

부여분지와 함평분지에 분포하는 백악기 암석에 대한 자기특성 연구

홍준표¹ · 석동우^{1*} · 도성재²

¹한양대학교 해양환경과학과, ²고려대학교 지구환경과학과

Magnetic Characterization of the Cretaceous Rocks from the Buyeo and Hampyeong Basins

Jun-Pyo Hong¹, Dongwoo Suk^{1*} and Seong-Jae Doh²

¹Dept. of Environmental Marine Sciences, Hanyang Univ.

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea Univ.

A paleomagnetic investigation for the Cretaceous rocks in the Buyeo and Hampyeong Basins, located out of the Gyeongsang Basin, was carried out in order to elucidate the paleomagnetic directions in conjunction with the formation of the basins. Typical stepwise thermal demagnetization and measurement methods were used to determine the directions of characteristic remanent magnetizations (ChRM). The mean direction of the sedimentary rocks from the Buyeo Basin after bedding correction ($D/I=356.5^\circ/61.5^\circ$, $k=39.3$ $\alpha_{95}=7.4^\circ$), is more dispersed than that before bedding correction ($D/I=356.5^\circ/61.5^\circ$, $k=39.3$ $\alpha_{95}=7.4^\circ$), which suggests that the rocks in the Buyeo Basin were remagnetized. However, the statistics and dispersion of the ChRM directions after bedding correction are still acceptable and the paleomagnetic pole position after tilt correction (Lat./Long.= $69.3^\circ\text{N}/186.7^\circ\text{E}$, $K=11.6$ $A_{95}=14.0^\circ$) is closer to that of the Late Cretaceous pole of the Korean Peninsula. More detailed study is needed to confirm the nature of the remagnetization in the Buyeo Basin. On the other hand, the paleomagnetic pole before bedding correction (Lat./Long.= $81.6^\circ\text{N}/106.9^\circ\text{E}$, $K=25.1$ $A_{95}=9.3^\circ$) is positioned near the Paleogene pole of the Eurasian APWP. The mean ChRM direction of the sedimentary rocks from the Hampyeong Basin after bedding correction is $D/I=32.5^\circ/55.4^\circ$ ($k=35.6$, $\alpha_{95}=8.7^\circ$). It is more clustered than that before bedding correction ($D/I=18.3^\circ/62.5^\circ$, $k=14.1$, $\alpha_{95}=14.2^\circ$), indicating that the ChRM was acquired before tilting of the strata. The paleomagnetic pole position of the Cretaceous sedimentary rocks in the Hampyeong Basin, averaged out of site pole positions calculated from the tilt-corrected ChRMs, is Lat./Long.= $63.9^\circ\text{N}/202.7^\circ\text{E}$ ($K=21.3$, $A_{95}=7.6^\circ$), similar to the Late Cretaceous paleomagnetic pole of the Korean Peninsula (Lat./Long.= $70.9^\circ\text{N}/215.4^\circ\text{E}$, $A_{95}=5.3^\circ$), suggesting that the Hampyeong Basin has been stable since the Late Cretaceous period. One normal and two reversed ChRM directions are revealed through the measurements of the volcanic rocks from the Hampyeong Basin. Although these normal and reversed directions are not exactly antipodal, it is interpreted that the normal direction is the representative primary direction of the volcanic rocks of the Hampyeong Basin and the mixed polarity is the records of geomagnetic field at the time of the formation of the volcanic rocks. Paleomagnetic poles are at Lat./Long.= $70.2^\circ\text{N}/199.5^\circ\text{E}$ ($K=18.1$, $A_{95}=9.6^\circ$) for the normal direction, and Lat./Long.= $65.5^\circ\text{S}/251.3^\circ\text{E}$ ($K=7.1$, $A_{95}=20.7^\circ$) for the reversed direction. Compared with the representative pole positions of the Cretaceous period of the Korean Peninsula, it is concluded that the age of the volcanic rocks in the Hampyeong Basin is of the Late Cretaceous.

Key words : Buyeo Basin, Hampyeong Basin, Cretaceous volcanic and sedimentary rocks, Paleomagnetism

경상분지 이외의 지역에 분포하는 백악기 암석에 대한 특성잔류자화 방향을 이해하기 위하여 한반도 남서부에 분포하는 부여분지와 함평분지의 백악기 암석에 대한 고지자기 연구를 수행하였다. 부여분지에 분포하는 퇴적암의 고지자기 방향은 경사보정전의 방향($D/I=356.5^\circ/61.5^\circ$, $k=39.3$ $\alpha_{95}=7.4^\circ$)은 경사보정후의 방향($D/I=25.0^\circ/60.6^\circ$, $k=22.4$, $\alpha_{95}=9.9^\circ$)보다 더 집중됨으로 습곡 이후 재자화된 것으로 볼 수 있으나, 경사보정후의 방향의 정밀도(k)와 신뢰도(α_{95})

*Corresponding author: dwsuk@hanyang.ac.kr

가 경사보정 전의 값과 비교하여 신뢰할 수 있는 통계학적으로 여전히 양호한 값이며 경사보정 후의 극의 위치가 한반도 백악기의 극의 위치와 유사한 점 때문에 부여분지의 재자화 여부의 결정은 유보하였다. 경사보정 전의 고지자기극의 위치는 $Lat./Long.=81.6^{\circ}N/106.9^{\circ}E$ ($K=25.1$, $A_{95}=9.3^{\circ}$)는 유라시아 제3기의 고지자기 극과 유사하며, 경사보정 후의 고지자기극은 $Lat./Long.=69.3^{\circ}N/186.7^{\circ}E$ ($K=11.6$, $A_{95}=14.0^{\circ}$)로 한반도 후기 백악기의 극과 유사하다. 함평분지 퇴적암의 특성잔류자화 방향은 경사보정 후의 방향($D/I=32.5^{\circ}/55.4^{\circ}$, $k=35.6$, $\alpha_{95}=8.7^{\circ}$)이 경사보정 전의 방향($D/I=18.3^{\circ}/62.5^{\circ}$, $k=14.1$, $\alpha_{95}=14.2^{\circ}$)보다 더 집중된다. 경사보정 후의 방향으로부터 계산된 고지자기극의 위치는 $Lat./Long.=63.9^{\circ}N/202.7^{\circ}E$ ($K=21.3$, $A_{95}=7.6^{\circ}$)로 한반도 후기 백악기의 고지자기 극($Lat./Long.=70.9^{\circ}N/215.4^{\circ}E$, $A_{95}=5.3^{\circ}$)의 위치와 유사하므로 암석의 생성 시기는 후기 백악기로 판단하였다. 한편 함평분지에 분포하는 백악기 화산암류에서는 한 개의 정자화 방향과 두 개의 역자화 방향이 확인되었다. 이들 특성잔류자화 방향은 백악기 화산암 형성 당시 암석에 기록된 성분으로써 당시 지구자기장의 상태를 기록한 것으로 해석하였으며, 이중 정자화 방향을 함평분지 화산암의 대표 방향으로 채택하였다. 함평분지 화산암의 고지자기 극의 위치는 정자극의 경우는 $Lat./Long.=70.2^{\circ}N/199.5^{\circ}E$ ($K=18.1$, $A_{95}=9.6^{\circ}$)이며 역자극의 경우는 $Lat./Long.=65.5^{\circ}S/251.3^{\circ}E$ ($K=7.1$, $A_{95}=20.7^{\circ}$)이다. 이중 정자극의 위치는 한반도의 후기 백악기 극의 위치와 통계적으로 동일한 것으로 나타나 함평분지 화산암의 형성 시기를 후기 백악기로 해석하였다.

주요어 : 부여분지, 함평분지, 백악기 화산암과 퇴적암, 고지자기

1. 서 론

고지자기 연구는 국내의 유수 학자들에 의해 지난 20여 년간 활발히 진행되어 왔으며, 특히 백악기 경상분지 내의 의성소분지, 영양소분지 및 밀양소분지 등에 분포하는 백악기 암석들에 대하여는 많은 연구가 수행되었다. 그 결과 백악기 및 일부 고생대 암석에 대한 특성잔류자화 방향은 많이 밝혀진 상태이다. 한반도에 분포하는 백악기 퇴적분지는 경상분지 내의 밀양소분지, 의성소분지, 영양소분지가 있으며 경상분지 밖에는 옥천대 방향을 따라 존재하는 옥천대 내의 통리분지, 영동분지, 무주분지, 진안분지, 능주분지, 함평분지, 해남분지, 고흥분지가 존재하며 풍암분지, 음성분지, 공주분지, 부여분지가 경기육괴 내에 발달하였다 (Geological Society of Korea, 1999). 이들 백악기 분지의 암석에 대한 고지자기 연구로는 노두의 상태가 양호하고 잘 노출된 경상분지 내의 밀양소분지(Doh *et al.*, 1994), 의성소분지(Kim *et al.*, 1993; Suk and Doh, 1996) 및 영양소분지(Doh *et al.*, 1999a)에 분포하는 암석들에 대한 연구가 있었으며 그 결과 경상분지 내의 백악기 암석에 대한 특성잔류자화 방향은 많이 밝혀진 상태이다. 그러나 백악기 암석에 대한 고지자기 연구는 경상분지에 편중되어 진행된 것으로 한반도 전체에 대한 포괄적인 고지자기 결과는 완전하다고 할 수 없다. 이에 따라 최근에는 옥천대와 경기육괴에 분포하는 백악기 소분지에 대한 연구도 진행되어 영동분지(Doh *et al.*, 1996), 음성분지(Doh *et al.*, 1999b), 공주분지(Doh *et al.*, 2002), 능주분지(Kim and Noh, 1993), 풍암분지(Park and Doh, 2004)에 대한 연구결

과가 발표된 바 있으며 무주분지와 능주분지 등에 대한 고지자기 연구도 진행 중이다.

백악기 암석에 대한 선행 연구에 의해 경상분지 내의 소분지(밀양, 의성, 영양소분지)에 분포하는 퇴적암의 특성잔류자화 방향과 고지자기 극의 위치는 한반도 백악기의 대표 값으로 정립되었으나, 후기 백악기 화산암인 유천층군에서는 서로 상이한 몇 개의 특성잔류자화 방향이 보고됨으로써 일치된 대표 값이 결정되지 않고 있다. 또한 경기육괴 내의 소분지(영동, 음성, 공주소분지)의 퇴적암에서는 암석의 생성 연대와는 차이가 있는 재자화 방향이 공통적으로 보고되고 있다(Doh *et al.*, 1996; Doh *et al.*, 1999; Doh *et al.*, 2002). 반면 능주분지의 퇴적암에서는 광주단층에 의해 시계 방향으로 회전된 1차 자화방향이 보고되었으며(Kim and Noh, 1993), 음성분지(Doh *et al.*, 1999)와 해남분지(Lim *et al.*, 2001)에 분포하는 경상분지의 유천층군에 대비되는 화산암에서는 경상분지 화산암과 일치하지 않는 특성잔류자화 방향과 고지자기 극의 위치가 보고되고 있다. 이와 같은 결과에 대한 설명으로는 경상분지 밖에 존재하는 백악기 퇴적분지는 인리형 퇴적분지(pull-apart basin)로서 분지 형성시기가 경상분지와는 상이하나 분지 형성과 동시에 수반된 퇴적작용의 기록일 수 있으며, 백악기 퇴적암의 형성 후 수반된 화성활동에 의해 재자화 되었을 가능성도 포함한다. 또한 능주분지의 경우처럼 분지 주변의 지구조적 영향에 의해 특성잔류자화 방향의 변화가 가능하며, 경상분지 내 외에 분포하는 화산암의 경우에는 화산암 형성 당시의 지구자기장의 방향 변화를 기록한 것이거나, 화산암 정체 시 수반되는 국지적 변동에 의한 것으로 설

명되고 있다. 전술한 선행연구 결과에서 보듯이 앞으로 풀어야 할 문제는 첫째, 백악기 인리형 퇴적분지(음성, 공주, 능주분지 등)에 분포하는 암석은 어떠한 환경에서 재차화된 것인가를 규명해야 하며, 둘째로는 대표적인 고지자기방향을 결정할 수 없는 후기 백악기 화산암은 지구자기장의 변화를 기록한 것인가 아니면 화산암 정체 시 수반되는 국지적 변동에 의한 결과인가를 판단해야 한다. 본 연구는 백악기 암석에 대한 이러한 문제점을 밝히기 위해 아직 연구되지 않은 백악기 퇴적분지 중 전라남도 함평분지와 충청남도 부여분지 백악기 퇴적암과 함평분지에 분포하는 백악기 화산암에 대한 특성자료화 연구를 통하여 백악기 소분지에 분포하는 암석의 자화특성에 대한 이해를 목표로 수행되었다.

2. 지질개요

백악기 지층은 경상분지에 대규모로 분포하며 그 외에는 옥천대의 고생대 및 쥐라기 습곡 상부에 소규모로 분포되기도 한다. 백악기 지층의 분포가 극히 제한적이기는 하나 경기육괴와 소백산육괴, 그리고 북한에도 소규모로 산재되어 있다. 백악기 지층에 대한 조사는 경상분지에 대하여 많이 실시되었으며, 조사초기의 Chang(1975)에 의한 암층서적 분류를 보면 경상분지의 발달과정을 1) 선화산활동 퇴적기, 2) 화산활동 동시성 퇴적기, 3) 화산활동 정지기 4) 화강암 관입기로 나누었고 이들을 각각 신동층군, 하양층군, 유천층군 및 불국사 관입암류로 명명하였다. 그러나 신동층군의 하산동층에도 다수의 화산암편들이 포함되어 있다는 것이 확인됨에 따라 선화산활동 퇴적기와 화산활동 동시성 퇴적기에 의거한 백악기 지층의 분류기준은 일반적이지는 않다. 한반도, 특히 남한에는 경상분지를 위시하여 10여개의 소규모 분지들에 상부 중생대층인 백악기 육성퇴적층들이 퇴적되었으며, 분지별 층서는 층의 두께 등에서 큰 차이를 보이기는 하나 자색지층의 발달과, 상부로 갈수록 빈번해지는 화산암 및 화산기원 퇴적층의 협재는 거의 모든 백악기 퇴적분지들에서 나타나는 공통적 특징들이다. 경상분지 이외의 지역으로는 옥천대 및 그 주변의 소규모 백악기 분지로 이루어져 있으며, 옥천대 양측의 선캠브리아기 변성암 복합체 내에 소규모 백악기 퇴적분지들(부여, 공주, 음성, 진안, 풍암, 해남-목포, 영동 등)이 발달되었고, 옥천대 내에서는 조선누층군, 평안누층군, 옥천층군 및 대동층군의 습곡지층들 위에 주로 화산암, 응회암 및 응회암질 퇴

적암으로 구성된 백악기 지층들이 부정합으로 놓인다. 변성암복합체 위에 발달된 음성분지(Jung, 1987; Chun *et al.*, 1994; Choi, 1996), 공주분지(Lee, 1986; Lee, 1990), 부여분지(Kim *et al.*, 1994), 영동분지(Lee and Paik, 1990; Kim, 1996), 진안분지(Lee, 1992) 및 해남분지(Chun, 1989)에 대한 연구결과들은 이 분지들이 좌수향 주향이동단층(left-lateral strike-slip fault)들에 의해 생성된 인리형 분지에 해당되며 옥천대 양측의 단층대를 따라 형성되었음을 지시한다(Chun and Chough, 1992). 한편 옥천습곡대 내의 습곡 퇴적층들 위에 부정합으로 놓이는 백악기 지층들도 주로 화산활동기의 퇴적층인 하양층군 및 유천층군에 대비되고 퇴적 시기는 경상분지 발달의 중기-후기에 해당된다(Geological Society of Korea, 1999).

2.1. 부여분지

연구지역인 충청남도 부여분지는 좌수향 주향이동단층들에 의해 생성된 인리형 분지에 해당되며 옥천습곡대 양측의 단층대를 따라 형성되었다(Chun and Chough, 1992). 부여분지의 지질시대는 화석의 미산출로 고생물학적으로는 밝혀지지 못하였으나, 이 지역을 최초로 조사했던 Shimamura(1931)에 의해 최초로 앵봉산층이라 기재되었는데, 이 층명은 그가 신라통 앵봉산층이라 명명했던 청양도폭의 동남부에 분포하는 적갈색의 응회암질 셰일과 부여분지내의 퇴적암을 동일 지층으로 대비한데서 연유한 것이다(Kim *et al.*, 1994). 신라통은 이후 Chang(1975)에 의해 하양층군과 유천층군으로 나뉘었으며 앵봉산층은 하양층군에 속한다. 부여분지의 북서측 및 남동측에 북동방향의 주향으로 발달한 거의 평행한 2개의 좌수향 주향이동단층대에 의해 선캠브리아대의 변성암류와 쥐라기의 화강암질암으로 이루어진 기반암과 경계를 이루고 있다. 마름모꼴 형태의 인리형 분지인 부여분지는 최대 약 11 km의 연장과 4 km의 폭, 그리고 약 30 km²에 달하는 면적을 점유하고 있으며 전체 층후가 약 2.5 km에 달하는 백악기의 비변성 육성퇴적층으로 구성되어 있다(Geological Society of Korea, 1999). 본 연구를 위하여 갈색의 응회질 혈암(brownish tuffaceous shale)과 흑색 혈암(black shale)의 앵봉산층에서 총 13개 지점(site)로 부터 120개의 정향시료를 채취하였다(Fig. 1).

2.2. 함평분지

함평분지는 옥천습곡대의 남쪽에 위치하고 있으며 남서쪽은 광주 단층과 접해있다. 퇴적층의 두께는 약

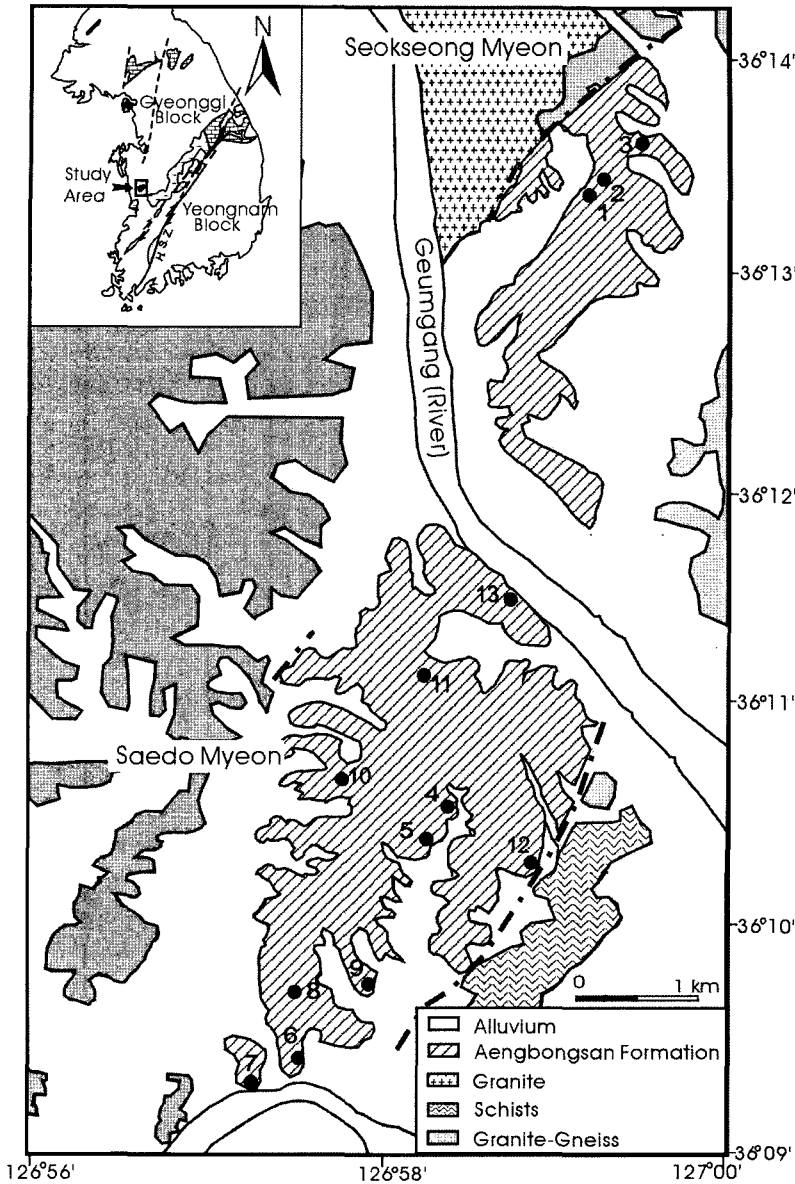


Fig. 1. A simplified geologic map of the Buyeo Basin in which sampling sites are marked with solid circles (modified from Kim *et al.*, 1994). H.S.Z.: Honam Shear Zone.

500 m이며 산성 응회암류, 흑색혈암/사암, 적색층, 응회암질 역암을 포함하는 중성 응회암류 등 4가지 암상이 인지되었다. 구조적 운동에 수반하여 일어난 화산활동이 퇴적층 형성 시 퇴적물을 주로 제공하였다. 이들 퇴적층들은 30 km 남쪽에 위치한 해남분지와 잘 대비된다. 해남-목포지역과 인근 도서에는 백악기의 화산암류, 화산쇄설성 퇴적암류 및 흑색 셰일과 사암이 넓게 분포한다. 이 지역의 백악기 지층은 선캄브리아대의 변성암 및 쥐라기 화강암 위에 부정합으로 놓인다. 백악

기 후기의 해남-목포 지역에서는 중성 및 산성 화성활동이 활발하고, 부분적으로는 호수가 형성되어 400 m 이상의 퇴적암이 퇴적되었다. 또한 퇴적층 형성에 분지 가장자리의 층적선상지 발달 등으로 보아 성장단층에 의해 형성된 구조분지(tectonic depression), 즉 주향이동 단층에 의한 인리형 분지에서 퇴적된 것으로 해석된다(Geological Society of Korea, 1999). 함평분지 퇴적암에서는 하양층군에 대비되는 적색사질암(purple arenaceous rock), 녹색사질암(green arena-

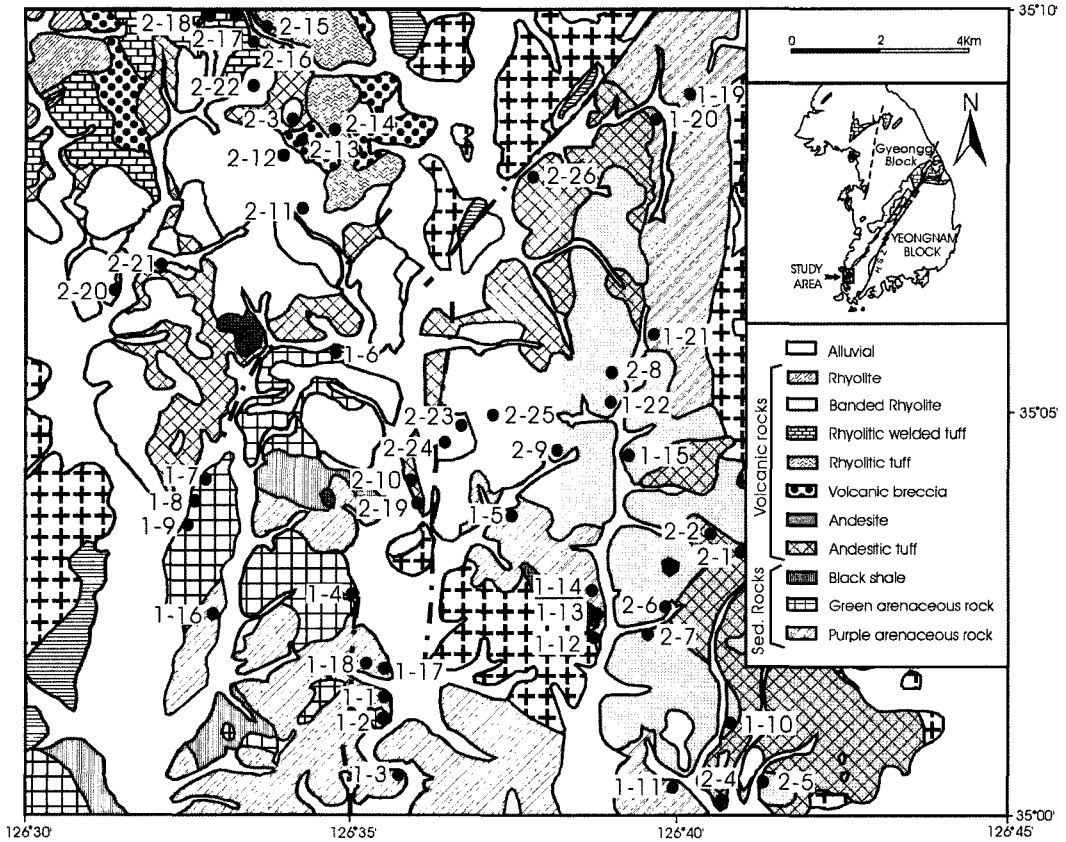


Fig. 2. A simplified geologic map of the Hampyeong Basin in which sampling sites are marked with solid circles (modified from Hwang *et al.*, 2002). H.S.Z.: Honam Shear Zone.

ceous rock), 흑색혈암(black shale)지역의 16개 지점에서 129개의 정향시료를 채취하여 고지자기 실험을 실시하였다(Fig. 2).

함평분지에 분포하는 백악기의 화산암류로는 유문암(rhyolite), 유문암질 용결응회암(rhyolitic welded tuff), 유문암질 응회암(rhyolitic tuff), 안산암질 응회암(andesitic tuff), 안산암(andesite)과 화산각력암(volcanic breccia)이 주를 이루고 있다. 유문암, 유문암질 용결응회암, 유문암질 응회암, 화산각력암은 소규모로 한정적으로 분포한다. 유문암은 대개 관입형태로 나타나며 화산각력암에는 이 유문암의 각력들이 다량 포함되어 있다. 유문암질 용결응회암은 유문암질 응회암과 호상 유문암의 각력들을 다량 포함한다. 유문암질 응회암은 여러 곳에서 화산 각력암, 안산암, 안산암질 응회암 등을 피복하고 있으며, 주변 암체의 대소 각력들을 포함하고 있다. 화산암류에서 가장 넓은 면적을 차지하는 안산암은 안산암질 응회암을 관입 또는 피복하거나, 또는 유문암에 의하여 피복되어 있다. 이 양대 암체는 현저하게 북서

남동방향으로 배열되는 양상을 이룬다. 안산암질 응회암 또한 북서에서 남동 방향으로 대각선으로 넓게 분포되어 있다. 이 일대의 넓은 화산암체의 기저부를 형성한 이 응회암층은 도처에서 안산암에 의하여 관입되어 있다. 지역에 따라서는 저색 사질암층의 상위에 놓여 있는데 접촉부는 부정합을 이루고 있다. 안산암질 응회암은 안산암의 관입에 앞선 화산 활동의 산물로서 주변 근거리에서 분출 비상하여 주로 근처 육상에 집적된 것으로 보인다. 이들 화산암류의 30개 지점에서 276개의 정향시료를 채취하였으며(Fig. 2), 이들 정향시료로부터 실험실에서의 착공을 통하여 487개의 원통형 정향시료를 만들었고 이 중 257개의 시료에 대하여 고지자기 실험을 실시하였다.

3. 연구방법

충남 부여분지와 전남 함평분지에 분포하는 백악기 암석에 대한 특성잔류자화(ChRM) 방향 연구를 위하여

두 분지에 분포하는 퇴적암과 화산퇴적암 및 화산암을 대상으로 portable, gasoline-powered rock drill과 Brunton compass를 이용하여 각 지점에서 4~12개의 정향시료를 채취하였다. 채취된 시료를 실험실에서 직경 및 길이가 각각 2.5×2.2cm인 원통형 시료로 만들었다.

특성잔류자화 방향 측정을 위하여 각 시료에 대하여 단계적 열소자와 교류소자를 실시하여 최적의 소자 방법을 정하였다. 열소자는 Magnetic Measurements사의 열소자기(MMTD80), 교류소자는 Molspin사의 교류소자기를 사용하였다. 교류소자는 50 mT에서 300 mT까지는 50 mT 간격으로 증가시키고 300 mT에서 600 mT까지는 100 mT간격으로 600 mT에서 900 mT까지는 150 mT 간격으로 증가시켜 소자를 실시하였다. 열소자는 300°C까지는 100°C 단계, 500°C까지는 50°C단계, 600°C까지는 20°C 단계, 700°C까지는 10°C 단계로 각 시료의 잔류자화를 기록하는 자성광물의 큐리온도(Curie Temperature)까지 수행하였다. 잔류자화 측정은 FINO AG사의 SQUID(Superconducting Quantum Interference Device) based spinner magnetometer(HSM2)를 사용하였으며 자연잔류 자화강도가 수백 mA/m 이상인 자화강도가 높은 암석시료에 대하여는 Molspin사의 spinner magnetometer를 사용하였다. 열소자시 가열에 따른 자성광물의 화학 변화를 감지하기 위하여 Bartington사의 대자율 측정기(MS2)를 이용하여 대자율 변화를 측정하였다.

고지자기 자료 처리는 적교소자도(vector diagram,

Zijderveld, 1967)상에 나타나는 방향변화를 주성분분석법(principal component analysis, Kirschvink,1980)을 이용하여 각 방향성분을 추출하며, 주성분분석법 적용 시에는 일직선상에 나타나는 최소한 3점 혹은 그 이상의 점들과 원점을 이용한 방법(anchored line fit method)을 적용하였다. 각 소자 단계에 따른 잔류자화의 방향 변화가 원점을 향하지 않으나 입체투영도상에서 대원을 따라 방향이 변할 경우에는 McFadden and McElhinny(1988)의 구획한정법(sector constraints)을 이용한 대원법(great circle method)을 이용하여 특성잔류자화 성분을 추출하였다. 각 암석시료로부터 추출된 특성잔류자화 방향에 대하여 Fisher의 구면통계법(Fisher, 1953)을 이용하여 노두별, 층별 평균값을 산출함으로써 연구 대상 암석의 특성잔류자화 방향, 변성작용에 의한 재자화 여부 및 지체구조적 진화과정에서의 역할 등을 이해하는데 필요한 자화특성 정보를 취득하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 부여분지 퇴적암

부여분지의 퇴적암에 대해서는 잉봉산층에 속하는 갈색 응회질혈암(brownish tuffaceous shale)과 흑색혈암(black shale)의 13개 지점에서 채취한 129개 시료의 특성잔류자화 방향을 측정하였으며, 자연잔류자화 강도는 약 2~151 mA/m의 분포를 나타낸다. 부여분지 퇴적암의 소자처리 이전의 자연잔류자화 방향은 경사 보정 전이 $D/I=356.0^\circ/57.7^\circ$ ($k=17.4$, $\alpha_{95}=3.2^\circ$), 경

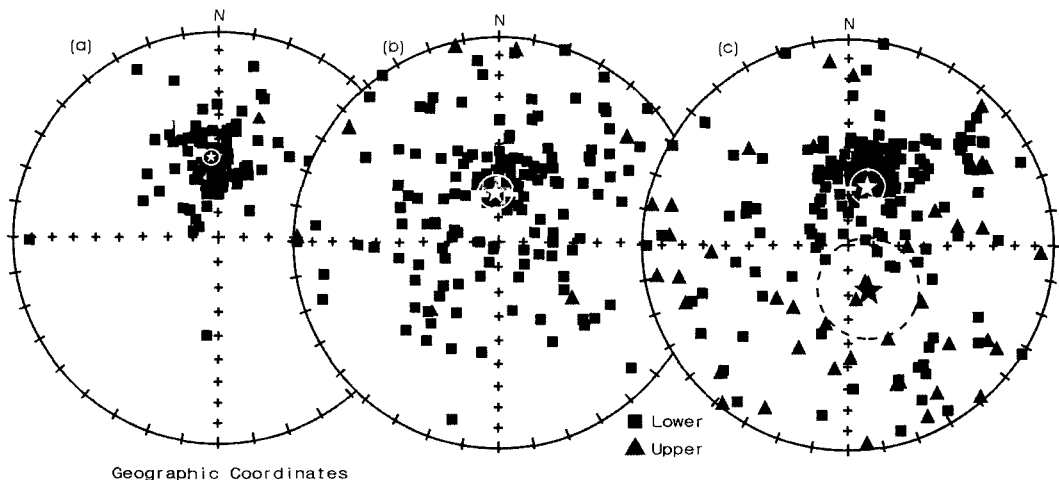


Fig. 3. NRM directions of (a) the sedimentary rocks from the Buyeo Basin and (b) Hampyeong Basin and (c) the volcanic rocks from the Hampyeong Basin. Open (solid) stars represent the mean direction of normal (reversed) NRM directions with 95 percent confidence circle.

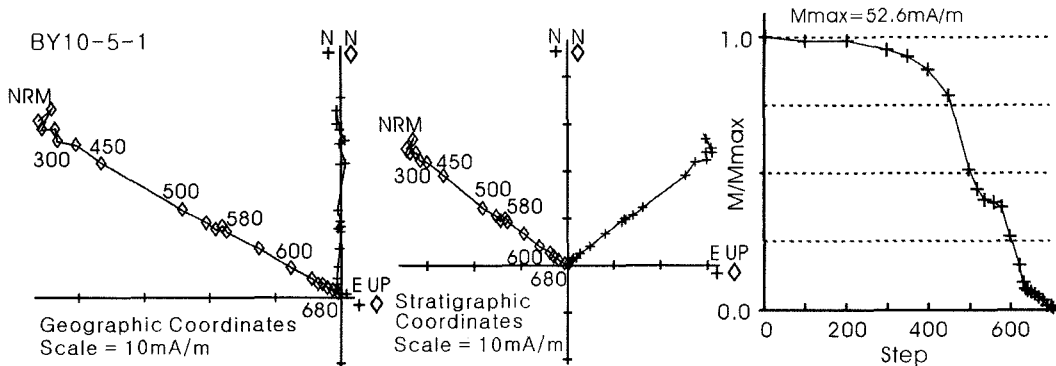


Fig. 4. Representative demagnetization results of a well behaved sedimentary rock sample from the Buyeo Basin. Zijderveld diagrams in geographic and stratigraphic coordinates, and normalized intensity curve of sample BY10-5-1.

Table 1. Paleomagnetic results of the Cretaceous sedimentary rocks from the Buyeo Basin.

Site	n/N	Geographic coordinate				Stratigraphic coordinate			
		Dg(°)	Ig(°)	k	α_{95}	Ds(°)	Is(°)	k	α_{95}
BY 1*	5/8	319.7	37.7	21.4	16.9	324.5	43.4	7.4	30.2
BY 2	7/9	351.6	51.9	22.4	13.0	334.9	68.7	18.5	14.4
BY 3	6/7	317.6	68.0	43.0	10.3	96.2	85.8	34.5	11.6
BY 4	6/10	359.6	35.2	229.1	4.4	49.3	62.0	124.4	6.0
BY 5	5/8	0.9	61.5	28.2	14.7	28.3	57.8	32.0	13.7
BY 6	5/8	350.6	62.9	97.3	7.8	10.0	45.1	67.2	9.4
BY 7	5/10	358.1	60.7	346.8	4.1	12.2	49.3	258.7	4.8
BY 8	7/11	0.2	62.2	593.6	2.5	24.5	52.1	188.0	4.4
BY 9	7/8	356.1	71.5	391.1	3.1	22.8	47.0	182.4	4.5
BY 10	5/8	350.8	60.3	339.6	4.2	49.1	44.5	339.6	4.2
BY 11*	4/11	339.6	45.1	21.0	20.5	34.1	62.2	18.3	22.1
BY 12	8/09	349.8	74.0	98.7	5.6	14.2	63.4	94.8	5.7
BY 13	9/13	30.7	58.1	120.8	4.7	53.4	73.3	246.1	3.3
Mean	11	356.5	61.5	39.3	7.4	25.0	60.6	22.4	9.9

n/N: number of samples used in average/measured; Dg and Ig: declination and inclination in geographic coordinates; Ds and Is: declination and inclination in stratigraphic coordinates; k: Fisherian precision parameter; α_{95} : radius of cone of 95% confidence interval. *: Site not used in calculation of mean.

사보정 후가 $D/I=21.2^\circ/56.4^\circ$ ($k=11.8$, $\alpha_{95}=3.9^\circ$)로 나타나며(Fig. 3a) 경사보정전의 방향은 주로 한반도의 평균 지구축 쌍극 자기장(mean axial dipole field) 방향($D/I=0^\circ/56.5^\circ$)으로 우세하게 모여 있다. 이는 자연 잔류자화가 2차 자화로서 비교적 오랜 기간에 걸쳐 획득된 성분임을 지시한다.

각 지점별로 표본 시료를 선정하여 교류소자를 실시 하였으나 최대 90 mT의 교류자장의 소자단계에서도 효과적인 소자가 불가능하여 모든 시료에 대하여 열소자를 실시하였다. 부여분지 퇴적암의 대표적인 열소자 결과는 Fig. 4에 도시하였으며, 300°C 이상에서 단일 성분이 분리되는 것을 볼 수 있다. 450°C~550°C와

600°C~650°C 사이에서 자화강도가 현저히 감소하는 것으로 보아 이 시료는 자철석과 적철석의 두 가지 자성광물이 특성잔류자화를 기록하고 있음을 유추할 수 있다. 그러나 자화강도 감소 시 방향의 변화는 관찰되지 않는다. 13개 지점에서 채취한 부여분지 퇴적암의 지점평균방향(site mean) 중 α_{95} 가 20° 이하인 11개 지점으로부터 계산한 평균방향은 경사보정 전이 $D/I=356.5^\circ/61.5^\circ$ ($k=39.3$, $\alpha_{95}=7.4^\circ$)이며 경사보정 후의 방향은 $D/I=25.0^\circ/60.6^\circ$ ($k=22.4$, $\alpha_{95}=9.9^\circ$)로서 경사보정 전의 정밀도(precision parameter, k)와 신뢰도(95% confidence limit, α_{95})가 경사보정 후의 값보다 좋게 관찰된다. 평균방향 계산에 사용된 11개 지점에

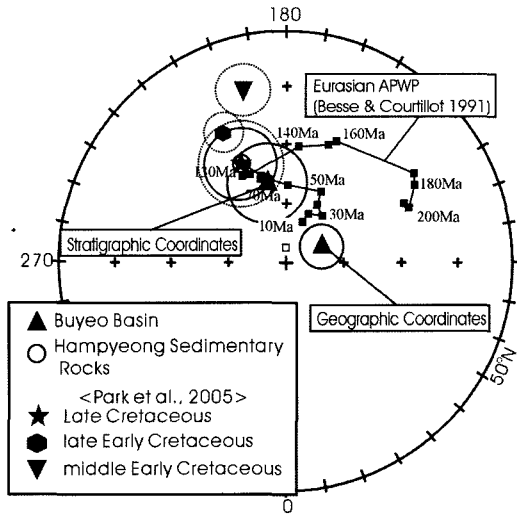


Fig. 5. Comparison of paleomagnetic pole positions of the sedimentary rocks from the Buyeo and Hampyeong Basins with those of the Cretaceous period of the Korean Peninsula (Park *et al.*, 2005) and the apparent polar wander path of Eurasia (Besse and Courtillot, 1991).

서 계산된 고지자기극으로부터 평균한 부여분지 퇴적암의 고지자기 극의 위치는 경사보정 전이 Lat./Long.=81.6°N/106.9°E (K=25.1, A_{95} =9.3°)이며 경사보정 후의 고지자기극의 위치는 Lat./Long.=69.3°N/186.7°E (K=11.6, A_{95} =14.0°)이다. 부여분지 앵봉산층에 대한 고지자기 결과는 Table 1에 정리하였으며 고지자기극의 위치는 Park *et al.*(2005)의 한반도 백악기 결과 및 Besse and Courtillot(1991)의 유라시아 위자극이 동곡선과 비교하여 Fig. 5에 도시하였다.

부여분지에 분포하는 백악기 퇴적암의 특성잔류자화 방향은 경사보정 후의 방향이 경사보정 전의 방향에 비하여 정밀도(k)가 감소됨이 관찰되었다. 경사보정 후의 평균방향이 경사보정 전의 방향에 비해 더 분산되는 것은 암석이 형성된 후 습곡이나 기타 구조적인 변형을 거쳐 현재의 상태로 지층이 위치한 후 암석이 재자화 되었음을 지시하고 있다. 구조적인 변형시의 재자화 여부를 알아보기 위하여 단계별 경사보정을 실시하였으며 그 결과 20% 경사보정 시 k 값이 최대치를 나타내었다. 이것은 80% 습곡이 진행되었을 때 지층이 경사점과 동시에 특성잔류자화를 획득하였거나(syn-folding magnetization) 또는 경사 후에 재자화된 것을 지시한다. 그러나 경사보정 후의 특성잔류자화 방향의 감소한 정밀도(k=22.4)와 신뢰도(α_{95} =9.9°)는 여전히 고지자기 자료로서 신뢰할 수 있는 값이므로 부여분지 퇴적암의 특성잔류자화를 재자화로 단정하기에는 문

가 있다고 판단된다. 특히 syn-tectonic과 연관된 구조 분지에서 발생할 수 있는 여러 가지 이방성 요소들(인지되지 않은 복합습곡, 잔존 2차자화성분 등)로 인해 통계치가 Fisher 분포에서 어긋난 복잡한 분포양상을 가질 수 있기 때문에 비록 기존의 Fisher 통계법에 의한 경사보정에 통과하지 않는다고 해서 1차자화가 아니라고 할 수는 없다. 따라서 경사보정 전과 후의 고지자기 극의 위치를 한반도의 백악기의 결과(Park *et al.*, 2005) 및 유라시아대륙의 위자극이동곡선(Besse and Courtillot, 1991)과 비교하였다(Fig. 5). Park *et al.*(2005)에 의해 보고된 한반도의 K_{1M} (middle Early Cretaceous)의 극의 위치는 Lat./Long.=59.6°N/194.7°E (A_{95} =4.6°), K_{1L} (late Early Cretaceous)의 극의 위치는 Lat./Long.=68.1°N/207.7°E (A_{95} =3.2°), 그리고 K_2 (Late Cretaceous)의 극의 위치는 Lat./Long.=59.6°N/194.7°E (A_{95} =4.6°)이다. 부여분지 퇴적암의 경사보정 후의 고지자기 극의 위치는 한반도 후기 백악기(K_2) 극을 95% 신뢰도 범위 내에 포함하나 후기 백악기의 95% 신뢰도 범위 내에는 포함되지 않으므로 (Fig. 5) 이 두 개의 극은 통계적으로 다르지 않다고 할 수 있으므로 부여분지 퇴적암과 부여분지의 형성은 후기 백악기로 해석할 수 있다. 그러나 열소자시 많은 시료에서 자연잔류자화 방향과 고온에서 분리되는 특성잔류자화 방향의 유사성이 관찰되며(Fig. 4), 자연잔류자화 또는 재자화 성분이 소자단계를 거치면서도 완전히 분리되지 않았다는 증거를 발견하지 못한 점은 부여분지 퇴적암의 경사보정 후의 방향 및 고지자기 극의 위치를 이들 퇴적암이 형성과 동시에 기록된 대표적인 1차 자화 값으로 인정할 수 없게 한다. 반면 경사보정 전의 부여분지 퇴적암의 고지자기 극의 위치는 한반도 백악기의 극들의 위치와는 상이하며 대신 유라시아대륙의 위자극이동곡선(Besse and Courtillot, 1991)의 30 Ma 또는 그 이후의 극의 위치와 유사함을 나타낸다(Fig. 5). 만약 옥천대 주변의 다른 백악기 퇴적 소분지들(음성분지, 공주분지, 영동분지, 풍암분지)과 같이 부여분지의 퇴적암이 재자화 되었다면 재자화 작용은 제 3기에 발생했다고 해석할 수 있다. 다만 부여분지는 선캠브리아대의 변성암류와 주리기의 화강암 질암을 기반암으로 하는 백악기의 비변성 육성퇴적층으로(Geological Society of Korea, 1999) 주변에 재자화를 유발할 만한 화성활동과 같은 지질현상이 보고된 바가 없으므로 재자화로 단정하기에도 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 부여분지의 재자화 여부는 유보하였다.

4.2. 함평분지 퇴적암

함평분지의 퇴적암 시료는 하양층군과 대비되는 적색사질암, 녹색사질암 및 흑색혈암지역에서 채취하였다(Fig. 2). 16개 지점의 129개 시료에서 자연잔류자화강도를 측정된 결과 약 1.0~28.2 mA/m의 분포를 나타내었다. 함평분지에서 채취한 모든 시료에 대한 자연잔류자화 방향은 경사보정 전이 $D/I=356.1^\circ/69.5^\circ$ ($k=3.7$, $\alpha_{95}=6.8^\circ$), 경사보정 후가 $D/I=10.2^\circ/65.6^\circ$ ($k=3.6$, $\alpha_{95}=6.9^\circ$)으로 분산되어 있기는 하지만 주로 한반도의 평균 지구축 쌍극 자기장 방향($D/I=0^\circ/56.5^\circ$)으로 우세하게 모여 있으며(Fig. 3b) 이것은 자연잔류자화는 2차 자화로서 비교적 오랜 기간에 걸쳐 획득된 성분임을 지시한다.

함평분지에 분포하는 시료에 대하여 자화강도가 1 mA/m 이하가 될 때까지 열소자를 실시하였다. 함평분지 퇴적암 중 하양층군과 대비되는 자색 사질암 지역에서 채취한 시료의 하나인 HP1-14-2는 열소자 시 약 450°C에서 680°C까지 일정한 단일 성분의 방향을 나타내고 있는 것이 관찰되었다(Fig. 6a). 자화강도 역시 680°C까지 일정하게 감소된 후 680°C에서 급격히 감소하는 것이 관찰되었으며 이는 주자성광물이 주로 적철석인 것으로 해석할 수 있다. 자색 사질암 지역에서 채취한 또 다른 시료(HP1-1-7)의 소자양상은 450°C에

서 580°C구간에서 일정한 방향의 특성잔류자화방향으로 관찰되며 600°C 이상에서는 자화강도가 자연잔류자화강도의 10% 이하로 낮아지면서 불규칙한 방향을 나타내었다(Fig 6b). 이러한 열소자양상은 특성잔류자화 방향이 주로 자철석에 의해 기록된 것으로 해석하였다. 함평분지에 분포하는 암석에 대한 고지자기 연구결과는 Table 2에 정리하였다. 고지자기 실험결과 20개 지점의 평균 중에서 방향의 집중도가 있다고 판단되어지는 신뢰도(α_{95})가 30° 이하인 지점의 평균 특성잔류자화 방향들의 평균을 함평분지 퇴적암의 평균 특성잔류자화 방향으로 사용하였다. 평균방향계산에 사용된 지점은 1, 3, 5, 12, 14, 21(자색사질암)과 2, 7, 9(녹색사질암)로 구분이 된다. 함평분지 퇴적암의 평균방향은 경사보정 전이 $D/I=18.3/62.5^\circ$ ($k=14.1$, $\alpha_{95}=14.2^\circ$)이며 경사보정 후의 방향은 $D/I=32.5^\circ/55.4^\circ$ ($k=35.6$, $\alpha_{95}=8.7^\circ$)로서 경사보정 후의 방향의 정밀도와 신뢰도가 향상되었다. 이것은 함평분지 퇴적암에 기록된 특성잔류자화가 퇴적당시에 자화방향을 획득했음을 의미한다. 함평분지 퇴적암의 경사보정 후의 방향을 사용하여 각 지점의 극의 위치를 계산하였으며 이들의 평균으로부터 계산한 고지자기극의 위치는 $Lat./Long.=63.9^\circ N/202.7^\circ E$ ($K=21.3$, $A_{95}=7.6^\circ$)이다.

함평분지 퇴적암의 경사보정 후의 고지자기극의 위

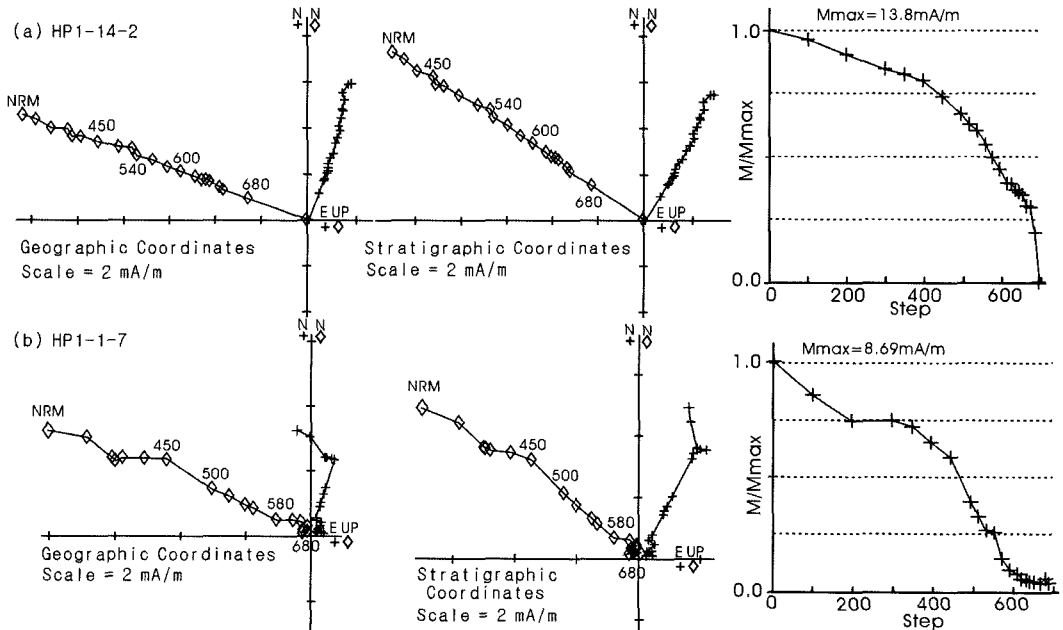


Fig. 6. Representative demagnetization results of the well behaved sedimentary rock samples from the Hampyeong Basin. Zijderveld diagrams in geographic and stratigraphic coordinates, and normalized intensity curve of (a) HP1-14-2 and (b) HP1-1-7.

Table 2. Palcomagnetic results of the Cretaceous sedimentary rocks from the Hampyeong Basin.

Site (HP)	n/N	Dg(°)	Ig(°)	Ds(°)	Is(°)	k	α_{95}	VGP		dp	dm
								Long.	Lat.		
1-01	8/15	29.2	65.4	35.0	45.0	84.6	6.1	222.6	58.9	4.9	7.7
1-02	8/8	281.2	65.9	358.7	73.8	8.0	20.9	125.0	65.2	33.9	37.6
1-03	8/14	35.1	85.8	46.8	54.5	44.3	8.4	202.6	52.0	8.4	11.8
1-04*	6/9	248.2	80.0	187.3	83.6	7.4	26.5	124.9	22.5	51.1	52.0
1-05	4/8	22.7	51.2	12.4	44.2	16.4	23.4	253.8	76.0	18.4	29.4
1-06*	8/10	291.2	53.1	299.3	59.4	3.7	33.4	61.8	42.6	37.6	50.1
1-07	4/6	54.8	44.2	53.0	57.2	46.1	13.7	196.6	47.8	14.6	20.0
1-08*	5/6	25.4	52.8	7.1	65.0	7.1	30.9	148.4	76.9	40.2	49.9
1-09	6/9	15.8	35.4	21.4	45.6	6.5	28.5	234.3	70.0	23.1	36.3
1-11*	0/4	13.3	77.5	60.9	67.7	2.0	142.8	177.2	44.1	199.4	238.7
1-12	6/9	359.1	67.2	53.3	53.2	19.3	15.7	202.4	46.5	15.1	21.8
1-13*	4/5	9.4	41.3	4.0	27.6	4.7	47.3	295.6	69.3	28.2	51.6
1-14	3/5	18.0	58.7	35.1	53.7	148.5	10.2	208.0	61.3	9.9	14.2
1-18*	3/3	180.3	71.8	207.4	71.9	2.5	104	112.0	4.7	161.3	183.2
1-20*	5/8	33.9	37.3	19.6	51.8	7.6	29.6	217.1	73.6	27.6	40.4
1-21	7/10	18.1	55.9	23.8	62.1	8.1	22.6	185.2	69.9	27.3	35.1
Mean	9	18.3	62.5			14.1	14.2			K = 21.3	
				32.5	55.4	35.6	8.7	202.7	63.9	A ₉₅ = 7.6	

n/N: number of samples used in average/measured; Dg and Ig: declination and inclination in geographic coordinates; Ds and Is: declination and inclination in stratigraphic coordinates; k: Fisherian precision parameter; α_{95} : radius of cone of 95% confidence interval. *: Site not used in calculation of mean.

치를 부여분지와 마찬가지로 한반도의 백악기의 결과 (Park *et al.*, 2005) 및 유라시아대륙의 위자극이동곡선 (Besse and Courtillot, 1991)과 비교하였다(Fig. 5). 함평분지 퇴적암의 고지자기극의 위치는 한반도 후기 백악기(K₂)의 극의 위치(Lat./Long.=59.6°N/194.7°E, A₉₅=4.6°, Park *et al.*, 2005)와 상호 95% 신뢰도 범위 내에 포함되고 있으므로 이 두 개의 극은 통계적으로 같다고 해석된다. 따라서 함평분지 퇴적암은 후기 백악기에 형성됨과 함께 기록된 1차 자화를 기록하고 있다고 해석하였다. 함평분지의 생성시기에 관하여는 한국지질자원연구원에서 발행한 함평지질도에서는 백악기 중기(K₂)로 정의하였고(Hwang *et al.*, 2002), 함평퇴적분지의 고퇴적환경 연구(You *et al.*, 2000)에서는 후기 백악기인 경상분지 유천층군과 잘 대비된다고 하였으나 층서 대비와 화산성 기원퇴적물 그리고 화석을 근거로 하여 퇴적층의 형성시기를 Aptian/Albian 또는 이보다 신기 지층으로 해석하였다. 따라서 함평분지 퇴적암은 분지의 형성과 더불어 백악기 중기에서 후기에 걸쳐 퇴적된 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서 추출한 함평분지 퇴적암에 기록된 특성잔류자화 방향과 극의 위치는 함평분지 퇴적암의 형성시기를 충실히 반영한 것으로 판단하였다.

4.3. 함평분지 화산암

함평분지에 분포하는 백악기 화산암의 자연잔류자화 강도는 0.92~3340 mA/m로서 다양한 값을 보이며, 평균 자연잔류자화 방향은 정자화 방향과 역자화 방향이 관찰된다. 정자화 방향은 D/I=19.2°/66.6° (k=4.4, α_{95} =5.7°)이며 역자화 방향은 D/I=154.6°/-71.0° (k=2.0, α_{95} =20.8°)로써 한반도의 평균 지구축 쌍극 자기장 방향(D/I=0°/56.5°)과는 다르게 나타난다(Fig. 3c).

함평분지 화산암의 정자화 방향과 역자화 방향은 단계별 소자를 통하여 확인되었으며 일반적으로 정자화 방향은 400°C~600°C 범위에서, 역자화 방향은 600°C~680°C 범위에서 분리되는 양상을 나타내고 있다. 정자화 방향을 나타내는 시료 중에는 자연잔류자화 방향에서부터 적철석의 큐리온도인 680°C까지 단일 성분을 기록하고 있는 경우(Fig. 7a)와 자철석의 큐리온도인 580°C까지는 소자단계에 따라 원점을 향해 감소하다가 600°C 이상에서는 불규칙한 변화를 하는 시료가(Fig. 7b) 관찰되었다. 후자의 경우에는 580°C 근처에서 자화강도가 자연잔류자화 강도의 5% 미만으로 감소하는 경향을 보이며 소자단계의 증가에 따라 자화 강도가 다시 증가하기도 함으로써 열소자에 따른 암석의 화학적 변질을 지시하기도 하였다(Fig. 7b). 시료 채취지점

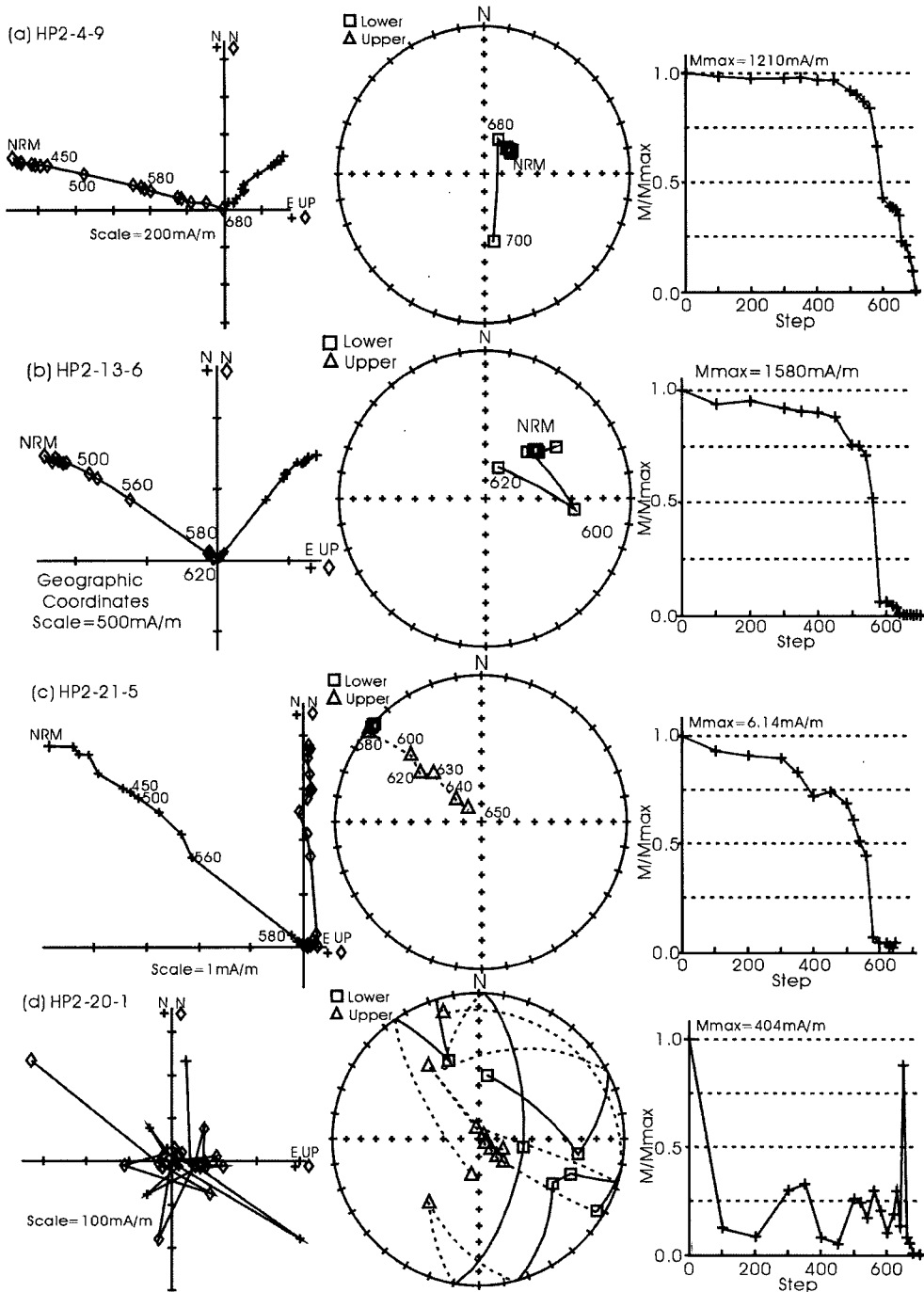


Fig. 7. Representative demagnetization results of the well behaved volcanic rock samples from the Hampyeong Basin. Zijderveld diagrams in geographic coordinates, stereographs, and normalized intensity curves of (a) HP2-4-9 and (b) HP2-13-6 revealing one component up to 680°C and 580°C, respectively. (c) Example of well behaved sample yielding a meaningless direction. Site mean cannot be obtained due to almost random distribution of directions for site HP2-21-5. (d) Demagnetization results of sample HP2-20-1, showing large variations of directions in each demagnetization step despite high intensity.

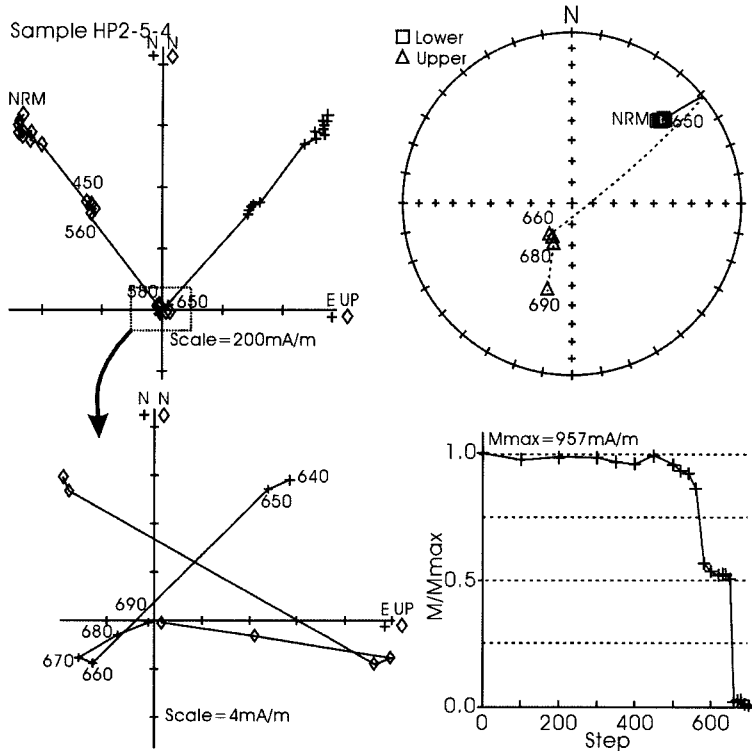


Fig. 8. Demagnetization results of the sample HP2-5-4 from the Hampyeong Basin showing low-temperature normal direction and high-temperature reversed direction. Zijderveld diagrams and stereograph in geographic coordinates and a normalized intensity curve are shown.

HP2-21의 경우에는 열소자의 진행에 따라 시료의 자화강도가 원점을 향해 감소하며 단일 성분의 방향을 나타내나 각각의 시료가 나타내는 방향이 시료 채취지점의 평균을 산출하지 못할 정도의 산발된 자화 방향을 보임으로써 특성잔류자화 방향 결정을 못하였다(Fig. 7c). 일부 시료는 자화강도가 약하여 저온의 소자단계에서 방향이 불규칙해짐으로써 특성잔류자화 방향의 결정이 불가능한 경우도 있었으며, 반면에 일부시료는 자화강도는 수백 mA/m로서 매우 강하나 소자단계마다 잔류자화 방향의 변화가 심하여 특성잔류자화 방향을 결정할 수 없었다(Fig. 7d). 역자화 방향을 나타내는 시료는 일반적으로 저온성분으로써의 정자화 방향과 함께 고온 성분으로써 존재하는 경우가 대부분이나, 450°C~650°C 구간에서 정자화 방향과 중첩되지 않고 단일 성분으로 나타나기도 한다. Fig. 8은 저온성분의 정자화 방향과 고온성분의 역자화 방향이 함께 확인된 대표적인 시료로써 자연잔류자화로부터 거의 640°C까지의 범위에서 정자화 방향이, 660°C~680°C 범위에서 역자화 방향이 분리되었다. 또한 시료채취지점 HP2-3

번의 경우에는 고온성분의 역자화 방향을 주성분 분석 방법으로 분리할 수는 없었지만 정자화 방향과 역자화 방향을 포함하는 대원(great circle)에 대한 한정구획(sector constraint)을 설정하여 이로부터 평균방향을 추출할 수 있었다(Fig. 9).

함평분지에 분포하는 백악기 화산암 257개의 측정된 시료 중 158개의 시료가 각 시료 채취지점의 평균방향을 계산하는데 사용되었으며, 30개 시료 채취지점 중 20개의 시료 채취지점에서는 정자화 방향이, 11개의 시료 채취지점에서는 역자화 방향이, 그리고 6개의 시료 채취지점에서는 정자화/역자화 방향이 함께 추출되었다. 평균 특성잔류자화 방향 중 정자화 방향은 Table 3에, 역자화 방향은 Table 4에 정리하였다. 함평분지에 분포하는 백악기 화산암의 경우 지층경사 보정을 위한 총리면의 확인이 야외에서 불가능하였으므로 특성잔류자화 방향은 경사보정을 하지 않은 값을 사용하였다. 정자화 방향을 나타내는 20개의 시료 채취지점 중 14개 지점에서 추출된 평균방향은 $D/I=25.5^{\circ}/56.5^{\circ}$ ($k=29.1$, $\alpha_{95}=7.5^{\circ}$, Table 3)이며, 역자화 방향을 나타내

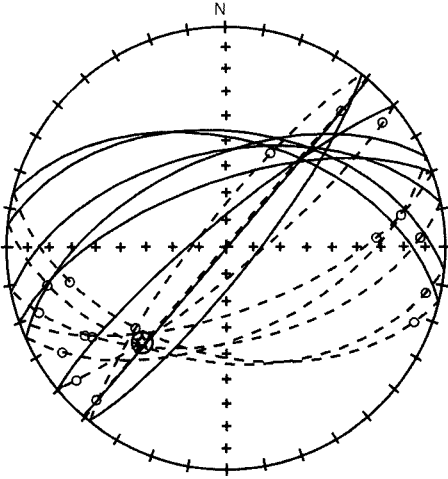


Fig. 9. Reversed mean direction (open star) of the volcanic rocks from the Hambyeong Basin, determined using great circles with sector constraints for site HP2-3, with 95 percent confidence limit.

는 11개 시료 채취지점 중 9개 지점의 평균 특성잔류자화 방향은 $D/I=124.1^{\circ}/69.2^{\circ}$ ($k=13.3$, $\alpha_{95}=14.6^{\circ}$, Table 4)로 계산되었다. 또한 시료 채취지점 HP2-3번에서 대원에 대한 한정구획법을 이용하여 결정한 평균 방향은 $D/I=221.9^{\circ}/41.8^{\circ}$ ($k=229.2$, $\alpha_{95}=3.9^{\circ}$, Table 4)로 계산되었으며 이는 주성분 분석법에 의해 결정된 역자화 방향과는 다르게 나타났다(Fig. 10a). 정자화와 역자화 방향에 대응하는 고지자기극의 위치는 각 지점의 극의 위치의 평균으로서 계산하였으며(Table 3 and 4) 정자극과 역자극에 해당하는 극의 위치는 각각 Lat./Long.= $70.2^{\circ}N/199.5^{\circ}E$ ($K=18.1$, $A_{95}=9.6^{\circ}$)과 Lat./Long.= $65.5^{\circ}S/251.3^{\circ}E$ ($K=7.1$, $A_{95}=20.7^{\circ}$)이다. 더불어 대원법에 의해 계산된 역자화 방향에 대해 계산된 고지자기극의 위치는 Lat./Long.= $52.5^{\circ}S/41.9^{\circ}E$ ($dp=4.8^{\circ}$, $dm=2.9^{\circ}$)이며 이들 극의 위치는 Fig. 10b와 c에 도시하였다.

Table 3. Paleomagnetic results of the Cretaceous volcanic rocks from the Hambyeong Basin revealing normal directions.

Site (HP)	n/N	Geographic coordinates				VGP		dp	dm
		D ($^{\circ}$)	I ($^{\circ}$)	k	α_{95} ($^{\circ}$)	Long.	Lat.		
1-10	7/8	21.3	64.9	12.9	17.4	173.6	70.1	22.6	28.0
1-15*	4/7	34.1	55.8	3.3	59.8	204.0	62.4	61.4	85.7
1-22*	3/7	48.8	61.9	14.6	33.5	189.4	51.8	40.2	51.9
1-23*	4/8	44.4	39.5	6.2	40.1	222.6	49.4	28.8	48.0
2-03	8/9	41.3	39.1	87.3	6.0	225.2	51.8	4.3	7.2
2-04	7/9	331.3	70.8	171.7	4.6	91.2	61.8	6.9	8.0
2-06	5/7	8.0	65.9	97.2	7.8	148.5	75.6	10.4	12.7
2-09	11/12	6.8	55.5	76.8	5.3	204.8	84.4	5.4	7.6
2-10*	5/9	352.9	85.3	8.2	28.3	125.0	44.3	55.5	56.0
2-12*	5/8	157.5	16.4	55.3	10.4	157.0	-41.6	5.5	10.7
2-13	8/9	29.1	54.0	53.7	5.3	209.5	66.2	5.2	7.4
2-14	7/8	27.8	48.9	241.6	2.6	221.5	66.0	2.3	3.4
2-15	5/8	11.7	56.5	54.1	10.5	201.7	80.4	11.0	15.2
2-16	3/9	14.7	62.1	56.6	16.6	176.3	76.0	19.9	25.6
2-17*	7/9	51.8	15.0	86.2	6.5	234.0	35.3	3.4	6.7
2-18	8/9	19.9	62.3	128.9	4.9	181.7	72.5	5.9	7.6
2-19*	3/5	65.4	32.6	69.2	14.9	215.2	30.0	9.5	16.8
2-20	7/8	71.0	61.7	208.2	4.2	185.3	35.9	5.0	6.5
2-22	6/8	37.3	35.4	181.6	5.0	232.0	53.7	3.3	5.8
2-23*	7/9	13.8	32.6	7.2	24.2	267.8	68.8	15.5	27.4
2-24*	4/9	84.3	44.3	7.4	36.4	197.6	19.0	28.7	45.7
2-25	4/8	28.5	50.2	29.7	17.1	218.3	65.8	15.3	22.9
2-26	7/8	30.3	43.9	42.9	9.4	228.2	62.3	7.4	11.8
Normal Mean	14 Sites	25.5	56.5	29.1	7.5	199.5	70.2	K=18.1	$A_{95}=9.6^{\circ}$

n/N: number of samples used in averaged/measured; D and I: declination and inclination in geographic coordinates; k: Fisherian precision parameter; α_{95} : radius of cone of 95% confidence interval; dp: the semi axis of the confidence ellipse along the great-circle path from site to pole; dm: the semi axis of the confidence ellipse perpendicular to that great-circle path. *: Site not used in calculation of mean.

Table 4. Paleomagnetic results of the Cretaceous volcanic rocks in the Hampyeong Basin revealing reversed directions.

Site (HP)	N/No	Geographic coordinates				VGP		dp	dm
		D (°)	I (°)	k	α_{95} (°)	Long.	Lat.		
2-01	8/11	132.5	-58.5	3.3	36.4	237.5	-52.3	40.0	54.0
2-02	5/9	150.3	-59.9	8.9	27.1	239.3	-66.0	30.9	40.9
2-05	5/11	195.9	-73.5	28.4	14.6	324.5	-63.6	23.5	26.2
2-07	5/7	135.6	-39.3	13.7	21.4	210.5	-49.4	15.3	25.6
2-08*	12/12	283.4	-11.2	2.2	39.4	24.2	7.6	20.3	40.0
2-11	4/8	152.1	-40.3	28.3	17.6	197.5	-62.9	12.8	21.2
2-14	4/8	203.5	-52.4	39.3	14.7	36.1	-70.5	14.0	20.3
2-16	5/9	179.3	-63.0	29.8	14.3	303.5	-80.7	17.7	22.5
2-17*	4/9	256.2	-30.7	24.7	18.8	30.4	-20.5	11.7	21.0
2-22	7/8	86.9	-81.3	32.9	10.7	286.3	-32.5	20.0	20.7
2-24	5/9	102.6	-51.1	9.7	25.9	238.0	-27.0	23.7	35.1
Reversal Mean	9 sites	124.1	-69.2	13.3	14.6	251.3	-65.5	K=7.1	$A_{95}=20.7^\circ$
03 Great circles	9/9	221.9	-41.8	229.2	3.9	41.9	-52.5	4.8	2.9

Notations are same as Table 3. 03 Great circles: directions determined using the sector constraints method for samples from site HP2-3. *: Site not used in calculation of mean.

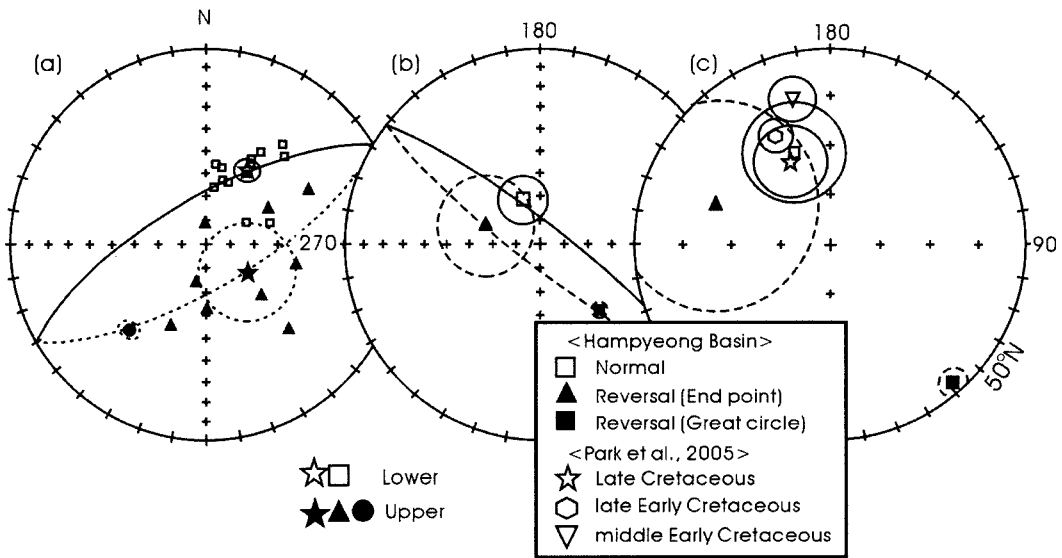


Fig. 10. Mean normal (open star) and reversed (solid star and circle) directions (a) and corresponding paleomagnetic poles (b and c) of the volcanic rocks from the Hampyeong Basin. Both reversed directions determined using end points (solid star) and great circles (solid circle) are not exactly antipodal to the normal direction (open star).

암석 시료의 특성잔류자화를 기록하고 있는 자성광물의 종류를 판별하기 위하여 함평분지 화산암의 대표 시료에 대하여 등온잔류자화 획득실험을 수행하였다. 250~300 mT의 자기장에서 포화잔류자화의 90% 이상을 획득함으로써 자철석과 같은 페리자성광물이 주요 자성광물임을 나타내는 시료와 최대 자기장인 2.5T에 이르기까지 계속하여 자화 강도가 증가함으로써 시료

내에 페리자성물질 뿐만 아니라 적철석과 같은 반강자성광물이 다량 들어있음을 보여주는 경우도 관찰되었다(Fig. 11).

함평분지에 분포하는 백악기 화산암 14개 지점에서 구한 정자화 방향(D/I=25.5°/55.5°, k=29.1, $\alpha_{95}=7.5^\circ$, Table 3)은 통계적으로 인정할 만한 정밀도와 신뢰도를 나타내므로 시료에 기록된 특성잔류자화 방향을 성공

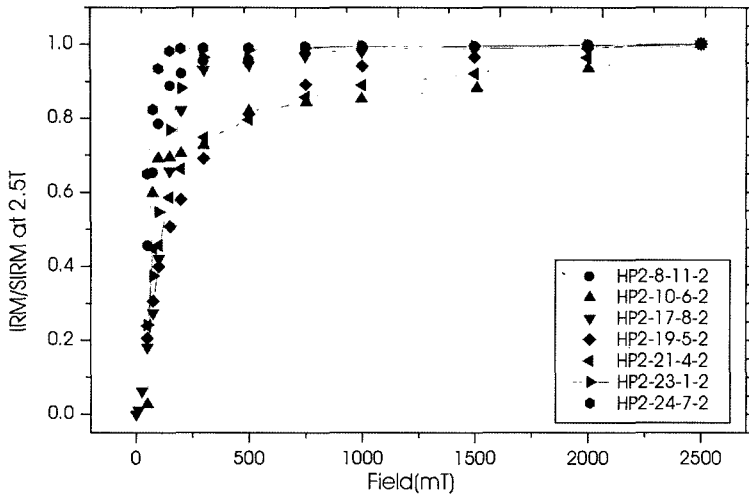


Fig. 11. IRM acquisition curves of representative samples of the Cretaceous volcanic rocks from the Hampyeong Basin.

적으로 분리/추출한 것으로 판단된다. 따라서 이 정자화 방향을 함평분지의 대표적인 특성잔류자화 방향으로 해석하였다. 반면에 9개 지점에서 주성분분석법으로 결정된 역자화 방향($D/I=124.1^{\circ}/69.2^{\circ}$, $k=13.3$, $\alpha_{95}=14.6^{\circ}$, Table 4)의 정밀도와 신뢰도가 불량하게 나타나며, 한정구획법을 이용해 결정된 역자화 방향($D/I=221.9^{\circ}/41.8^{\circ}$, $k=229.2$, $\alpha_{95}=3.9^{\circ}$, Table 4)의 통계치는 양호하나 한 개의 지점에만 국한된다. 또한 두 개의 역자화 방향은 모두 정자화 방향과는 정반대(antipodal)의 방향을 나타내지는 않고 있다(Fig. 10b and c). 이와 같은 결과는 역자화 방향과 정자화 방향의 불완전한 분리에 의한 결과일 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 두 개의 역자화 방향 중 어느 한 방향을, 또는 두 방향 모두를 함평분지에 분포하는 화산암에 기록된 백악기의 역자화 방향으로 단정하기에는 모호한 점이 있다고 판단하였다. 그러나 많은 개수의 암석시료에서 역자화 방향의 존재가 확인되었고 두 개의 성분을 갖는 시료에서 분리 확인된 정자화 방향의 정밀도와 신뢰도가 우수하게 나타나고 있다. 또한 자철석이 주요 자성광물이며 시료에 따라 적철석의 함량이 변화하는 것을 보여주는 등온잔류자화 실험 결과(Fig. 11)와 일반적으로 저온성분은 정자화 방향을 고온성분은 역자화 방향을 나타내는 소자 양상(Fig. 8) 및 단일 성분인 경우에는 자성광물의 종류에 관계없이 역자화 또는 정자화 방향이 기록된 점을 보면 본 연구에서 확인된 역자화 방향은 적어도 백악기 화산암 형성 당시 암석에 기록된 성분으로써 당시 지구자기장의 상태를 기록한 것으로 해석할 수 있다.

상기 세 개의 방향으로 부터 계산한 고지자기극의 위치는 정자극의 경우는 $Lat./Long.=70.2^{\circ}N/199.5^{\circ}E$ ($K=18.1$, $A_{95}=9.6^{\circ}$)이며, 주성분 분석법에 의해 결정된 역자화 방향에 대한 고지자기극의 위치는 $Lat./Long.=65.5^{\circ}S/251.3^{\circ}E$ ($K=7.1$, $A_{95}=20.7^{\circ}$)이며, 한정구획법으로 결정된 역자화 방향에 대한 고지자기극의 위치는 $Lat./Long.=52.5^{\circ}S/41.9^{\circ}E$ ($dp=4.8^{\circ}$, $dm=2.9^{\circ}$)이다(Fig. 10b and c). 본 연구에서 결정된 하나의 정자극과 두 개의 역자극의 위치는 하나의 대원 상에 분포함을 알 수 있다(Fig. 10b). 이는 세 개의 고지자기극이 서로 연관된 것으로서 시료채취 지점을 포함하는 지역의 구조운동이나 노두의 국지적인 변화에 의한 결과가 아니라 지구자기장의 역전과 같은 지구자기장의 변화를 나타내고 있음을 지지한다. 함평분지 백악기 화산암에서 계산된 고지자기극의 위치를 한반도의 대표적인 백악기 극의 위치(Park *et al.*, 2005)와 비교하였다(Fig. 10c). 함평분지 화산암의 극의 위치는 한반도의 후기 백악기 극의 위치와 상호 95% 신뢰도 범위 내에 포함됨으로써 통계적으로 같은 것임을 나타내는 반면, 전기 백악기(middle/late Early Cretaceous)와는 95% 신뢰도 범위의 일부만이 공유됨으로써 서로의 위치가 다르지 않음을 나타낸다. 한편 전기백악기(144-99 Ma)와 후기 백악기(99-65 Ma) 사이의 118-83 Ma에 해당하는 시기는 정자극기만 지속된 백악기 정자극성 슈퍼크론(Cretaceous Normal-polarity Superchron)이므로 정자극과 역자극을 기록하는 함평분지 화산암은 백악기 정자극성 슈퍼크론 이전 또는 이후에 형성되었어야 한다. 함평분지의 백악기 지층들은 하양층군 및 유

천층군에 대비되고 퇴적 시기는 경상분지 발달의 중기 후기에 해당되며(Geological Society of Korea, 1999), 특히 함평분지 화산암류들은 후기 백악기의 유천층군에 대비된다. 따라서 함평분지 화산암에서 확인되는 정자극과 역자극은 백악기 정자극성 슈퍼크론 이후의 기록이어야 하므로 함평분지 화산암의 형성 시기를 후기 백악기로 해석하였다. 그러나 함평분지 화산암의 고지자기 극의 위치는 의성분지, 공주분지, 능주분지에 분포하는 후기 백악기 화산암의 극의 위치와는 상이하게 나타나고 있으므로 본 연구의 측정 결과에 대한 세심한 재해석과 함께 각 분지의 지구조적 특성과 연계한 체계적인 고찰이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

부여, 함평분지에 분포하는 백악기 암석에 대한 고지자기 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 백악기 퇴적분지인 충남 부여분지의 13개 지점의 120개 시료에 대한 고지자기 연구 결과 경사보정 전의 고지자기극의 위치는 Lat./Long.=81.6°N/106.9°E (K=25.1, A_{95} =9.3°)이며 이것은 유라시아대륙 제3기의 고지자기 극의 위치와 유사하다. 반면에 경사보정 후의 고지자기극의 위치는 Lat./Long.=69.3°N/186.7°E (K=11.6, A_{95} =14.0°)로서 한반도 후기 백악기 고지자기극과 유사하다. 부여분지 퇴적암의 고지자기 방향은 경사보정전의 방향이 경사보정후의 방향보다 더 집중됨으로 습곡 이후 재자화된 것으로 볼 수 있으나, 경사보정후의 방향의 정밀도(k)와 신뢰도(α_{95})가 경사보정 전의 값과 비교하여 신뢰할 수 있는 통계학적으로 여전히 양호한 값이며 경사보정 후의 극의 위치가 한반도 후기 백악기의 극의 위치와 유사한 점 때문에 부여분지의 재자화 여부의 결정은 유보하였다.

2. 백악기 퇴적분지인 전남 함평분지 16개 지점의 129개 시료에 대한 고지자기 연구 결과 경사보정 후의 자화방향이 적게 분산된 것은 퇴적당시에 기록된 특성 잔류자화 방향이 비교적 잘 추출되었다는 것을 의미한다. 경사보정 후의 고지자기극의 위치는 Lat./Long.=63.9°N/202.7°E (K=21.3, A_{95} =7.6°)이며 이것은 한반도의 후기백악기의 고지자기 극의 위치와 통계학적으로 일치하는 것으로 함평분지 퇴적암의 형성 시기는 후기 백악기임을 지시한다.

3. 함평분지에 분포하는 백악기 화산암류 30개의 지점에서 채취한 276개의 시료에 대하여 고지자기 실험을 실시한 결과 한 개의 정자화 방향과 두 개의 역자화

방향이 확인되었다. 이들의 특성잔류자화 방향은 백악기 화산암 형성 당시 암석에 기록된 성분으로써 당시 지구자기장의 상태를 기록한 것으로 해석하였으며, 이중 정자화 방향을 함평분지 화산암의 대표 방향으로 결정하였다. 상기 세 개의 방향으로 부터 계산한 고지자기극의 위치는 정자극의 경우는 Lat./Long.=70.2°N/199.5°E(K=18.1, A_{95} =9.6°)이며, 역자화 방향에 대한 고지자기극의 위치는 Lat./Long.=65.5°S/251.3°E (K=7.1, A_{95} =20.7°)와 Lat./Long.=52.5°S/41.9°E (dp=4.8°, dm=2.9°)이다. 함평분지 화산암의 극의 위치를 한반도의 대표적인 백악기 극의 위치와 비교한 결과 후기 백악기 극의 위치와 통계적으로 동일함으로 함평분지 화산암의 형성 시기를 후기 백악기로 해석하였다.

사 사

본 논문은 2003년도 한국과학재단의 지역대학우수과 학자 지원연구(과제번호 R05-2003-000-11691-0)에 의하여 연구되었다. 이 논문의 완성도를 높이기 위하여 세심하고 건설적인 의견을 제시해주신 심사위원회 감사드린다.

참고문헌

- Besse, J. and Courtillot, V. (1991) Revised and synthetic polar wander paths of the African, Eurasian, North American and Indian plates, and true polar wander since 200 Ma. *Jour. Geophys. Res.*, v.96, p.4029-4050.
- Chang, K. H. (1975) Cretaceous stratigraphy of southeast Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.11, p.1-23.
- Choi, Y.S. (1996) Structural evolution of the Cretaceous Eumseong Basin, Korea. Ph.D. thesis, Seoul National Univ., 158p.
- Chun, S. S. (1989) Sedimentary processes, depositional environments, and tectonic settings of the Cretaceous Uhangri Formation, Southwest Korea. Ph.D. thesis, Seoul National Univ., 328p.
- Chun, S.S. and Chough, S.K. (1992) Tectonic history of Cretaceous sedimentary basins in the southwestern Korean Peninsula and Yellow Sea. In Chough, S.K. (ed.) *Sedimentary basins in the Korean Peninsula and adjacent seas*. Hanlim Pub., Seoul, p.60-76.
- Chun, H.Y., Choi, Y.S., Choi, S.J., Kim, Y.B., Kim, B.C., Lee, B.S. and Bong, P.Y. (1994) Fossil floral and faunal assemblages and paleoenvironmental modelling study on the Cretaceous sedimentary basins scattered in/near the Ogcheon belt(). KR-94(T)-11, KIGAM, 101p.
- Doh, S.J., Hwang, C.S. and Kim, K.H., (1994) A palaeomagnetic study of sedimentary rocks from Gyeongsang Supergroup in Milyang Sub-Basin. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.211-228.
- Doh, S.J., Cho, Y.Y. and Suk, D. (1996) Remagnetization

- of the Cretaceous sedimentary rocks in the Yeongdong Basin. *Econ. Environ. Geol.*, v.29, p.193-206.
- Doh, S.J., Suk, D. and Kim, B.C. (1999a) Paleomagnetism of the Cretaceous sedimentary rocks in the Yeongyang Sub-Basin. *Econ. Environ. Geol.* v.32, p.189-201.
- Doh, S.J., Suk, D. and Kim, B.Y. (1999b) Paleomagnetic and rock-magnetic studies of Cretaceous rocks in the Eumseong Basin, Korea. *Earth Planets Space*, v.51, p.337-349.
- Doh, S.-J., Kim, W., Suk, D., Park, Y.-H. and Cheong, D. (2002) Paleomagnetic and rock-magnetic studies of Cretaceous rocks in the Gongju Basin, Korea: Implication of clockwise rotation. *Geophys. J. Int.*, v.150, p.737-752.
- Fisher, R.A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*, A217, p.295-305.
- Geological Society of Korea (1999) The geology of Korea. Sigma Press, Seoul, 802p.
- Hwang, J.H., Kim, B.C., Kee, W.S., Song, G.Y. and Lee, S.R. (2002) Geological report of the Ham-Pyeong sheet (1:25,000). KIGAM, 58p.
- Jung, S.W. (1987) A structural study of the northern part of a Cretaceous basin in Jeungpyeong-Eumseong area. M.S. thesis, Seoul National Univ., 68p.
- Kim, B. C. (1996) Sequential development of depositional systems in a strike-slip basin: Southern part of the Cretaceous Yongdong basin, Korea. Ph.D. thesis, Yonsei Univ., 336p
- Kim, K.H. and Noh, B.S. (1993) Palaeomagnetic study of the Cretaceous rocks in the Okchon Belt: Palaeomagnetism of the sedimentary rocks in the Neungju Basin. *Jour. Korean Earth Sci. Soc.* v.14, p.44-57.
- Kim, I.S., Lee, H.K., Yun, H.S. and Kang, H.C. (1993) Paleomagnetism of Cretaceous rocks in the Uiseong area, Kyongsang basin, Korea. *Jour. Korea Inst. Mining Geol.*, v.26, p.403-420.
- Kim, J.H., Lee, J.Y. and Kee, W.S. (1994) Structural evolution of the Cretaceous Puyeo Basin, Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.30, p.182-192.
- Kirschvink, J.L. (1980) The least squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, v.62, p.669-718.
- Lee, H.G (1986) Structural analysis of the Gong-ju pull-apart Basin, Korea. M.S.. thesis, Seoul National Univ., 80p.
- Lee, J.Y. (1990) Structural evolution of the Gongju Basin. Ph.D. thesis, Seoul National Univ., 219p.
- Lee, Y.Y. (1992) Stratigraphy, depositional environments, and evolution of the Cretaceous Chinan Basin. Ph.D. thesis, Seoul National Univ., 287p.
- Lee, D.W. and Paik, K.H. (1990) Evolution of strike-slip fault controlled Cretaceous Yongdong Basin, South Korea: Signs of strike-slip tectonics during infilling. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 26, p.257-276.
- Lim, M.T., Lee, Y.S., Kang, H.C., Kim, J.Y. and Park, I.H. (2001) Paleomagnetic study on Cretaceous rocks in Haenam area. *Econ. Environ. Geol.*, v.34, p.119-131.
- McFadden, P.L. and McElhinny, M.W. (1988) The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v.87, p.161-172.
- Park, Y.H. and Doh, S.J., (2004) Paleomagnetic and rock-magnetic studies of the Cretaceous sedimentary rocks in the Poongam Basin. *Econ. Environ. Geol.* v.37, p.195-206.
- Park, Y.H., Doh, S.J., Ryu, I.C., and Suk, D. (2005) A synthesis of Cretaceous palaeomagnetic data from South Korea: Tectonic implications in East Asia. *Geophys. Jour. Int.*, v.162, p.709-724.
- Shimamura, S. (1931) Geological report of the Buyeo sheet (1:50,000), Geological Survey of Joseon.
- Suk, D. and Doh, S.J. (1996) Palaeomagnetism of the Cretaceous rocks in Eumseong area Revisited. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.32, p.47-64.
- You, H.S., Paul K., Koh, Y.K., Yun, S.T., Kim, J.Y., Kim, H.G., Chung, C.H. and Ryu, S.O. (2000) Palaeodepositional environment of the Cretaceous Hampyeong Basin, Southwestern Korea. *Jour. Korean Earth Sci. Soc.*, v.21, p.683-694.
- Zijderveld, J. (1967) A.C. demagnetization of rocks: Analysis of results In Collinson, D.W., Creer, K.M. and Runcorn, S.K.(eds.) *Method in Paleomagnetism*. Elsevier, London, 254-286p.