

## 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구\*: 3. 정자-울산분지와 그 일원

손 문\*\* · 강희철\*\* · 김인수\*\*

## Palaeomagnetism of Tertiary Basins in Southern Korea\*: 3. Chongja-Ulsan Basins and its Vicinities

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

**ABSTRACT** : A total of 460 palaeomagnetic samples was collected from the Tertiary Chongja-Ulsan basins and surrounding area in the southeastern part of Korean peninsula. All samples were stepwise demagnetized by either alternating field or thermal method. It was found that most sample-sites have ChRM declination which has been rotated clockwise from the north-south reference direction of Tertiary East Asia, although other two extrusive sample-sites within the Chongja sedimentary basin show counterclockwise rotation of ChRM declination. Fold tests for the site-mean ChRMs of the latter two sites reveal insignificant result and negative result with 95% confidence level, respectively. The amount of the clockwise deflection of declination varies from about 20° upto about 80° according to the block to which each sample-site belongs. The amount of the counterclockwise deflection is about 20°. It is concluded that the clockwise ChRM rotation has been caused by dextral simple shearing accompanied by NNW-SSE spreading of the East Sea which has been active until about 16Ma, and that the counterclockwise rotation is a result of sinistral simple shearing associated with WNW-ESE contraction in the Korean Strait-SW Japan region at about 15 Ma.

### 서 론

1980년대 후반기에 들어 남한 제3기 분지 지역에 대한 본격적인 고자기 연구가 시작된 이래(Kim *et al.*, 1986; 김인수, 강희철, 1989; Han, 1989) 많은 사람들에 의해 유사하거나 보완적인 연구가 지속되어 왔다 (김광호 등, 1993; 민경덕 등, 1994; Kikawa *et al.*, 1994; 김광호, 도성재, 1994; 김광호 등, 1994). 이렇듯 제3기 분지 지역이 여러 고자기 연구자들에게 특별한 관심의 대상으로 부각되는 주원인은 이곳 제3기 지층의 잔류자기가 상당량 시계방향으로 편향되어 나타나기 때문이다. 우리나라의 제3기 분지들이 특이하게 동해안을 따라 발달되고 있다는 사실(김봉균, 1970)을 고려할 때, 이들 분지들에서의 잔류자기의 편향운동은 어떠한 형태로든 동해지역에서의 지체구조발달이나

東海의 成因에 깊은 관련을 가지고 있음을 인정하지 않을 수 없다(김인수, 1992). 따라서 이 잔류자기 편향의 공간적, 시간적인 범위를 파악하는 일은 제3기 분지 뿐만 아니라 동해와 그 주변지역에서의 신생대 지사를 밝히는데 중요한 자료를 확보하는 일이 될 것이다.

김인수, 강희철(1989)은 어일분지일대의 제3기 지층을 연구하고 이곳의 잔류자기가 광역적으로 평균 약 55° 시계방향으로 수평편향되어 있음을 알아내었다. 이들은 이 자료를 핏선트랙 연령측정의 결과 (진명식 등, 1988)에 결부시켜서 편향운동의 시기를 약 16 Ma 혹은 그 직후로 해석하였다. 또한 Han(1989)과 민경덕 등(1994) 그리고 Kikawa *et al.*(1994)은 이 어일분지, 그리고 보다 북쪽으로 장기반도에 이르는 광역적 잔류자기 연구를 통하여 역시 평균 약 40°의 시계방향 잔류자기 편향을 밝혀내었다. 김광호, 도성재(1994) 역시 같은 지역에서의 독립적인 연구를 통하여 20~50° 가량의 잔류자기 시계방향 편향을 확인하고 그 시기를 약 16 Ma 이전이라 하였다. 나아가서 김광호 등(1994)은 보다 북쪽의 장기반도 지역에서도 잔

\* 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음 (과제번호: 01-D-0154).

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

류자기가 20~40° 가량 시계방향으로 수평편향 되어 있다고 보고하였다.

그러나 이보다 더 북쪽에 위치한 포항분지에서는 상황이 다르게 보고되고 있다. 즉 형산강이북 포항분지내 연일층군에 대해서 고자기 연구를 실시한 김광호 등(1993)을 따르면 이곳의 제3기 연일층군에서는 잔류자기의 수평편향이 나타나지 않는다고 한다. 따라서 우리나라 제3기 분지지역에서의 잔류자기 편향 여부나 크기는 지역적으로나 층위적으로 서로 다른 것이 사실인 것 같다.

한편 김인수(1992)는 이러한 제3기 분지 지역에서 나타나는 잔류자기의 시계방향 수평편향운동은 중기 Eocene-중기 Miocene에 걸쳐서 원시 동해에서 진행되었던 북북서-남남동 방향의 해저확장운동에 관련된 것이라고 주장하였다. 즉, 이 방향으로 동해의 해저지각이 확장됨에 따라서, 육지지각과 해양지각을 가르는 선, 즉 동해안선에 평행한 東韓斷層(East Korea Fault)을 따라 右向(dextral)성의 주향이동 단층작용이 일어났고 이에 결부되어 작용되었던 우향 전단력(dextral simple shear)이 육상암석의 잔류자기를 시계방향으로 수평편향시켰다는 것이다. 이러한 해석의 옳고 그름을 가리는 것은 한반도 주변지역에서의 신생대 지구조운동의 본질을 밝히는데 매우 중요한 일이며, 이를 위해서는 동해안에 연결한 육상지역 특히 제3기 분지 전역을 망라하는 광범위한 고자기 연구가 필요하다.

이 연구의 목적은 남한의 제3기 분지들 중에서 아직 고자기학적 연구가 이루어진 바 없는 亭子盆地와 蔚山盆地 및 그 일원으로부터 특성잔류자기 방향의 자료를 확보하고 아울러서 이 지역에서의 지구조운동의 성격을 파악하는 일이다. 앞서 설명했던 바와같이 제3기 분지 지역에 대한 기존의 고자기학적 연구들이 분지해석이나 주변지역의 지체구조발달에 대한 중요한 자료를 제공해온 것은 사실이다. 그러나 이들은 구조적인 특징이 명확히 알려지지 않은 분지에서, 주로 잔류자기의 전체적 편향량이나 편향시기를 밝히는 데에 주력한 셈이었다. 그리하여 분지를 구성하고 있는 여러 소지괴들의 공간분포와 상호운동에 관한 정보에는 별다른 관심을 기울이지 않았다. 이에 비추어 정자분지는 그 구조적 특징이 최근에 잘 조사된 곳이므로(손문, 김인수, 1994) 새로운 고자기학적 자료를 확보하여 분지 자체나 그 일원의 지구조적인 특징과 연계해보고 소지괴적 운동단위의 공간적 분포양상을 고찰해보는 것도 의의 있는 일일 것이다.

## 일반지질

연구지역의 지질에 관한 선행연구로는 박양대, 유형대

(1968)의 1:50,000 지질도 울산도폭과 Yoon(1976) 그리고 최근의 손문, 김인수(1994)가 있다. 연구대상지의 일부를 이루는 亭子盆地는 경남 울산군 강동면 일대를 점하는 약 5 km×5 km 넓이의 평행사변형 형태의 제3기 분지이다(Fig. 1). 이는 남한의 제3기 분지들 중에서 가장 남쪽에 위치하고 있다. 과거에는 이 분지를 "어일분지의 남부"(김봉균, 1970) 혹은 "울산분지 동부"(Yoon, 1976)로 부르기도 하였으나 손문, 김인수(1994)는 이 분지가 어일분지나 울산분지 등의 다른 제3기 분지들과는 분리되어 있는 독립 분지라는 견지에서 亭子盆地라는 새 이름을 부여하였다. 필자들의 정밀 야외지질조사 결과에 의하면(손문, 김인수, 1994) 분지 북서변은 N30°E 방향의 점만/서가단층형의 정단층(山下斷層이라 명함)에 의하여, 그리고 남서변은 N20°W 방향의 우향 주향이동단층(尾浦斷層이라 명함)에 의하여 경계되어 있음이 밝혀졌다. 반면 분지의 남동변은 기반암인 백악기 울산층과 부정합의 관계를 이루고 있다. 지체구조발달사적 견지에서 볼 때 정자분지는 전형적인 半地溝型 당겨열림분지(pull-apart basin)의 특성을 갖추고 있는 구조분지이다(손문, 김인수, 1994).

연구지역에 나타나는 분지형성 이전의 암석으로는 오래된 것으로부터 열거하여 백악기 하양층군의 蔚山層과 유천층군의 大安山斑岩과 流紋岩質 石英安山岩, 그리고 제3기의 黑雲母花崗岩과 花崗斑岩이 있다. 본 연구지역의 기저를 이루고 있는 蔚山層은 대구도폭의 대구층, 그리고 마산도폭의 함안층에 대비되는 것으로 알려지고 있다(박양대, 유형대, 1968). 구성암석은 주로 녹회색 및 적색 셰일, 사암, 응회질사암 그리고 역암이다. 층리는 양호하며 대부분 주변의 화강암관입과 안산암분출의 화성활동으로 접촉변성을 받아 호온펠스화 되어 있다.

大安山斑岩은 백악기 유천층군시대 말엽에 관입 분출한 안산암류로써 양산도폭의 도대동안산암에 대비되는 것으로 간주되고 있다(박양대, 유형대, 1968). 야외노두에서는 流狀구조가 잘 관찰된다.

流紋岩質 石英安山岩은 조양도폭의 각섬석, 석영, 장식 규장암에 대비된다(박양대, 유형대 1968). 야외에서는 담회색 내지 회록색을 띠며 부분적으로는 유상층리가 관찰된다.

黑雲母花崗岩은 울산층을 암주상으로 관입하고 있으며 조립질과 세립질암체가 혼재되어 나타난다. 이윤종, 우에다(植田) (1976) 그리고 진명식 등 (1991)에 의할 때 이 화강암의 혹은도 K-Ar 방사능연령은 각각 58 Ma, 59.7±1.3 Ma으로 제3기 초에 해당된다.

연구지역의 기반암 중에서 가장 후기의 花崗斑岩은 흑

운모화강암을 관입하고 있는 것으로 보고되어 있다 (박양대, 윤행대, 1968). 암상은 육안으로도 식별 가능한 2~5 mm 정도의 석영과 장석 반정들을 다수 포함하는 반상조직을 띠는 것이 일반적 특징이다. 이에 반하여 강동면 신명리 중마을 일대 (JG site 근처, Fig. 1)의 노두에서는 조립질 반정은 전혀 나타나지 않고 유백색의 비현정질을 이루고 있음이 관찰된다.

亭子盆地내에는 하위로 부터 當舍安山岩類, 江東層 그리고 新峴層 (Yoon, 1976)이 층전되어 있으며 후자의 두 지층은 분지의 북서경계를 이루는 산하단층을 따르며 帶狀으로 분포되어 있다 (Fig. 1). 울산층을 분출 혹은 관입하고 있는 當舍安山岩類는 대부분 흐름구조가 잘 발달된 반상조직의 玄武岩質 安山岩, 그리고 이에 수반된 凝灰岩으로 구성되어 있다. 핏선트랙법과 K-Ar법에 의한 이들 화산암류들의 연령은 Early Miocene인 16~22 Ma의 범위로 나타나고 있다 (진명식 등, 1988; 이현구 등, 1992).

당사안산암류의 상위에는 하성 역암층인 江東層이 부정합으로 피복되어 있으며 이를 다시 내만성 사암층인 新峴層이 정합적으로 덮고 있다. 江東層은 주로 아원형 내지 아각형의 역으로 구성되어 있으며 이로부터 화석이 발견된 보고는 없다. 이에 반하여 주로 사암과 이암의 호층으로 이루어진 新峴層에서는 온난 천해환경을 지시하는 early Middle Miocene 연령의 *Vicarya-Anadara* 화석군집이 다량 산출되고 있다 (Yoon, 1976).

정자분지로부터 서쪽으로 무룡산 너머 울산시 동부에는 蔚山盆地로 명명된 (김봉균, 1970) 제3기 퇴적분지가 존재한다. 이 울산분지 지역의 상당부분은 군사지역으로써 민간에 개방이 되어있지 않고 지뢰매설 등의 위험한 지역이 많아 상세한 지질조사가 이루어지지 못하고 있다. 필자들이 행한 가능한 범위에서의 조사에 의하면 이 울산분지에도 정자분지에서와 같이 제3기 당사안산암류가 소규모로 나타나며 이를 부정합으로 제3기 퇴적층들이 피복하고 있다. 박양대, 윤행대 (1968)는 이 퇴적층을 정자분지의 것과 동일시하여 정자역암으로 명명한 바 있다. 그 후 김봉균 (1970)은 정자분지의 것은 어일층으로 울산분지의 것은 화봉리층으로 재명명하였다. 보다 자세한 연구가 있어야 할 것이나 필자들은 울산분지내의 퇴적층들이 역의 구성 및 암상에서 정자분지내의 강동층과 유사하다는 견지에서 江東層으로 보고자 한다. 필자들의 야외조사에 의거할 때 울산분지의 서쪽경계부는 기반암인 울산층과 부정합적 관계인 것으로 판명되었다.

한편, 울산시 효문동 동쪽 약 3 Km 지점에 위치한 322고지의 정상부에서는 층리가 잘 발달된 미고결 사암층의 존재가 발견되었다. 이 사암층에는 해성 조개와 석

물 화석들이 다량 함유되어 있음이 관찰되고 있다. 미고결인 암상이나 화석의 종류로 미루어서 이 사암층은 제3기의 지층인 것으로 생각된다. 이 산정상이 근방에서 가장 표고가 높은 곳이라는 사실은 울산분지 지역이 오랜 동안 분지로 침강되어 있다가 훗날에 다시 융기되었다는 결론을 내리도록 한다.

## 시료 채취

시료채취는 주로 강동면 31번 국도변, 1027번 지방도로변, 그리고 강동면 신명리 일대에서 이루어졌다 (Fig. 1). 강동층과 신현층은 각기 역암 및 미고결층인 관계로 시료채취의 대상에서 제외할 수 밖에 없었다. 그러나 이밖의 모든 지층들로부터는 다이아몬드 비트를 장착한 휴대용 착암기를 사용하여 노두현장에서 직경 2.5 cm, 길이 약 5 cm의 鑿孔시료들을 채취하였다. 시료의 定向은 지질조사용 나침반을 이용하여 노두현장에서 실시하였다. 지층경사 보정을 위해서는 퇴적암과 응회암질암의 경우 착공 최근접 지층면의 주향과 경사를 측정하였으며 기타 화산암의 경우에는 流狀層里 (flow layer)의 주향과 경사를 측정하였다. 그러나 화강암류 노두에서는 경사보정의 자료를 획득할 수 없었다.

이렇게 채취된 독립정향 착공시료의 숫자는 분지내부 제3기 당사안산암류의 15개 지점으로부터의 180개, 분지기반암 24개 지점으로부터의 280개에 달한다 (울산층 4개 지점 42개 시편; 유문암질 석영안산암 3개지점 27개 시편, 대안안산반암 2개 지점 26개 시편; 흑운모화강암 11개 지점 136개 시편; 화강반암 4개지점 49개 시편). 따라서 총 39개 지점에서 채취된 460개의 독립정향 시료들이 연구에 사용되었다. 시료채취지점은 Fig. 1에 표시되어 있으며 이하에는 암상등 각 지층별의 특징을 간략하게 기술한다.

## 제3기 당사안산암류

본 안산암류로부터의 시편은 모두 180개로 정자분지내의 12개 지점 (JB, JC, JD, JE, JF, JH, JI, UDT, UJJ, JBK, JBD, UKB)과 울산분지내의 3개 지점 (UTA, UTD, UWB)에서 채취되었다 (Fig. 1). 채취 시편들의 암상은 크게 현무암질 안산암 (basaltic andesite)과 암편질 응회암 (lithic tuff)으로 구분되어진다.

玄武岩質 安山岩 (JB, JC, JD, JE, JF, JI, UJJ, JBK, JBD, UTA, UTD, UWB)은 박편상에서 사장석과 휘석 반정들을 우세하게 나타내며 부분적으로는 감람석 반정들과 소량

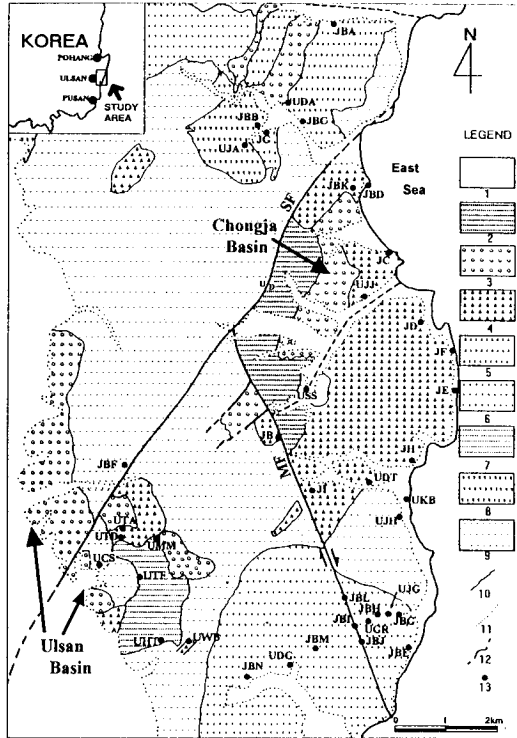


Fig. 1. Geologic (adapted from Son & Kim 1994 and Park & Yoon 1968) and sample site (Table 1) map of the study area. 1. Alluvium, 2. Sinhyon Formation, 3. Kangdong Formation, 4. Tangsa Andesites, 5. Granite Porphyry, 6. Bulgaksa Granites (Biotite granites), 7. Rhyodacite, 8. Daean Andesite, 9. Ulsan Formation, 10. Geologic boundary, 11. Inferred geologic boundary, 12. Fault, 13. Sample sites, SF: Sanha fault, MF: Mipo fault.

의 불투명광물들을 보인다. 야외 노두에서는 유상층리를 보이며 이를 따라 절리 (flow joint)가 잘 발달되어 있다.

岩片質 凝灰岩 (JH, UDT)은 주로 수 mm에서 수 cm 크기의 각형 혹은 아각형의 현무암질 안산암 암편들로 이루어져 있으며 층리의 발달이 양호하다. 부분적으로는 라펠리 이하의 세립질 응회암층을 이루기도 한다. 시료채취는 주로 세립질 응회암층, 그리고 암편을 피하면서 암편들 사이의 세립질 기질부분에서 이루어졌다.

#### 기반암류

백악기 蔚山層은 분지의 주변부를 이루며 본 연구지역에서 가장 넓은 범위를 점하고 있다. 야외 노두에서 심한 접촉열변성을 받은 특징을 보여주는데 이는 주변의 화강암류 및 당사안산암류의 화성활동에 의한 것이다. 채취된 시료는 총 42개로써 4개 지점 (UJH, USS, JBF, UCS)에

서 채취하였는데 층리가 양호한 적색 세일과 실트질 사암이 주 대상이었다.

大安安山斑岩은 정자분지의 북서부경계단층인 산하단층의 이북에 위치한 두 지점 (UJA, JBB)에서 이루어졌다. 채취된 시료수는 총 26개이다.

流紋岩質 石英安山岩은 울산분지의 기저를 이루고 있으며 산하단층의 남쪽에서 암주상으로 노출되고 있다. 모두 세지점 (UHT, UTF, UMM)에서 총 27개의 시료들이 채취되었다.

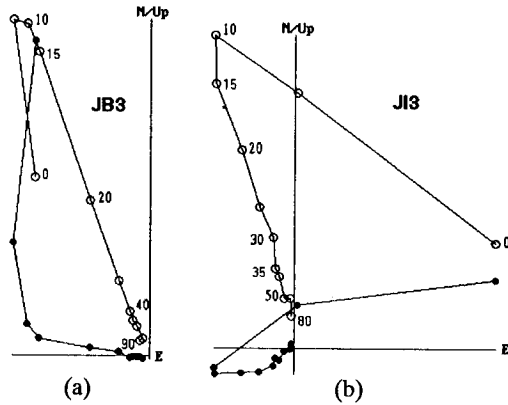
黑雲母花崗岩은 연구지역의 남쪽 일대를 점하고 있는데 우향 주향이동단층인 정자분지 남서경계단층 (미포단층)에 의해서 잘려져 있는 양상이다 (Fig. 1; 손문, 김인수, 1994). 시료채취는 주로 동서로 달리는 1027번 지방도로를 따르며 행하여졌는데 11개 지점에서 총 136개의 시료들이 채취되었다.

花崗班岩은 흑운모화강암보다 후기의 암석으로써 정자분지의 북서부경계단층 (산하단층)의 이북에 분포한다. 야외에서는 대부분 수 mm 크기의 석영과 정장석 반정들이 다량 보이나, JG지점의 것은 반정을 나타내지 않는 괴상 유백색의 비현정질인 것이 다르다. 모두 네 지점 (UDA, JBC, JG, JBA)에서 총 49개의 시료들이 채취되었다.

#### 자기세척 실험

교류자기세척실험은 Molspin AC demagnetiser를 이용하였으며, 열자기세척실험은 Schonstedt TSD-1 demagnetizer를 사용하였다. 열자기세척실험에는 가열에 의한 자성광물의 화학적 변화여부를 감지하기 위하여 각 세척단계마다 Molspin Minisep 대자를 측정기를 사용하여 총 대자율의 변화를 측정하였다. 세척에 따른 잔류자기의 강도와 방향의 측정은 Molspin rock (spinner) magnetometer를 사용하였다.

매 세척단계가 진행되는 동안의 중간 실험결과들은 자화강도 변화곡선, 등적투영도 그리고 직교 벡터다이아그램 (Zijderveld, 1967)의 형태로 on-line으로 도시되게 하여 모두를 종합적으로 검토함으로써 다음 단계의 세척강도를 결정하도록 하였다. 등적투영도상에서 안정중점 (SEP, stable endpoint)을 보이지 않고 大圓 (재자화원)을 그리며 잔류자기 방향이 변화되는 시편의 경우에 대해서는 Halls (1976, 1978)의 대원분석법을 적용하였다. Table 1에는 이러한 자기세척실험의 결과를 요약하였으며 아래에는 세척실험의 예시와 경과에 대해서 기술한다. 기술의 순서는 정자분지 내부를 점하고 있는 제3기 당사안산암류로부터 시작되며 그 이하에는 분지의 기반암이



**Fig. 2.** AF demagnetization of some specimens from Tangsa Andesites. These are examples of relatively easy isolation of characteristic "stable endpoint" direction. All the vector diagrams in this paper are depicted in the geographic (in-situ) coordinates, and closed (open) symbols represent projections onto the horizontal (vertical) plane.

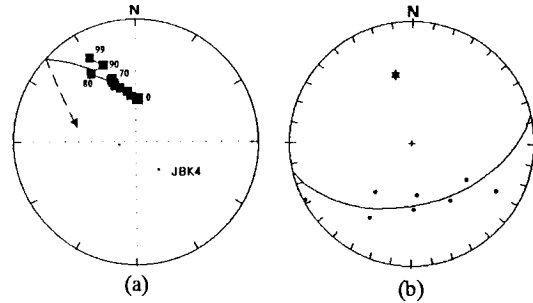
뒤따르게 된다. 후자에서는 오래된 지층으로부터 젊어지는 지층의 순으로 진행하였다.

**제3기 당사안산암류**

**현무암질 안산암**

이 암석의 시편들은 세척시의 특성에 따라 다음의 세가지로 구분된다. 첫번째는 동일 채취지점내의 거의 모든 시편들이 교류자기세척에서 안정종점 (SEP)의 특성잔류자기 (ChRM, characteristic remanent magnetization)를 보이는 경우이다 (JB, JD, JI, UJJ). 안정종점 (SEP)에 도달되는 교류자기세척강도는 채취지점이나 시편들 각각에 따라 15 내지 40mT 정도이었다 (Fig. 2). 이와같은 시편들에서는 항자력이 약한 티탄자철석계열 광물들이 주된 자성광물인 것으로 보인다.

둘째는, 일부 시편들이 교류자기세척으로 단일 특성잔류자기방향을 내보이기도 하지만 대부분에서 재자화원이 나타나는 경우이다 (JBK; Fig. 3a). 이러한 시편들에 열자기세척을 적용하면 저온에서는 역시 재자화원이 나타나나 약 550°C 이상에 이르러서는 산란된 잔류자기 방향변화가 나타났다. 이러한 특징으로부터 이들에는 두 종의 잔류자기 성분들이 존재하며 이들의 항자력 및 폐색온도 (unblocking temperature) 스펙트럼은 중첩되어 있음을 알 수 있다. 한편 대자율의 지속적인 증가로부터 열자기세척온도가 높아짐에 따라 일부 자성광물들이 변질되어



**Fig. 3.** (a) AF demagnetization of some specimens from Tangsa Andesites not showing characteristic "stable endpoint" direction but great-circle trajectories. Equal-area lower hemisphere projection in the geographic coordinates. (b) The poles (solid dots) of these great-circles (remagnetization circles) (not shown for clarity) are fitted with a new great-circle (shown), and the pole (solid star) of this circle is treated as ChRM direction of corresponding sample site. Equal-area lower hemisphere projections in the stratigraphic coordinates.

가는 것을 감지할 수 있었다. 이러한 노두들의 경우에는 시료별 대원의 교점을 통하여 특성잔류자기방향을 구해내고 (Halls, 1976, 1978) (Fig. 3b) 이를 교류자기세척실험으로 얻어낸 시료별의 안정종점방향들과 합하여 구면통계처리하여 지점평균 (site-mean)을 구하였다.

마지막으로는 교류자기세척이나 열자기세척 모두에서 불안정적인 자화방향변화만이 나타나는 경우가 있었다. 이들 시편들 (JC, JE, JF, JBD, UKB, UTA, UTD, UWB)은 대부분 정자분지의 해안근처에서 채취되었는데 세계지점 (UTA, UTD, UWB)은 울산분지에서 채취되었다 (Fig. 1). 이들은 통상 약 300°C의 열자기세척에 이르러 잔류자기방향이 산란되는 양상을 보였다 (Fig. 4a). 세척온도가 높아짐에 따라 400°C까지는 대자율이 증가되다가 그 이상에서는 감소하였으며, 자기세척강도에 따른 자화강도의 변화곡선 (J-T curve)을 보면, 100°C에서 400°C까지 자화강도가 급히 감소하다가 그후에는 약간 증가함을 보였다 (Fig. 4b). 이상의 특성은 티탄마그네사이트와 같은 저온산화 자성광물들이 세척 (가열)온도가 높아짐에 따라 변질되어감에 기인하는 것으로 보인다.

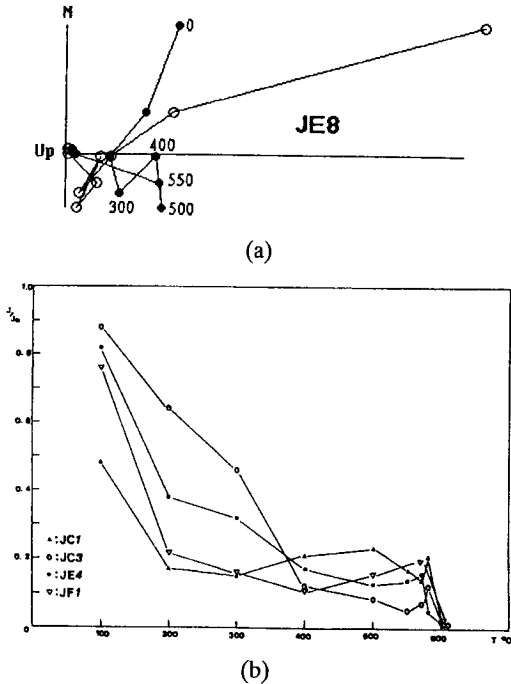
**암편질 응회암**

대부분의 시편들 (JH, UDT)에서는 재자화원이 나타났다. 그러나 일부 시편들에서는 교류자기세척만으로도 단일 잔류자기 방향이 분리되었다. 실험결과 재자화원만 나타나는 시료채취지점 (UDT)에서는 재자화원들의 교점들을 모아 구면통계처리하였으며 단일 특성잔류자기 방향

Table 1. Summary of study results (Site-mean ChRM directions and formation-means).

Age	Formation	Lithology	Site	Treat. method	n/N	Before tilt correction			After tilt correction			Polarity	Remark			
						d(°)	i(°)	95(°)	k	d(°)	i(°)			95(°)	k	
Tertiary	Dangsa andesite	BA <sup>1)</sup>	JB	AF	9/10	275.4	-66.8	4.6	127.1	220.5	-65.5	5.4	92.8	R	A	
			JD	AF	12/12	52.0	49.7	9.8	20.4	18.0	47.4	8.6	26.5		N	A
	"	"	JI	AF	10/11	270.1	-62.0	6.2	61.0	228.7	-50.4	5.3	83.6	R	A	
			UJJ*	AF	10/11	103.1	77.3	4.6	111.4	337.0	39.2	9.5	26.9	N	B, -fold (95%)	
	Lithic tuff	"	JBK*	AF,GC	12/18	329.8	39.8	8.1	60.0	343.7	43.8	10.1	38.0	N	B,	
			JH	AF,GC	7/7	204.7	-60.4	14.2	23.3	185.7	-43.2	11.6	34.2	R	A	
	Mean	5 sites**	"	UDT	GC	5/10	195.7	-43.3	9.0	30.1	201.2	-42.7	8.8	31.3	R	A
				Mean			229.6	-60.5	16.2	15.0	204.9	-50.9	11.2	32.0		+ fold (95%)
	Granite porphyry	Granitoid	"	UDA	AF	4/5	257.3	-60.7	4.4	440.4					R	C
				JBC	AF,TH	15/17	231.4	-53.8	3.0	148.0					R	C
Rhyolite		Mean	JG	TH	5/7	41.7	43.8	9.9	60.4					N	C	
			Mean			234.4	-53.8	13.5	36.0							
Biotite granite	Granitoid	"	UJG	TH	9/13	209.5	-59.1	5.2	99.6					R	A	
			JBE	TH	13/14	218.1	-56.3	3.2	150.0					R	A	
	"	"	JBH	TH,GC	5/12	201.4	-57.0	11.9	41.8					R	A	
			UGR	TH,GC	8/9	189.0	-51.0	8.6	36.8					R	A	
	"	"	UDG*	GC	6/9	146.3	-52.8	5.7	53.1					R	D	
			JBM	TH	3/13	211.6	-58.1	7.9	243.0					R	D	
Mean	6 sites**	"	JBN	TH	4/14	208.5	-57.1	4.7	389.8					R	D	
			Mean			205.9	-56.8	4.5	160.0							
Cretaceous	Daean andesite	Lapilli tuff	UJA	TH	2/9	269.7	-34.6			251.5	-51.9			R(+N?)	C	
			UJH	GC	6/10	228.0	-60.3	8.4	27.6	191.1	-42.1	6.8	43.4	R	A	

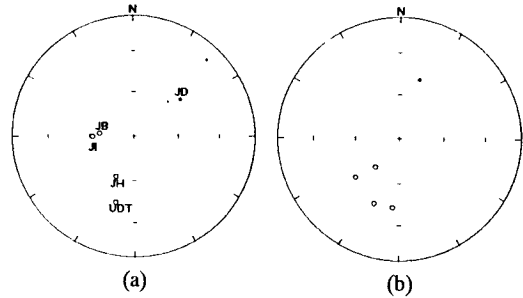
N; Number of sampled specimens, n; Number of specimens used in site-mean ChRM calculation, AF; AF cleaning, TH; Thermal cleaning, GC; Great circle method (Halls, 1976, 1978), (+) fold (95%); Negative(Positive) fold test with 95% confidence level, A-D in Remark column stand for the tectonic blocks depicted in Fig. 11. \*Sites with counterclockwise rotated site-mean ChRM. \*\*Counter-clockwise rotated sites excluded, <sup>1)</sup> BA; Basaltic andesite, <sup>2)</sup> RS & SS; Rad shale & sand stone



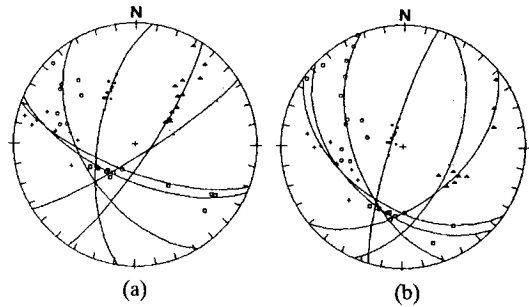
**Fig. 4.** (a) Some specimens from Tangsa Andesites showed erratic variation of RM direction during thermal demagnetization. (b) Variation of RM intensity against heating temperature of this unstable group of specimens. The J-T curves suggest titanomaghemites as main magnetic mineral.

과 재자화된 것이 함께 관찰되는 경우 (UDT)에는 앞에서 언급한 바와 같이 대원교점들과 단일성분으로 유리된 특성잔류자기 방향들을 합쳐서 구면통계처리하였다.

이상의 실험을 통하여 얻어진 제3기 당사안산암류의 결과치들은 Table 1에 정리되어 있다. 단일 특성잔류자기 방향이 성공적으로 유리된 7개의 채취지점 중에서 4개 지점 (JB, JH, JI, UDT)에서 역자화가, 그리고 3개 지점 (JD, UJJ, JBK)에서는 정자화가 나타났다. 실험결과치들은 야외에서 측정된 유상충리면의 데이터를 이용하여 경사보정하였다. 경사보정을 통하여 7개 지점 중 4개 지점에서 95%의 신뢰도로 군집도가 증가하였으나 3개 지점에서는 감소하였다. 이들 중 두개 지점 (UJJ, JBK)에서는 신뢰도의 감소가 현저하였으며 특히 UJJ의 경우에는 음의 습곡검사 (negative fold test)라는 판정 (95%의 신뢰도)이 나왔다. 이 UJJ지점의 유상충리는 20~30° 경사로 단사구조를 이루는 당사안산암류에서의 일반적 유상충리의 자세와는 달리 다양한 주향과 50~80°사이의 급하고 불규칙한 경사각을 보이는 것이 특징이었다. 경사보정을 위한 자료로써 이 유



**Fig. 5.** Site-mean ChRM directions of Tangsa Andesites obtained through "stable endpoint" (e.g. Fig. 2) and great-circle methods (e.g. Fig. 3). Equal-area lower hemisphere projections. (a) in the geographic coordinates, (b) in the stratigraphic coordinates. This is the case of reversals test and positive fold test with 95% significant level.



**Fig. 6.** Thermal demagnetization of some specimens from Ulsan Formation showed great-circle trajectories. Equal-area upper hemisphere projections. (a) in the geographic coordinates, (b) in the stratigraphic coordinates.

상충리의 자세를 이용하였는데 이 두 지점에서의 유상충리들은 과거의 고수평면을 대표하지 않는 것으로 보인다. 경사보정을 통하여 군집도가 현저히 감소되는 이 두 지점을 제외한 나머지 5개 지점 (JB, JD, JH, JI, UDT) (Fig. 5)에 대하여 구면통계처리하면 이 제3기 당사안산암류의 평균 특성잔류자기방향은 경사보정전에 편각 (d)/북각 (i)이 229.6°/-60.5° ( $\alpha_{95}=16.2^\circ$ ,  $k=15.0$ )이며 경사보정후에는 204.9°/-50.9° ( $\alpha_{95}=11.2^\circ$ ,  $k=32.0$ )이다 (Table 1). 이 평균값은 95%의 신뢰도로써 습곡검사 (positive fold test)를 통과할 뿐만 아니라 역전검사 (reversals test)도 통과한다.

**기반암류**

**울산층**

대부분의 시편들은 교류나 열자기 세척실험 모두에서 안정종점방향을 보이지 않았다. 그러나 UJH지점에서 채

취한 10개의 시편들 중 6개에서는 재자화원이 나타났다. Halls의 대원분석법을 이용하여 지점평균 특성잔류자기 방향을 찾아낸 결과 (Fig. 6) 그 방향은 경사보정전  $228.0^\circ/-60.3^\circ$  ( $\alpha_{95}=8.4^\circ$ ,  $k=27.6$ )이며 경사보정후에는  $191.1^\circ/-42.1^\circ$  ( $\alpha_{95}=6.8^\circ$ ,  $k=43.4$ )이었다 (Table 1). 경사보정전에 비하여 경사보정후의 군집도가 상당히 크지만 습곡검사는 통계학적으로 불확정적이다.

한편, 이 울산층 (백악기 하양층군) UJH지점의 평균 특성잔류자기 방향은 경사보정후 전술한 제3기 (Early Miocene) 당사안산암류의 평균 특성잔류자기 방향과 오차범위내에서 일치하고 있다 (Table 1). 이렇게 연령차이가 큰 두 지층의 자화방향이 같다는 것은 울산층이 당사안산암류의 분출시에 재자화되었음을 의미하는 것이며, 아울러서 울산층과 당사안산암류의 특성잔류자기가 공히 지층의 경사후에 획득된 이차잔류자기가 아니라는 의미로 해석될 수 있다 (contact test). 마침 이 UJH지점의 위치는 당사안산암류와 부정합으로 접촉하는 곳의 바로 아래이며 흑운모 화강암류의 노두에 근접하여 있다 (Fig. 1).

#### 대안산반암

교류 및 열자기세척의 노력에도 불구하고 UJA지점으로부터의 오직 두 시편만이 열세척강도  $600^\circ\text{C}$  이상에서 원점으로 향하는 역자화의 특성잔류자기를 보여주었으며 하나의 시편은 역자화에서 정자화로 향하는 재자화원을 보였다 (Fig. 7). 전자인 이 두 시편의 안정 잔류자기의

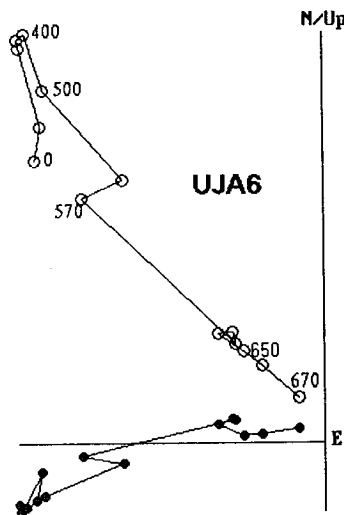


Fig. 7. Only two specimens from Daean Andesite showed stable RM direction variation during thermal demagnetization. Note the reversed ChRM direction.

평균방향은 경사보정전에  $269.7^\circ/-34.6^\circ$ , 경사보정후에  $251.5^\circ/-51.9^\circ$ 이다 (Table 1). JBB 지점에서 채취된 17개의 시편들은 거의 모두가 현재자장방향으로 재자화되었거나 불안정한 세척습성을 보였다.

#### 유문암질 석영안산암

모든 시료들이 교류 및 열자기세척실험 모두에서 불안정한 자화방향의 변화만을 보였다. 이 시료들은 초기 NRM상에서 대부분  $1\text{mAm}^{-1}$  이하의 낮은 자화강도를 가지며 세척 초기에서부터 불안정적인 자화방향변화를 보였다. 이는 안정된 자성광물의 결핍을 지시하고 있다. 한편, 이 유문암질 석영안산암 뿐만이 아니라 울산분지 전반에서 채취된 거의 모든 시료들이 불안정적인 자화방향의 변화를 보이고 있어 자성광물 자체 뿐만이 아니라 울산분지 일원의 지구조발달의 역사와도 어떤 연관관계가 있는 것으로 생각된다.

#### 흑운모화강암

시료채취 장소들은 세척특징에 따라 다음과 같이 다섯 경우로 구분되었다. 첫번째 경우는, 열자기세척으로 대부분의 시편들이 성공적으로 안정종점방향 (역자화)에 도달되는 경우이다. 특히 UJG, JBE 두 지점으로부터의 시편들이 이러한 세척특징을 전형적으로 보여주었다 (Fig. 8).

두번째는, 대부분의 시편들이 불안정한 세척양상을 나

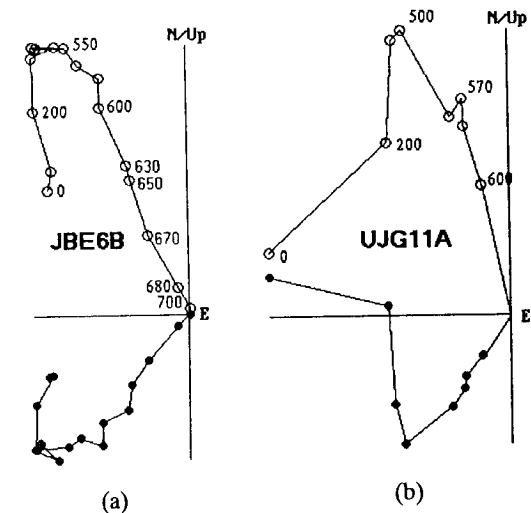


Fig. 8. Examples of successful thermal demagnetization of biotite granites (Bulgksa Granites). They revealed reversed ChRM direction exclusively.



타내지만 일부 몇개의 시편들은 열자기세척으로 안정종점방향에 도달하는 경우이다. 이 경우는 JBM, JBN, JBG 세 지점에 해당된다. 이들 중 JBG지점의 경우에는 단 하나의 시편만이 안정종점방향에 도달하여 실험결과의 해석에서는 제외하였다.

세번째는, 세척양상이 불안정한 시편, 안정종점에 도달하는 시편 그리고 재자화원을 그리는 시편들이 혼재되어 있는 경우이다. JBH, UGR 두 지점에서 이러한 경우가 관찰되었는데 이들에 대해서는 대원분석법을 적용하여 특성잔류자기 방향을 구하고 안정종점방향에 도달한 시편들의 방향과 합쳐서 평균 특성잔류자기 방향을 계산하였다 (Table 1).

네번째는, 재자화원만 나타나는 경우로써 UDG지점이 이에 해당한다. 이에 대해서는 재자화원들의 교점들에 통계치리를 적용하여 평균 특성잔류자기 방향을 계산해내었다.

마지막은 일부 시편들이 재자화원을 그리는 듯하나 대부분 불안정한 세척양상을 보여주는 경우이다 (JBI, JBJ, JBL). 이들로부터는 특성잔류자기 방향을 구해낼 수가 없었다.

이 흑운모화강암에서 채취된 총 136개의 시편들 모두에 대해서 세척실험을 실시하였지만 결국 49개의 시편들에서만 안정종점방향이나 재자화원이 구해졌다. 각 채취지점의 위치와 세척실험의 성공률 (채취 시편수 : 성공한 시편수의 %)을 비교해 보면 흥미로운 결과가 나타난다. 정자분지의 남서 경계단층 (미포단층)을 경계로 동쪽부에서 채취된 시편들은 JBG 한 지점을 제외하고 다른 4개 지점 모두에서 비교적 높은 성공률 (JBE 93%; UJG 63%; JBH 42%; UGR 89%)이 나타났다. 그러나 단층에 인접한 세 시편채취지점 (JBI, JBJ, JBL)에서의 실험성공율은 대조적으로 모두 0%이었다. 한편, 단층으로부터 서쪽으로 멀어지면 실험성공율은 다시 증가한다 (JBM 23%; UDG 66%; JBN 29%). 그러나 이 서부에서의 성공율은 단층선 동부에서의 것보다 여전히 낮은 값이다.

흑운모화강암에서 성공적으로 특성잔류자기 방향이 구해진 것은 7개 지점인데 모두 역자화되어 있었으며 오늘날의 지자기방향에 비해 시계방향으로 약 20° 편향된 특성잔류자기를 보였다. 그러나 재자화원만 나타나는 UDG지점에서는 나머지 6개 지점과는 대조되게 특성잔류자기 편각이 현재 지자기방향에 비해 30°가량 시계 반대방향으로 편향된 결과를 보여주었다 (Table 1). 이에 대한 보다 자세한 고찰은 뒤로 미루고 이를 제외한 나머지 6개 지점들로부터의 평균 특성잔류자기 방향을 계산하면 205.9°/-56.8° ( $\alpha_{95}=4.5^\circ$ ,  $k=160.0$ )가 된다 (Fig. 9a). 이 평균값은 당사안산암류에서의 평균 특성잔류자기 방향 (Fig. 5b)과 거의 일치한다.

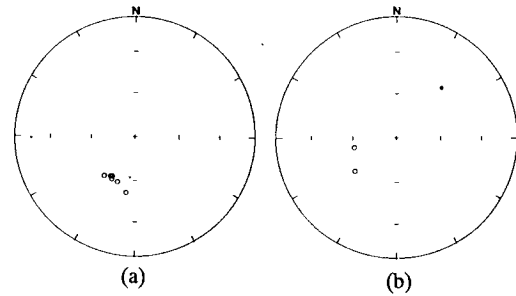


Fig. 9. (a) Site-mean ChRM directions of biotite granites (Bulguksa Granites). (b) Site-mean ChRM directions of Granite Porphyry. Equal-area lower hemisphere projections without tilt correction (in-situ geographic coordinates).

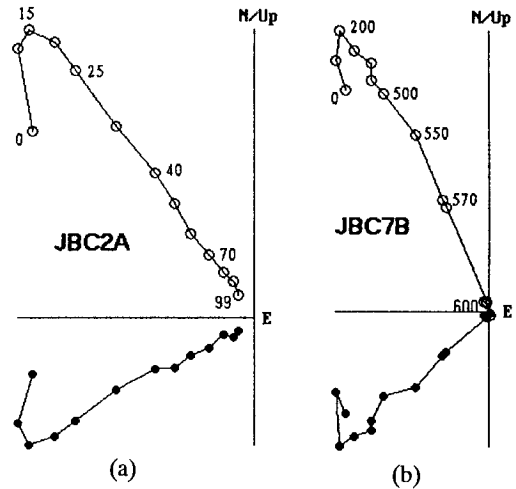


Fig. 10. Examples of AF and thermal demagnetization of some specimens from Granite Porphyry showing reversed ChRM directions. The "stable endpoint" ChRM direction was easily isolated by either AF(a) or thermal(b) demagnetization.

화강반암

화강반암 시편들 대부분은 교류 및 열자기세척 모두에서 용이하게 단일 잔류자기성분이 분리되는 세척수성을 보여주었다 (Fig. 10). 다만 JBA시편들만이 안정종점에 도달하지 못하고 재자화원을 그렸다. 이 지점 역시 단층선에 연접된 것으로 보인다. 이 JBA지점 시편들로부터 관찰된 재자화원은 모두 10개에 이르렀으나 재자화원의 이동 경로들이 거의 일치되어 대원교점법을 사용할 수가 없었다. 나머지 세 지점에서 구한 특성잔류자기 방향의 평균값은 234.4°/-53.7° ( $\alpha_{95}=13.5^\circ$ ,  $k=36.0$ )이다 (Fig. 9b). 이는 보다 전기인 흑운모화강암의 평균 특성잔류자기 방향에

비하여 30° 가량이나 시계방향으로 더 편향되어 있다.

## 세척실험 결과에 대한 고찰

### 울산층의 재자화 가능성

본 연구지역내 백악기 울산층의 최소한 일부는 화강암이나 안산암류를 생성시킨 주변의 화성활동에 의해서 제3기 동안에 재자화되었을 가능성이 있다. 예를들어 울산층 UJH지점의 특성잔류자기 방향을 살펴보면 경사보정후 191.1°/42.1° ( $\alpha_{95}=6.8^\circ$ ,  $k=43.4$ )으로써, 일반적으로 알려진 한반도 백악기 퇴적암류의 특성잔류자기 방향(강희철, 1995)에 비하여 편각이 20° 가량이나 시계 반대방향으로 편향된 것처럼 나타나고 있다. 그러나 제3기 분지지역에서의 편각편향은 일반적으로 이와 반대되는 시계방향인 것이 여러 연구에서 보고되고 있고(서론에서 언급 및 열거), 이 울산층 UJH지점에 인접한 제3기 당시안산암류의 특성잔류자기 역시 시계방향으로 20° 이상 편향된 상황을 보이고 있음(Fig. 5, Table 1)을 염두에 둔다면 유독 이 UJH지점의 울산층만이 시계 반대방향의 편향운동을 하였다고 보기는 어려워진다. 아울러 이 울산층의 특성잔류자기 방향이 당시안산암류나 흑운모화강암의 특성잔류자기 방향과 거의 일치하고 있다는 사실(Table 1)을 고려할 때, 이 울산층은 보다 후에 관입 분출된 이 주변 화강암이나 안산암류에 의하여 재자화되었을 가능성이 추론된다. 1:50,000 지질도 울산도폭과 그 서쪽 연접의 연양도폭에서 관입 화강암주위에 표시된 울산층의 접촉 열변성대(contact aureole)는 이러한 재자화대를 대표하는 것일 것이다.

### 흑운모화강암의 연령

이 흑운모화강암은 1:50,000 지질도 울산도폭에 백악기 불국사통의 반상흑운모화강암으로 기재되어 있다. 그러나 본 연구로 나타난 특성잔류자기 방향에 의하면 이 화강암의 정지시기는 백악기 말 내지 제3기 초가 되는 것으로 나타난다. 이는 이 흑운모화강암의 특성잔류자기 방향(205.9°/~56.8°,  $\alpha_{95}=4.5^\circ$ ,  $k=160.0$ )이 전기 백악기의 특성잔류자기 방향에 비해서 약 10°나 작은 편각값을 갖는 반면, 오차의 범위내에서 제3기 당시안산암류의 특성잔류자기 방향과 일치되고 있기 때문이다(Table 1).

한편, 같은 암체에 대한 이윤중, 우에다(1976) 그리고 진명식 등(1991)에 의한 K-Ar 방사능연령도 각각 58 Ma와  $59.7 \pm 1.3$  Ma으로 나타나 제3기 Paleocene의 시대

를 지시하고 있다.

## 단층지역에서의 잔류자기 보존

본 연구에서 나타난 다른 하나의 특기할 만한 사실은 단층지역에서 채취된 시료의 고자기 세척실험에는 어려움이 있다는 것이다. 이러한 사실은 연구결과도인 Fig. 11에 잘 나타나 있다. 이 그림에서 시료채취지점별 평균 특성잔류자기를 구해내지 못했던 지점들은 화살표가 붙지 않은 검은 점으로 표시했는데 이들은 주로 단층선상에 위치한다. 특히 흑운모화강암 지점들의 예를 볼 때, 시료채취지점들은 대부분 1027번 지방도로변 근처로 정자분지의 남서 경계단층(미포단층)을 거의 수직으로 가로지르고 있다(Fig. 11의 오른쪽 아래부분). 이 미포단층선은 400 m 내외 폭의 파쇄대를 가진다(손문, 김인수, 1994).

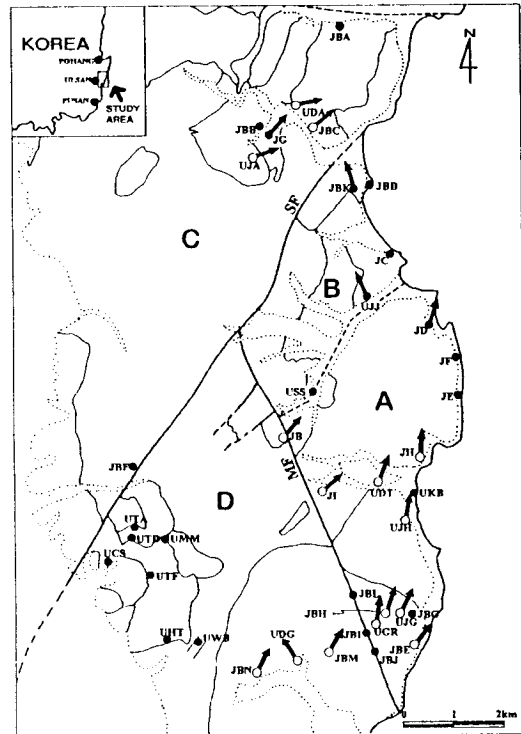


Fig. 11. Declination value of site-mean ChRM directions (Table 1) and subdivision of the study area into four structural domains (microblocks) according to the previous structural mapping (Son and Kim, 1994). Solid (open) dots with an arrow represent the sample sites with normal (reversed) ChRM polarity, whereas solid dots without arrow represent the sample sites from where no site-mean ChRM direction could be obtained. Note the latter sites are located on or very near to fault lines and also in the Ulsan basin (western part of D domain).

이 단층선을 경계로 동쪽부 5개지점, 서쪽부 3개지점 그리고 파쇄대 연접의 3개지점에서 시료를 채취하여 세척실험을 수행한 결과, 동부지역에서의 실험성공률은 한 지점 (JBG)을 제외하고 각 지점별로 최저 42%에서 최고 93%로 상당히 높았던 반면, 단층 연접지역 3개 지점 모두에서는 0%를 보였다. 그러나 단층선을 넘어 서부지역으로 들어가면 실험성공률은 최저 23%, 최고 66%로 다시 증가하는 경향이 나타났다.

이에 아울러 단층선으로 추정되는 해안가를 따르며 채취된 당사리안산암 시료들도 앞서 세척실험의 기재에서 설명한 바와같이 약 300°C 이상의 열자기세척에 이르러서는 잔류자기 방향이 산란되며 대자율도 상승되는 세척실험에서의 어려움을 보였다 (Fig. 4a).

이러한 특징 (단층선 지역에서의 세척실험의 어려움)은 본 연구지역에서 뿐만 아니라 영양분지 지역이나 (강희철, 1995) 영해분지 등의 다른 동해연접 제3기 분지의 단층선 지대에서도 발견된다는 것이 필자들의 경험이다 (미발표, 연구진행중). 이와같은 특이현상은 단층지대에서의 고자기 연구수행에서 장벽으로 작용되고 있다. 그러나 이는 역으로 볼 때, 주변에 비하여 자기세척실험의 성공률이 극히 저조한 지역은 단층파쇄대임을 지시하는 단서로 활용될 수도 있음을 기억해둘 필요가 있다.

#### 지구구조의 구분

앞서의 실험결과들을 검토해보면 잔류자기의 수평회전량은 암석의 지질학적 연령보다는 地體構造線 (단층선)에 의하여 구획된 여러 小地塊들에서의 구조운동에 밀접히 관련되어 있는 것으로 나타난다. 이를 가시화하기 위해서 각 암층들로부터의 평균 특성잔류자기 방향들을 상대적 지질시대의 순서, 그리고 소지괴별로 비교해보기로 하자.

가장 오랜 연령인 울산층의 경우는 경사보정후의 편각이 191.1°로 현 지자기방향과 비교하여 약 10° 정도 시계방향으로 편향되어 있다 (Table 1). 이는 그 상위의 대안산반암에서의 편각 251.5°에 비하여 약 60° 가량 작은 값이다. 한편, 이들보다 젊은 흑운모화강암의 편각은 205.9°로 현 지자기방향에 비해 약 25° 정도 시계방향으로 편향된 것이며 이는 다시금 더욱 젊은 화강반암의 편각 234.4°에 비하여 30° 정도 작은 값이다. 따라서 지층의 연령과 잔류자기의 편향량과의 정비례관계는 생각하기 곤란하다. 이와같은 상황은 어일분지에서도 관찰된 바 있으며 (김인수, 강희철, 1989), 이러한 고려에서 편향된 편각을 갖는 노두중에서 가장 젊은 연령의 것을 기준으로 잔류자기의 편향시기를 결정한 바 있다.

한편, 본 연구지역에서의 필자들의 선행 구조지질학적 연구 결과 (손문, 김인수, 1994)를 따르면 이 지역은 지구조적 특성상 A, B, C, D 네개의 구조구 (structural domain, block, 小地塊; 여기서는 편의상 "地塊"라고 칭함)로 분할될 수 있다 (Fig. 11). 이중 A지괴는 북동주향의 산하단층선 남동부 그리고 북북서주향의 미포단층선 북동부를 이루는 지역중 제3기 퇴적층의 분포지 (이는 아래에서 설명하는 B지괴임)를 제외한 부분으로 정의한다. 이 A지괴는 연구지역의 기반암인 울산층과 흑운모화강암 그리고 정자분지 충전물중 기반을 이루는 당사리안산암으로 구성되어 있다. A지괴내에서 ChRM 결과값을 얻어낼 수 있었던 시료지점은 울산층 1개지점 (UJH)과 흑운모화강암 4개지점 (UJG, JBE, JBH, UGR)이다. 동아시아의 신생대 자북위치를 현재와 같다고 볼 때 (Irving, 1979), 이 지점들에서의 평균 ChRM 편각값들은 대략 10~40° 정도 시계방향으로 편향되어 있다.

한편, 정자분지 충전물인 당사리안산암류로부터는 5개지점 (JB, JL, UDT, JH, JD)에서 ChRM결과값을 얻었다. 이들의 지점평균 ChRM 편각값 역시 20~40° 정도로써 산성화성암에서의 편각과 거의 일치한다. 이는 편각의 크기와 지층의 지질시대 사이의 비례관계를 부정하는 것으로써, 정자분지의 최초 열개 및 회전과 거의 때를 같이하여 당사리안산암류가 분지를 채웠음을 지시하며 또한 분지충전물인 이 당사리안산암류와 분지의 그릇인 기반암이 거의 함께 수평회전되었음을 말하여주는 것이다.

B지괴는 A지괴와 같이 북동주향의 산하단층선 남동부 그리고 북북서주향의 미포단층선 북동부로 국한된 지역중에서 제3기 퇴적층이 분포하는 평행사변형의 부분으로 국한한다 (손문, 김인수 (1994)의 "정자퇴적분지"에 해당) (Fig. 11). A,B의 두 지괴는 산하단층에 평행한 북동주향의 매몰단층으로 경계되는 것으로 추정된다 (Fig. 11). 이 B지괴에서 지점평균 ChRM 결과값을 구할 수 있었던 지점은 현무암질 안산암으로 이루어진 UJJ와 JBK의 두 지점이었다. 이들에서의 평균 ChRM은 특이하게도 반시계방향으로 20° 내외 수평편향된 것으로 나타난다 (Table 1, Fig. 11).

C지괴는 정자분지의 북서 경계단층인 산하단층선 이북 지역으로써 연구지역의 북부에 해당한다. 이 C지괴에서 ChRM 결과값을 구할 수 있었던 시료채취점은 대안리안산반암 지점 1개소 (UJA)와 화강반암 지점 3개소 (UDA, JBC, JG)이었다. 이들의 지점별 평균 ChRM 방향을 살펴보면 편각, 즉 지괴의 시계방향 수평회전량이 최소 40° 이상 (JG)에서 최대는 약 80° 가까이까지 (UDA)에 이른다 (Table 1, Fig. 11). 이는 앞서 A,B 두 지괴에

서의 편각회전량보다 월등히 큰 값이다. 여기서 강조하고 싶은 것은 이 C지괴의 화강반암이 A지괴의 흑운모화강암보다 더 젊은 것으로 알려져 있는데 편각의 수평회전량은 더 크게 나타나고 있는 사실이다. 이는 다시금 지층의 지질시대와 편각사이의 정비례관계를 부인하는 것이다.

D지괴는 산하단층선과 미포단층선으로 구획된 연구지역의 남서부이다. 이 D지괴에서 드러나는 수평회전양상은 다소 복잡하다. 화강암 3개 지점의 ChRM 결과값 중 2개 지점 (JBM, JBN)에서의 편각값은 평균 25° 정도로써 A지괴 화강암과 거의 유사한 크기의 시계방향 수평회전을 지시한다. 그러나 다른 1개 지점 (UDG)에서의 편각값은 예외적으로 약 35° 시계 반대방향의 회전운동을 나타내고 있다. 이 UDG지점의 결과를 극히 국부적인 지괴운동으로 취급해 버릴 수도 있을지 모르겠으나 동일 D지괴의 다른 몇개 지점 (UCS 등)에서 북서상향을 향하는 제자화원이 나타나고 있음을 고려한다면 이러한 단정은 옳지 않음을 알 수 있다. 이 D지괴에 대해서는 차후 보다 면밀한 구조지질학적 조사가 이루어져야 할 필요가 있다.

### 지구조적 발달에 대한 추론

필자들의 선행연구 (손문, 김인수, 1994)에 의하면 정자분지내에 분포하는 퇴적층은 북동향의 퇴적분지 축을 따르며 남서부에서는 신기의 신현층이 지배적으로 분포되다가 북동으로 감에 따라 고기의 강동층으로 변화되고 최북동에 이르러서는 더욱 고기의 당사안산암류로 대체되는 것으로 알려지고 있다 (Fig. 1). 필자들은 이점에 주목하여 정자분지의 남서부가 북동부에 비해 더 많이 확장, 침강되었다고 추론하였다. 더불어, 필자들은 이 차별확장과 침강의 원인으로써 분지의 확장시기에 A지괴가 전체적으로 시계 반대방향의 회전하였거나 (손문, 김인수, 1994의 Fig. 5A) 또는 A지괴가 두개의 소지괴로 나누어져서 차별적으로 남동향으로 이동되었을 (손문, 김인수, 1994의 Fig. 5B) 두가지 가능성을 거론하였다. 그러나 본 연구의 결과로 볼 때, 분지가 확장될 때 A지괴에 비해서 C지괴가 보다 많이 시계방향 회전을 하게 되어 분지 남서부의 폭이 상대적으로 넓어지게 된 것으로 보는 것이 타당할 것으로 생각된다.

끝으로, 정자분지의 남서 경계단층 (미포단층) 以西部の D지괴에서의 운동에 대해서 간략히 고찰해보고자 한다. 앞서 언급한 바와 같이 미포단층선 동쪽지역에 비하여 서쪽지역 시료들의 세척실험 성공률이 현저하게 낮으며, 몇몇 곳에서는 시계반대방향의 회전을 지시하는 정보들이 제공되었다. 이의 원인은 이 지역 (울산분지 및 그 동부일

원의 고지)이 오랜동안 분지로 침강되어 있다가 다시 융기되었던 데에 있는 것으로 추정된다. 울산분지 동부 322고지 정상에는 다량의 조개 및 식물 화석을 함유한 제 3기 사암층의 노두가 나타난다는 사실을 앞서에서 언급하였다. 이는 신생대 울산분지의 융기를 지시하는 증거이다. 이 울산분지의 융기는 Middle Miocene 이후 (약 15 Ma) 서북서-동남동방향으로 작용했던 압축력 (김인수, 1990)에 기인할 것이다. 이 D지괴지역 기반암 시료의 세척실험 성공률이 낮은 것은 장시간 지하에 머무는 동안 기반암의 자성광물에 熱점성잔류자기 (TVRM)가 중첩되어 잔류자기가 다성분의 것으로 변화된 때문으로 추정되며, 반시계방향으로 나타나는 특성잔류자기는 융기당시 소지괴들이 左向 전단작용 (sinistral simple shearing)을 받아 이 방향으로 수평회전되었기 때문인 것으로 해석된다.

나아가서 이 압축력은 B지괴의 잔류자기 편각값들도 시계반대방향으로 회전시켰을 것으로 추정된다. 서론에서 언급한 바와 같이 필자 (김인수, 1992)는 남한 제3기 분지에서 널리 관찰되는 잔류자기의 시계방향회전 (clockwise rotation)이 동해의 확장에 기인된 우향 전단작용 (dextral simple shearing)에 따른 것이라고 주장한 바 있다. 이 확장은 약 16Ma에 종결되었다 (김인수, 1992). 이에 대조되게 본 B지괴나 포항분지 달천현무암 (김인수, 강희철, 1989; 손문, 김인수, 1996 (자원환경지질 투고중)), 장기분지 (김인수, 강희철, 1996 (자원환경지질 투고중)) 등의 다른 남한 제3기 분지들의 몇곳에서 발견되는 잔류자기의 반시계방향회전 (counterclockwise rotation)은 동해확장의 종결과 동시 (약 15 Ma) 혹은 그 직후에 이르러 서북서-동남동으로 작용했던 압축력으로부터 유래된 한반도 동남부-남서혼수 해역에서의 左向 전단작용 (sinistral simple shearing) (김인수 (1992)의 Fig. 7 작은 화살표)에 기인할 것이다. 이는 대마도지역의 잔류자기가 반시계방향으로 편향된 것 (Ishikawa *et al.*, 1985; Torii and Ishikawa, 1988)과 같은 원리이다. 본 연구지역의 지역기반암인 울산층과 산성화성암 그리고 정자퇴적분지 외곽의 당사리안산암 등 (Fig. 11의 A, C, D지괴에 해당)의 정자퇴적분지 태두리를 이루는 지괴들은 16Ma이전 동해확장으로 분지가 裂開되는 대사건의 과정에서 우향전단작용으로 시계방향의 회전운동을 하였을 것이다. 반면에 대한해협일대가 압축되며 좌향전단력이 작용되던 15 Ma경의 사건은 우리나라 동해안 내륙지역에서는 보다 작은 사건이었으며, 따라서 큰 체적으로 지하깊이 저반에 연결되어 있는 이 A, C, D 기반암 지괴들에는 별다른 회전운동을 가져오지 않았을 것이다. 그러나 이에 반하여, 분지의 열개과정에서 정자퇴적분지내부에 분출된 후 미고결 퇴적층들사이에 보다 작은 파편으

로 잔류된 B지괴 당사안산암 블록들은 바닥이 저반과 유리된 관계로 좌향전단력의 영향을 받아 쉽게 반시계방향의 회전운동을 하였던 것으로 해석된다.

### 결론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 1:50,000 지질도 울산도폭에 백악기 불국사동으로 기재된 연구지역내의 黑雲母花崗岩은 특성잔류자기(ChRM)의 편각값에 비추어보아 백악기 말 내지 제3기 초에 定置된 것으로 판단된다. 본 연구와 동일한 암체에 대한 방사능연령 측정 연구결과도 58 Ma와 59.7±1.3 Ma로 보고되어 있어 역시 제3기 Palaeocene의 시대를 지시하고 있다.

2. 정자분지 일원의 특성잔류자기는 일반적으로 약 20°에서 최대 약 80°에 이르기까지 시계방향으로 수평편향 되어있다. 그러나 정자퇴적분지내의 특성잔류자기는 약 20° 반시계방향으로 수평편향 되어있다. 그러나 울산 분지로부터는 안정된 잔류자기가 추출되지 못하였다.

3. 연구지역에서의 잔류자기 수평편향량은 암석의 지질학적 연령보다는 地構造線으로 구획된 각 小地塊에서의 구조운동과 밀접하게 관련되어 있다. 오래된 지층일지라도 소속지괴의 지구조적 상황에 따라 상위의 지층보다 더 작은 편각값을 가진다 (예: 보다 오랜 연령의 울산층과 그 상위의 대안산반암, 보다 오래된 흑운모화강암과 이보다 젊은 화강반암). 따라서 지층의 연령과 잔류자기의 편향량사이에는 비례관계가 성립하지 않는다.

4. 연구지역은 북동방향의 山下斷層과 북북서방향의 尾浦斷層 등의 단층선과 지질특성을 고려하여 네개의 小地塊 (A, B, C, D로 칭함)로 분할되었다 (Fig. 11). 연구지역의 동남부를 접하며 지역기반암 (울산층, 흑운모화강암)과 분지기반암 (당사안산암류)으로 구성된 A지괴는 10~40°가량 시계방향으로 수평편향된 특성잔류자기 편각값을 보인다. 지역기반암인 대안리안산반암과 화강반암으로 구성된 산하단층선 이북의 C지괴에서는 편각의 수평편향량이 보다 큰 40° 내지 80°에 달한다. 한편, 미포단층과 산하단층으로 구획된 연구지역 남서부의 D지괴에서는 C지괴와 유사한 약 25° 평균의 시계방향 편각값이 나타나나 세척실험 성공률이 낮고 예외적으로 약 35° 가량의 반시계방향의 편각값도 나타나서 구조운동의 상황이나 역사가 복잡한 것으로 나타났다.

현재의 지식으로 볼 때 잔류자기의 시계방향 수평편향은 중기 Eocene에서 중기 Miocene에 걸치며 16 Ma 무렵까지 이어진 동해의 북북서-남남동 방향의 확장운동, 그

리고 반시계방향 수평편향은 Middle Miocene인 15 Ma 경 대한해협쪽으로부터 서북서-동남동방향으로 작용했던 압축력에 그 원동력이 있는 것으로 해석된다. 후자의 압축작용은 울산분지 지역을 수백 m 융기시켰으며 B지괴내 당사안산암류 지역과 D지괴내 일부 지역을 반시계방향으로 수평회전시켰다.

5. 斷層線 연결지역의 시료들은 복잡한 세척특성을 보여 단일 특성잔류자기 성분을 분리해 내는데에 어려움이 있다. 그러나 단층과쇄대로부터 멀어짐에 따라 세척실험의 성공률은 증가된다. 이러한 특징은 잔류자기 연구에서 장벽으로 작용하는 것이 사실이지만 역으로는 숨겨진 단층을 알아내는데에 이용될 수가 있다.

6. 亭子堆積盆地내에 분포하는 제3기지층의 분포특성, 즉 퇴적분지의 남서부에는 가장 젊은 신현층이 지배적이다가 북동으로 감에따라 강동층을 거쳐 당사안산암류 등의 보다 고기의 지층으로 대체되는 현상은 분지의 확장시기에 C지괴가 A지괴에 비하여 보다 많은 시계방향의 회전을 하였던 데에 기인한 것으로 해석된다.

### 사사

필자들은 시료채취를 위한 야외작업에서부터 실험실작업 그리고 제도에 이르기까지 다양한 협력을 아끼지 않은 부산대학교 지질학과 지구조 (tectonics) 연구그룹의 여러 학생들, 특히 정현정 학사와 이동호 학사에게 심심한 감사를 표하는 바이다.

### 참고문헌

강희철 (1995) 경상분지에 분포하는 경상누층군 및 화성암류에 대한 고자기학적 연구. 이학박사 학위논문, 부산대학교, 190p.  
 김광호, 도성재, 황창수, 임동성 (1993) 포항분지에 분포하는 연일층군의 고지자기 연구. 광산지질, 26권, p. 507-518.  
 김광호, 도성재 (1994) 양남분지에 분포하는 제3기 지층의 고지자기 연구. 지구과학회지, 15권, p. 36-45.  
 김광호, 도성재, 임동성 (1994) 장기반도에 분포하는 제3기 지층의 고지자기. 지구과학회지, 15권, p. 278-285.  
 김봉균 (1970) 한국의 신 제3기 퇴적층에 관한 연구. 지질학회지, 6권, p. 77-96.  
 김인수 (1990) 포항이남 제3기분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장. 광산지질, 23권, p. 59-71.  
 김인수 (1992) 새로운 동해의 성인모델과 양산단층계의 주향 이동운동. 지질학회지, 28권, p. 84-109.  
 김인수, 강희철 (1989) 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.  
 민경덕, 김원균, 이대하, 이운수, 김인수, 이영훈 (1994) 포항 일원에 분포하는 제3기 암류에 대한 고지자기 연구. 자원환경지질, 27권, p. 49-63.  
 박양대, 윤형대 (1968) 1:50,000 한국지질도 울산도폭 (Sheet-7020-1) 및 설명서. 국립지질조사소.

- 손문, 김인수 (1994) 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질 구조와 분지발달. *자원환경지질*, 27권, p. 65-80.
- 이윤중, 植田良夫 (1976) 한국 경상남도 연양도폭 및 북서부 울산도폭지역 화강암류의 K-Ar 연대. *광산지질*, 9권, p. 127-134.
- 이현구, 문희수, 민경덕, 김인수, 윤혜수, 板谷徹丸 (1992) 포항 및 장기분지에 대한 고지자기, 층서 및 구조연구; 화산암류의 K-Ar 연대. *광산지질*, 25권, p. 337-349.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1988) K-Ar 및 희선트랙법에 의한 포항-감포 일대 화산암류의 암석연령 측정연구. 연구보고서 KR-87-27 동위원소 지질연구, 한국동력자원연구소, p. 51-88.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1991) 한국 동남부지역 화강암류의 희선트랙 및 K-Ar 연령: 화성활동사와 지체구조적 의의. 연구보고서, KR-90-1B-2, 한국동력자원연구소, p. 57-98.
- Halls, H.C. (1976) A least-squares method to find a remanence direction from converging remagnetization circles, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, v. 45, p. 297-304.
- Halls, H.C. (1978) The use of converging remagnetization circles in palaeomagnetism, *Phys. Earth Planet. Int.*, v. 16, p. 1-11.
- Han, J. (1989) Miocene paleomagnetic data from southern Korea: Implication on model for opening of the Japan Sea. M. S. thesis, Texas A & M Univ., 132p.
- Irving, E. (1979) Pole positions and continental drift since the Devonian. In: McElhinny, M. W. (ed.), *The Earth: Its Origin, Structure and Evolution*, Academic Press, p. 567-593.
- Ishikawa, N., Torii, M. and Koga, K. (1985) Counterclockwise rotation of Tsushima island, westernmost area of Southwest Japan, inferred from paleomagnetic study of Oligocene to Miocene rocks. *Rock Mag. Paleogeophys.*, v. 12, p. 44-50.
- Kikawa, E., McCabe, R., Han, J., Min, K.D., Lee, D., Han, H. and Hwang, J.H. (1994) Miocene paleomagnetic results from southeastern Korea. *Tectonophys.*, v. 233, p. 115-123.
- Kim, K. H., Won, J. K., Matsuda, J., Nagao, K. and Lee, M. W. (1986) Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks for Guryongpo area. *J. Korea Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 231-239.
- Torii, M. and Ishikawa, N. (1988) Paleomagnetic results from the Tsushima islands, southern margin of the Japan Sea basin. *J. Paleon. Soc. Korea*, v. 4, p. 37-43.
- Yoon, S. (1976) The Tertiary deposits of the Ulsan Basin, No. 1. Tertiary deposits in the eastern block. *J. Coll. Lib. Arts and Sci., Pusan Nat. Univ.*, v. 15, p. 67-71.
- Zijderveld, J.D.A. (1967) AC demagnetization of rocks: Analysis of results. In: Collinson, D.W., Creer, K.M. and Runcorn, S.K. (eds.), *Methods in Palaeomagnetism*. Elsevier, p. 254-286.

---

1996년 3월 27일 원고접수