin Minisep 대자율측정기나 서호주대학교의 Bartington MS2 대자율측정기를 이용하여 상온에서의 총대자율(bulk magnetic susceptibility)을 측정하였다. 또한 시료에 포함된 자성광물의 종류와 함량에 대한 정보를 얻기 위한 등온자류자기(Isothermal remanent magnetization) 실험은 서호주대학의 MMPM9 pulse magnetizer를 이용하였다.

자기세척실험은 우선 각 노두별로 자연잔류자기(NRM)의 강도가 높은 1~2개의 선발시료(pilot specimen)를 선택하여 최고 100 mT까지 10~15 단계의 교류 자기세척실험을 실시하였다. 실험결과 일부의 안산암질 응회암 시료를 제외하고는 이 방법이 효율적이지 못함이 판명되어 다른 시료들에 대해서는 열 자기세척을 실시하였다.

열 자기세척실험 역시 노두별로 우선 2~3개의 선발 시료를 선택하여 상온에서 500°C의 세척단계까지는 100°C 간격으로, 그 이상에서 580°C까지는 50°C 혹은 10°C 간격으로 단계별의 세척온도 간격

을 줄였으며, 세척단계가 650°C 이상의 고온에 이르러서는 10°C 이내에서 2~3°C가 되도록 그 간격을 더욱 줄였다. 이렇게 함으로써 최고 가열온도인 680-690°C까지 이르는 동안 14~20 단계의 세척과정이 거처졌다.

단계적 세척에 따른 잔류자기의 방향과 크기의 변화양상은 직교 벡터다이아그램(vector diagram: Zijdeveld, 1967)과 등각투영도(equal-angle net)를 통하여 검토한 후, 주성분 분석법(PCA: principal component analysis; Kirschvink, 1980)을 적용시켜 2차성분과 특성잔류자기(ChRM: characteristic remanent magnetization)의 방향을 결정하였다. 주성분 분석법을 적용할 때는 벡터다이아그램상에서 최소 3점 이상이 원점을 향해서 직선을 이루는 시료들만을 대상으로 하였다. 특성잔류자기의 노두별 통계치리(sitemean direction)는 Fisher 통계치리법(Fisher, 1953)에 의거하였다. 한편, 열 자기세척과정에서 총대자율이 초기 자연잔류자기(NRM) 값보다 2배 이상 증가된 시료들은 평균계산에서 제외하였다.

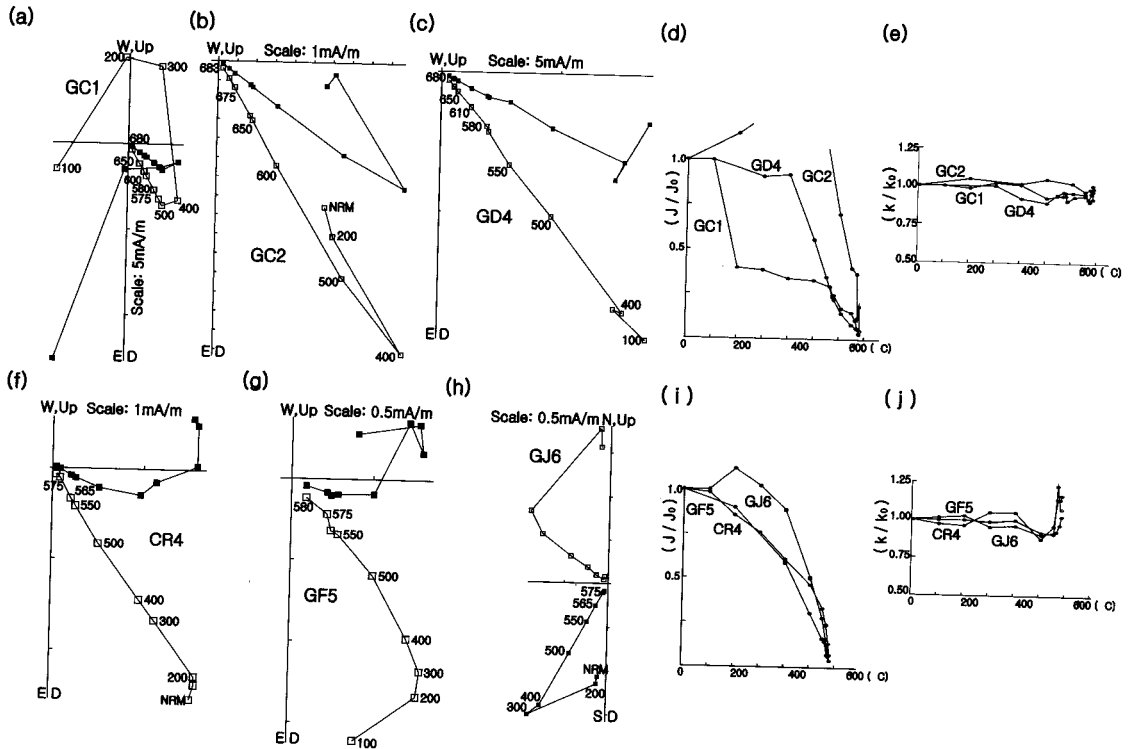


Fig. 2. Thermal demagnetization results of sedimentary rocks. All vector diagrams in this paper are depicted in in-situ coordinates with the solid (open) symbols projected onto the horizontal (vertical) plane. Temperature steps are in degrees Celsius.

4. 실험 결과

4.1. 자기세척실험

실험 결과를 암종에 따라 구분하여 설명하면 다음과 같다.

· 퇴적암: 본 지역 각 지층에 분포하는 퇴적암들의 초기 자연잔류자기(NRM)의 강도는 2~100 mA/m의 범위로 다양하게 나타나며, 열 자기세척 습성(Fig. 2)은 함유된 자성광물에 따라 크게 2가지로 구분되었다. 우선 최하부 지층인 송내동층의 회색 사암(Fig. 2a, 2b)과 상위의 채약산화산암 내에 협재된 녹회색 사암(Fig. 2c)의 경우에는 500°C까지의 가열로 2차 자화성분들이 제거된 후 680°C 내지 683°C 까지 원점으로 향하는 고온의 단일자기성분이 추출되었다. Fig. 2d의 세척온도에 따른 잔류자기 세기의 변화로부터 알 수 있는 바와 같이 이 고온성분은 적철석에 의한 것이다. 그러나 이들 시료가 500°C에서 580°C까지의 중온구간에서도 고온에서와 동일한 방향의 잔류자기를 보이는 것으로 보아, 화

산성 기원의 자철석이 이들 시료 내에 함유되어 있는 것으로 보인다. 세척온도에 따른 총대자율 값은 거의 일정하게 유지되었다(Fig. 2e).

건천리층의 회색 사암(Fig. 2f, 2g)과 주사산안산암내에 협재된 응회질 회색 사암(Fig. 2h)에서의 주 자성광물은 자철석이었다(Fig. 2i). 건천리층 시료들의 경우는 500°C 내지 550°C에서 원점으로 향하는 단일성분이 유리되었다. 주사산안산암 내의 응회질 사암은 NRM에서부터 역자화되어 있었는데 400°C까지의 가열로 2차 잔류자기가 완전 소거되고 그 이후부터 580°C까지 원점으로 향하는 단일성분이 유리되었다. 이들 시료에서의 세척온도에 따른 총대자율 값의 변화는 25% 이내의 증가를 보일 뿐이었다(Fig. 2j).

· 안산암질 응회암 및 각력암: Fig. 3은 채약산화산암 및 주사산안산암의 대부분을 차지하는 응회암 및 각력암 시료들에 대한 열 자기세척 실험의 예를 도시한 것이다. 채약산화산암의 응회암 및 각력암 시료(Fig. 3a)들은 500°C까지의 가열로 현재자기

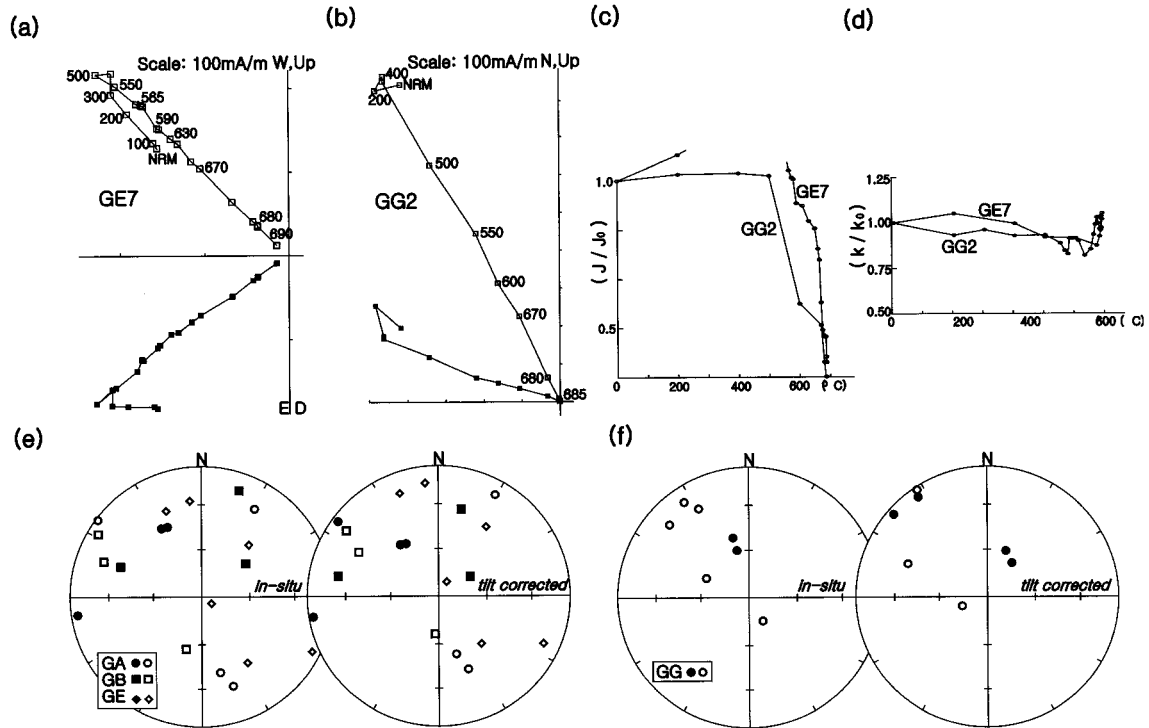


Fig. 3. Thermal demagnetization results of tuff and breccia from (a) the Chaeyaksan Volcanics and (b) Jusan Andesite. Equal-area projection show ChRM directions of (e) the Chaeyaksan Volcanics and (f) Jusan Andesite. Solid (open) symbols represent projections onto the lower (upper) hemisphere.

장 방향으로 판단되는 약한 잔류자기 성분이 제거되고 그 이후부터 690°C까지 원점으로 향하는 단일 잔류자기성분을 나타내었다. 주사산안산암의 응회암 시료(Fig. 3b)들의 경우에는 400°C의 가열로 점성 잔류자기로 판단되는 2차성분이 소거되고 450°C부터 단일성분이 유리되었다. 열 세척실험에서 드러난 세척습성과 세척온도에 따른 잔류자기 세기의 변화(Fig. 3c)는 이들 시료가 자철석과 적철석을 동시에 자성광물로 보유함을 나타내고 있다. 한편, 이 두 시료에서 알 수 있는 공통적인 세척습성은 자철석에 의한 잔류자기 방향(500~580°C 구간)과 적철석에 의한 잔류자기 방향(600~690°C 구간)이 동일하다는 것인데, 이 두 성분이 하나의 시료 내에서 같은 방향성을 가지고 있음은 두 성분이 획득한 잔류자기의 시기가 오랜 시간적 간격을 두고 있지 않음을 지시하는 것이다. 이상을 감안할 때 이들 암석에 함유되어 있는 적철석의 존재는 고온 및 높은 산소공급하에서 자철석이 적철석으로 변화되는 고온산화(deuteric oxidation; Butler, 1992)로 설명이 가능하다.

이상의 실험 예에서 본 바와 같이 채약산화산암과 주사산안산암의 응회암 및 각력암 개개의 시료는 퇴적암 시료들처럼 안정된 단일자기 성분을 나타내었다. 그렇지만 시료들 전체를 지층별로 함께 도시해 보면 그 방향이 심하게 분산되었다(Fig. 3e, 3f). 외견상 분산된 이들 방향이 실제로 무작위성 분포(random distribution)인지를 통계학적으로 검증하기 위하여 Watson (1956)과 Irving (1964)의 무작위성 검증법(random test)을 적용하였다. 그 결과, 이들 두 지층의 분산된 방향들은 모두 5%의 유의수준(significance level)에서 무작위성이 판별되었다(채약산화산암, $R = 5.8 < 6.98 = R_0$; 주사산안산암, $R = 4.17 < 4.18 = R_0$). 이것은 역암 시험과 마찬가지로 의미로서, 채약산화산암과 주사산안산암의 노두가 잔류자기를 획득한 후에 재동(reworked)되었음을 의미하는 것이다.

한편, Otofujii *et al.* (1982)은 시료들의 분산된 특성잔류자기 방향에 대하여 본 연구와 유사한 해석을 제시한 바 있다. 그러나 김광호·김두수(1991)는 채약산화산암층의 분산된 특성잔류자기 방향이 대체적으로 대원상에 분포한다는 사실로부터 이 암석들이 지구자기장이 정자기기(N)에서 역자기기(R)(또는 R에서 N으로)로 바뀌던 地磁氣遷移期에 생성되었기 때문이라고 추정하였다. 그러나 분산된 방향들의 대원상 분포가 절반의 대원상이 아니고

완전한 하나의 대원을 이루고 있어 지자기역전이 1회가 아닌 2회 연속적이라고 해석하여야 하는 난점이 있다. 그들의 자료에 무작위성 검증을 시행해 보면 19개의 분산된 방향을 보이는 시료들 중에서 동일 코어의 시료인 4개(CH1-2C, CH4-3B, CH4-6B, CH-7B)를 제외한 15개 시료들의 잔류자기방향의 5%의 유의수준에서 무작위성이 드러났다($R = 6.0 < 6.19 = R_0$)

4.2. 등온잔류자기 획득실험

상온에서 암석시료에 직류자기장을 증가시키면서 획득되는 등온잔류자기(IRM)의 변화를 관찰하면 시료에 포함된 자성광물의 종류에 대한 정보를 얻을 수 있다(Dunlop, 1972; 등). 단일잔류자기 성분이 잘 추출되는 지점의 시료들을 선택하여 등온 잔류자기 획득실험을 실시한 결과(Fig. 4), 본 연구 지역의 시료들은 크게 2가지로 구분되었다. Fig. 4a는 건천리층 및 주사산안산암의 퇴적암 시료들의 결과를 나타낸 것으로 등온잔류자기가 150 mT

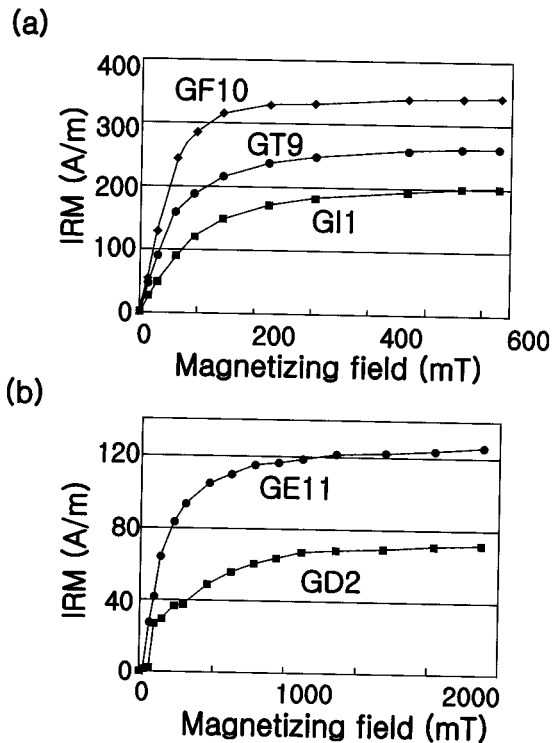


Fig. 4. Isothermal remanent magnetization (IRM) acquisition curves. (a) samples with magnetite, (b) samples with magnetite and hematite.

까지는 급상승하다가 200 mT 이상에서는 그 증가율이 급격히 감소되고 300 mT 이상에서는 거의 자기적 포화상태에 도달함을 보이고 있다. 따라서 시료들에 포함된 주 자성광물은 자철석-티탄자철석 계열인 것으로 여겨진다. 이와 달리 송내동층의 회색 사암, 채약산화사암과 주사산안산암의 응회암 내지 각력암은 Fig. 4b과 같이 우선 300 mT 까지 IRM강도가 급상승하지만 포화상태에 이르기 위해서는 훨씬 높은 자기장이 요구되었다. 따라서 이들 시료의 자성광물은 자철석과 적철석 두 가지임을 알 수 있다. 이는 앞서 세척온도에 따른 자기강도의 변화에서 알 수 있었던 내용과 동일한 결과이다.

5. 연구결과 및 해석

자기세척실험을 통하여 구해낸 각 지점들의 특성잔류자기(ChRM)와 Fisher 통계 등의 정보는 Fig. 5와 Table 1에 종합되어 있다. 앞장에서 설명한 바와 같이 채약산화사암의 3개 노두(GA, GB, GE)와 주사산안산암의 1개 노두(GG)는 분산된 잔류자기 방향을 보여서, 그리고 주사산안산암의 1개 노두(GH)는 자기세척습성이 불안정하여서 통계처리에서 제외되었다. 한편, 본 지역에서의 하양층군(건층리층)과 유천층군(주사산안산암)은 지질개요에서 언급한 바와 같이 정합적인 관계를 보이며 하양층군 각 지층과 주사산안산암층의 평균 특성잔류자기 방향과 고자기극의 위치가 통계학적

으로 동일하므로(Fig. 5와 Table 1) 이들을 구별하지 않고 연구지역 평균의 특성잔류자기 방향을 계산하였다. 따라서 연구지역의 특성잔류자기 방향은 총 7개의 노두에서 계산된 평균값인 바, 지층경사 보정전에는 $d=22.5^\circ$, $i=47.0^\circ$, $\alpha_{95}=9.2^\circ$, $k=43.9$ 이며 지층경사 보정후에는 $d=22.9^\circ$, $i=59.1^\circ$, $\alpha_{95}=3.0^\circ$, $k=410$ 이 된다(Table 1). 지층경사 보정후를 통하여 군집지수 k 값(precision parameter; Fisher, 1953)이 보정전의 k 값보다 9.34배 증가하여 McElhinny (1964)의 습곡검사(fold test)를 99%의 신뢰도로 통과한다. 단계적 습곡검사(stepwise unfolding test)에서도 k 값이 90%의 지층경사보정 단계에서 최대치를 보이므로(Fig. 6) 연구지역 지층들에 기록된 특성잔류자기 방향은 지층의 경사나 습곡 이전에 획득된 것임을 알 수 있다. 또한 각 노두의 지층경사 보정전의 특성잔류자기 방향이 현재자기장 방향과 상이하고, 역자화를 보유한 주사산안산암의 두 노두와 정자화만을 보유한 하양층군의 5개 노두의 특성잔류자기 방향이 서로 반평행을 이루며 95% 신뢰도로 역자화 검사(reversals test; McFadden · Lowes, 1981)를 통과하는 것으로 보아 지층경사 보정후의 특성잔류자기는 퇴적과 동시기이거나 퇴적 직후에 획득된 1차 잔류 자기임을 알 수 있다.

5.1. 자기층서학적 지층연령

본 연구에서 밝혀진 역자화 지층은 주사산안산암층에 협재된 응회질 사암층 2개 노두이었는데,

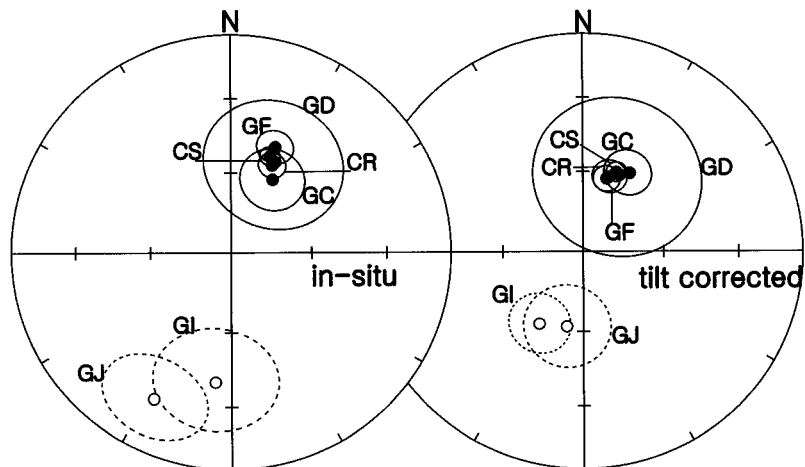


Fig. 5. Equal-area projections of the site-mean directions with their 95% confidence circle. Same conventions as in the Fig. 3.

8개의 시료가 자연잔류자기(NRM) 상태에서부터 역자화이었다. 김광호·김두수(1991)도 주사산안산암 3개의 노두에서 역자화를 보고하였는데 본 연구와 마찬가지로 역자화검사를 통과하였다. 따라서 이 두 연구의 역자화들은 지구자기장의 역전상태를 기록하고 있음이 분명하다. 그 이외의 송내동층, 채약산화산암(분산된 방향은 제외, 4장 실험결과 참조), 건천리층 모두는 정자화를 기록하고 있었다. 특히 건천리층은 선행의 연구에서도 정자화만이 보고된 지층이다(Lee, 1984; Kim·Jeong, 1986).

본 연구와 선행 고자기 연구, 그리고 연구지역의 방사능 연령 자료와 고생물학적 자료를 종합하여 Gradstein *et al.* (1994)의 자기층서표에 대비하면 Fig. 7과 같다. 장기홍 외(1998)에 의할 때 하양층군내 함안층 최상부에 대비되는 대구지역 구산동응회암에서 측정된 방사능 연령(U-Pb CHIME isochron age)이 113.6 ± 10 Ma로 밝혀져, 함안층과 진동층의 경계가 대략 아티안(Aptian)과 알비안(Albian)의 경계인 112.2 Ma에 해당된다고 한다. 그러나 함안층과 진동층의 경계부의 지층들에서 자기층서 연구가 이루어지지 못하여 두 층의 경계에 대한 자기층서학적 시대 설정에는 다소 어려움이 있다. 주사산안산암의 연령은 83.6 ± 11.4 Ma (Rb-Sr whole rock isochron; 윤성호, 별도발표 예정)로, 연구지역의 모든 지층을 최후기에 관입하고 있는 흑운모화강암의 Rb-Sr 전암-흑운모 연대는 82 ± 1.4 Ma로 알려져 있다(주승환 외, 1982). 따라서 방사능연령 자료와 자기극성 자료를 고려할 때 연구지역의 송내동층, 채약산화산암, 건천리층 그

리고 주사산안산암 4개의 지층은 총체적으로 상부 알비안(upper Albian)에서부터 하부 캄파니안(lower Campanian)의 역자극기의 끝까지로 대비된다. 그러나 이들 4개 지층 각각에 대한 구체적 시대 대비는 보다 잠정적일 수밖에 없겠다. 진동층 중부에 해당하는 송내동층은 대략 상부 Albian~

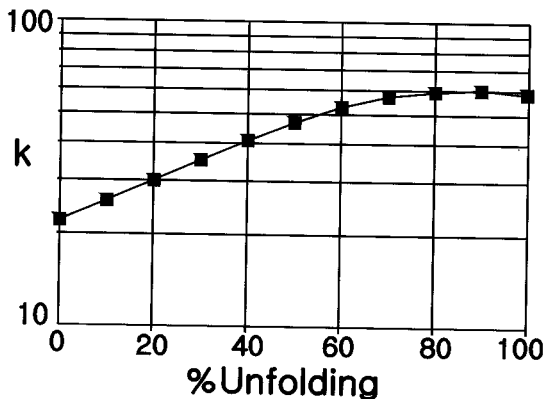


Fig. 6. Incremental fold test with Fisher's precision parameter (k) versus percent of unfolding.

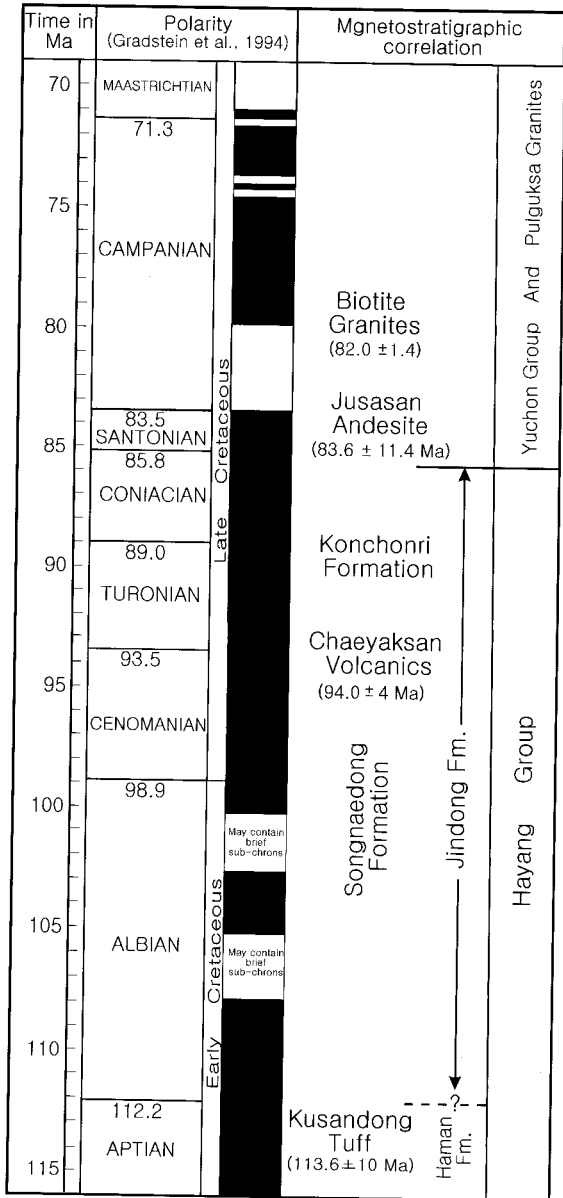


Fig. 7. Stratigraphic correlation based on radiometric and polarity data with the worldwide geomagnetic polarity time scale (Gradstein *et al.*, 1994).

Cenomanian의 정자극기에, 채약산화산암은 층내에 협재된 퇴적암이 정자화를 나타내고 현무암들의 K-Ar 연대자료가 94 ± 4 Ma (윤성효, 별도발표 예정)임을 감안 할 때 Cenomanian-Turonian의 정자극기에, 건천리층은 본 연구와 Lee (1984) 그리고 Kim · Jeong (1986)에서도 나타난 바와 같이 정자극기의 지층으로 지질개요에서 언급했던 화석연대 Aptian~Turonian와 하위 채약산화산암의 시대를 고려하여 대략 Turonian~Santonian의 정자극기 지층으로, 건천리층을 정합적으로 덮고 있는 주사산안산암은 Santonian 정자극기에서부터 lower Campanian 역자극기에 생성된 지층으로 추정된다.

5.2. 지구조운동에 대한 검토

그동안 경상분지 지역에서 수행된 고자기학적 연구 결과들에 의하면 백악기 이후 각 소분지들은 서로 상대적인 운동이 없이 안정된 상태를 유지하여 온 것으로 알려지고 있다. 즉, 중국이나 다른 유라시아 지역을 기준으로 별다른 위도변화 운동이나 지괴회전 운동을 일으키지 않은 것은 물론, 주향이동성 단층작용에 의한 지역 내에서의 국지적 회전운동도 일어나지 않았다는 것이 일반적인 견해이다(예와: 도성재 외, 1999).

이에 대한 검증으로 본 연구지역의 특성잔류자기 방향 및 고자기 극의 위치를 동시기의 중국대륙과 경상분지내 다른 지역에서 구한 자료들과 정량적, 통계학적으로(Coe *et al.*, 1985) 비교하기로 한다. 이를 위한 중국대륙의 자료와 경상분지 타지역에서의 자료들은 강희철 · 김인수(2000)에 상세히 종합되고 기재되어 있다. 우선 각 지역간의 남북방향의 상대적 변위운동량을 살펴보면 중국대륙과 연구지역의 사이에는 각거리로 $2.1^\circ \pm 4.4^\circ$ 의 변위량이 나타나고, 경상분지 전체 평균과 연구지역의 사이에는 각거리로 $2.9^\circ \pm 5.1^\circ$ 의 변위량이 나타난다. 한편, 상대적 수평회전운동의 가능성은 중국대륙에 대하여 연구지역이 시계방향으로 $4.3^\circ \pm 5.6^\circ$, 경상분지 전체 평균에 대하여 연구지역이 반시계방향으로 $5.4^\circ \pm 5.1^\circ$ 회전된 결과가 나온다. 오차의 범위를 고려할 때 이러한 결과는 연구지역이 중국대륙이나 경상분지 타지역에 대하여 지구조적으로 안정된 상태를 유지하여 왔음을 보이는 것으로 해석되는 것이다. 이러한 결론은 우리나라 타지역, 즉 경상분지의 진주지역(김인수 외, 1993a; 이윤수 · 민경덕, 1995), 의성지역(김인수, 1993b; 도성재 · 김광호 1994), 양산단층지역(강희철 외,

1996), 영양지역(강희철 · 김인수, 2000) 그리고 옥천대의 연변에 분포하는 영동지역 이나 화순지역(이윤수 · 민경덕, 1995)에서의 결론과도 같다.

6. 결 론

건천리 지역에 분포하는 백악기 하양-유천층군의 지층들은 자성광물로서 적철석과 자철석을 함께 보유하고 있거나 혹은 자철석만을 가지고 있었다. 이들에 의한 특성잔류자기(ChRM)는 습곡검사와 역전검사를 통과하는 1차(Primary) 잔류자기이다. 이들의 방향은 오차한계 내에서 중국대륙 및 경상분지 타지역의 동시대 지층으로부터 평균 지북위치와 서로 잘 일치하였으며 따라서 이들 지역과의 상대적인 남북 변위운동이나 수평회전운동의 가능성이 거의 없었음을 지시한다. 자기극성, 방사능 동위원소에 의한 연령 그리고 고생물학적 자료들을 종합하여 고찰할 때, 연구지역의 송내동층, 채약산화산암, 건천리층 그리고 주사산안산암은 총체적으로 백악기 상부 알비안(Albian)에서 캄파니안(Campanian) 하부의 역자극기까지에 대비되는 지층이다. 채약산화산암과 주사산안산암의 대부분을 차지하는 응회암 및 각력암들은 분산된 특성잔류자기 방향을 보였는데, 이는 암체들이 잔류자기를 획득한 후에, 화산합몰 구조운동에 의하여 재동(reworked)된 데에 기인하는 것으로 해석되었다.

사 사

야외조사와 시료채취에 도움을 준 부산대학교 대학원 지질학과 신종주 석사에게 필지들은 감사하며, 본 논문을 세심하게 읽어 주시고 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 익명의 심사자에게도 감사를 표한다. 본 연구는 강희철의 한국과학재단 97년도 전반기 해외 박사후연수 연구사업에 의하여 완성되었다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 강희철, 김인수, 손문, 정현정, 1996, 양산단층지역에 분포하는 퇴적암 및 화성암류에 대한 고자기 연구, 자원환경지질, 29, 753-765.
 강희철, 김인수, 2000, 영양지역에 분포하는 전기 백악기 하양층군에 대한 고자기 연구, 지질학회지, 36, 47-71.
 김광호, 김두수, 1991, 대구-경주 일대에 분포된 채

- 약산층 건천리층 및 주사산층의 지자기층서, 지질학회지, 27, 40-51.
- 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구, 이상만교수 송수기념논문집, 167-194.
- 김인수, 이현구, 윤혜수, 강희철, 1993a, 의성지역 백악기 암석에 대한 고자기 연구, 광산지질, 26, 403-420.
- 김인수, 강희철, 이현구, 1993b, 경상분지 남서부 진교-사천 지역 전기백악기 퇴적암에 대한 고자기 연구, 광산지질, 26, 519-539.
- 도성재, 김광호, 1994, 의성지역에 분포하는 백악기 지층에 대한 고지자기 연구, 자원환경지질, 27, 263-279.
- 도성재, 석동우, 김범철, 1999, 영양소분지에 분포하는 경상누층군에 대한 고지자기 연구, 자원환경지질, 32, 189-201.
- 서승조, 1985, 경상분지 중앙부 하부백악계의 지질과 고생물(윤조화석). 경북대학교 이학박사학위논문.
- 윤성효, 황인호, 1989, 경상분지 동남부의 후기 백악기 화산암체와 광화작용의 연관성 고찰(I), 부산대학교 사대논문집, 18, 183-193.
- 윤성효, 1998, 유천화산암 분포지 북부 백악기 채약산화산암의 암석화학 및 스트론튬 동위원소비 조성, 지질학회지, 34, 161-171.
- 이윤수, 민경덕, 1995, 옥천대의 중생대 이래의 지구조적 운동에 관한 고지자기 연구, 자원환경지질, 28, 493-501.
- 장기홍, 1978, 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조(II), 지질학회지, 14, 120-135.
- 장기홍, 이유대, 이영길, 서승조, 오규영, 이창훈, 1984, 경상속 유천층군 기저의 부정합, 지질학회지, 20, 41-50.
- 장기홍, 박순옥, 1997, 경상분지 중앙부의 구조발달사와 화산활동사. 자원환경지질, 30, 143-151.
- 장기홍, 이윤중, 스즈키 카즈히로, 박순옥, 1998, 백악기 구산동응회암 저어론 결정들의 형태, CHIME 연령 및 자사적 의의, 지질학회지, 34, 333-342.
- 전희영, 김동학, 엄상호, 봉필운, 이호영, 최성자, 김복철, 권영인, 이동영, 박영수, 최영섭, 1990, 한반도 진화생물에 의한 퇴적분지연구(II), 과학기술처, 288.
- 주승환, 진명식, 윤현수, 김동학, 1982, Rb/Sr년대 측정 연구(서산화강편암 및 화강암, 평해 온정리 화강암, 기타지역의 화강암), 한국동력자원연구소 조사연구보고, 13, 193-208.
- 차문성, 윤성효, 안호건, 1985, 경상분지 동남부의 환상구조: 채약산안산암에 대하여, 부산대학교 자연과학 논문집, 40, 337-346.
- 立岩巖, 1929, 慶州永川大邱倭館地質圖幅(1:50,000) 說明書, 10, 12.
- Butler, R.F., 1992, Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes, Blackwell Scientific Publications, 319.
- Choi, D.K., 1985, Spores and pollen from the Gyeongsang Supergroup, southeastern Korea and their chronologic and paleoecologic implications, Journal of the Paleontological Society of Korea, 1, 33-50.
- Choi, D.K., 1989, Paleopalynology of the Geoncheonri Formation (Lower Cretaceous), Geoncheon-Ahwa area, Korea, Journal of the Paleontological Society of Korea, 5, 1-27.
- Choi, D.K. and Park, J.B., 1987, Palynology of the Jinju Formation (Lower Cretaceous), Waegwan-Daegu, and Jinju areas, Korea, Journal of the Paleontological Society of Korea, 5, 28-43.
- Choi, S.J., 1987, Study on the Lower Cretaceous Charophytes from the upper Gyeongsang Supergroup, Journal of the Paleontological Society of Korea, 3, 79-92.
- Choi, S.J., 1989, Fossil Charophytes from the Nagdong Formation in Seonsangun, Gyeongsangbukdo, Korea, Journal of the Paleontological Society of Korea, 5, 28-38.
- Coe, R.S., Globerman, B.R., Plumley, P.W., and Thrupp, G.A., 1985, Paleomagnetic results from Alaska and their tectonic implications: in Howell, D.G., Eds., Tectonostratigraphic terranes of the Circum-Pacific region. Circum-Pacific Council for Energy and Resources Earth Sciences Series, 1, 85-108.
- Dunlop, D.J., 1972, Magnetic mineralogy of unheated and heated red sediments by coercivity spectrum analysis, Geophysical Journal of Royal astronomical Society, 27, 37-55.
- Fisher, R.A., 1953, Dispersion on a sphere, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 217, 295-305.
- Gradstein, F.M., Agterberg, F.P., Ogg, J.G., Hardenbol, J., Van Veen, P., Thierry, J., and Huang, Z., 1994, A Mesozoic time scale, Journal of Geophysical Research, 99, 24,051-24,074.
- Irving, I., 1964, Paleomagnetism and its applications to geological and geophysical problems, John Wiley and Sons, New York.
- Kim, K.H. and Jeong, B.I., 1986, A study on the paleomagnetism of southern Korean since Permian, Journal of the Korea Institute of Mining Geology, 19, 67-83.
- Kirschvink, J.L., 1980, The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data, Geophysical Journal of the Royal astronomical Society, 62, 699-718.
- Lee, G.D., 1984, Paleomagnetism des formations Cretaceous de la Coree du sud. Ph. D. thesis, University of Paris.

- McElhinny, M.W., 1964, Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism, *Geophysical Journal of the Royal astronomical Society*, 8, 338-340.
- McFadden, F.L. and Lowes, F.J., 1981, The discrimination of mean directions drawn from Fisher distributions, *Geophysical Journal of the Royal astronomical Society*, 67, 19-33.
- Otofuji, Y., Oh, J.Y., Hirajima, T., Min, K.D., and Sasajima, S., 1982, Paleomagnetism and age determination of Cretaceous rocks from Gyeongsang basin, Korean peninsula: *in* Hays, D.E., Eds., *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2. Geophysical Monography Series, 27, American Geophysical Union*, 388-396.
- Watson, G.S., 1956, A test of randomness of directions, *Monthly Notices of Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 7, 160-161.
- Yang, S.Y., 1978, On the discovery of *Nippononaia ryosekiana* from the Gyeongsang Group, Korea, *Journal of Geological Society of Korea*. 14, 33-43.
- Zijderveld, J.D.A., 1967, A.C. demagnetization of rocks: Analysis of results: *in* Collinson, D.W., Creer, K.M. and Runcorn, S.K., Eds., *Methods in Palaeomagnetism. Elsevier*, 254-286.
-

1999년 12월 9일 원고접수

2000년 3월 21일 원고채택