

## 경주-울산일원에 대한 지역지질 특성연구 : 울산단층주변 화강암류의 잔류자기와 대자율

김인수\* · 손 문\* · 정현정\* · 이준동\* · 김정진\* · 백인성\*\*

### Geological Characteristics of Kyongju-Ulsan Area : Palaeomagnetism and Magnetic Susceptibility of the Granitic Rocks in the Ulsan Fault Area

In-Soo Kim\*, Moon Son\*, Hyun-Jung Jung\*, Joon-Dong Lee\*,  
Jeong-Jin Kim\* and In Sung Paik\*\*

**ABSTRACT :** A total of 469 granitic samples were collected from 44 sites in the Ulsan fault area, southeast Korea. According to the previous petrographic studies, the granitic rocks have been divided into four groups (Hornblende biotite granodiorite, Hornblende granite, Biotite granite and Alkali-feldspar granite). NRM intensities, values of low field magnetic susceptibility, and magnetic behaviors during stepwise demagnetization experiments suggest rather a three-fold classification: In this scheme, Hornblende granite and Biotite granite are grouped together, as they did not show any significant differences in magnetic characteristics. Based on the Ishihara (1979)'s criterion, Alkali-feldspar granite is classified as ilmenite-series granite, whereas others are classified as magnetite-series granite. In the eastern part of the study area including the Tertiary basin area, declinations of site-mean characteristic remanent magnetizations (ChRMs) show clockwise deflection of more than 30 from the reference direction of east Asia. Both along and in the adjacent region of the Ulsan fault-line, however, no deflection of remanent direction was observed. A boundary line between the deflected and undeflected site-mean ChRMs is defined in this study, which runs roughly parallel to the Ulsan fault-line at the distance of about 6km eastward from the fault-line. We suggest that this newly found boundary line, which we call Yonil tectonic line, released dextral simple shear stress acted in the southeastern part of the Korean peninsula during the opening stage of the East Sea in the Early Cenozoic.

## 서 언

북평, 영해분지를 제외한 한반도 동해안의 제3기 분지들은 양산단층과 울산단층에 규제되어 그 동편에만 나타난다. 이를 근거로 김옥준 등 (1980)은 이 두 단층선을 경계로 연일분지라는 지구구조를 설정한 바도 있다. 지금까지 포항이남 제3기분지 지역에서 수행된 여러 고자기학적 연구결과들 (김인수, 강희철, 1989; Han 1989; 김광호, 도성재, 1994; 손문 등, 1996; 등)에 의하면 이곳 대부분 암

석들의 잔류자기 방향은 약 30°~50° 시계방향으로 편향된 것으로 나타나고 있다. 이러한 잔류자기의 편향현상은 크게는 동해의 成因, 그리고 국지적으로는 양산단층 또는 울산단층의 右向 주향단층운동과 연관을 갖는 것으로 추론되고 있다 (김인수, 1992). 따라서 이러한 가정을 검증하기 위해서는 양산단층과 울산단층의 인접지역에 분포하는 암석들의 잔류자기 편향여부를 알아보는 것이 필수적이다.

최근 강희철 등 (1996)의 양산단층일원의 고자기학적 연구결과에 의하면 양산단층 주변에서는 이와같은 잔류자기의 편향양상이 나타나지 않고 있어 제3기 분지가 진화하는 동안에는 양산단층의 우향 주향운동이 미미하였을 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 제3기분지의 형성과 진화의 과정에서 지구구조적으로 울산단층이 보다 중

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

\*\* 부경대학교 지구환경과학부 (Division of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea)

요한 역할을 하였을 가능성을 시사해준다. 따라서 우리는 울산단층일원 암석의 잔류자기 편향 여부를 규명하는 이 연구를 시도하게 되었다.

양산단층이 오래전부터 중요한 구조선으로 인식되어온 것에 비하여 울산단층에 관한 정보는 미약하다. 울산단층은 김종환 등 (1976)의 Landsat-1 영상판독에 의하여 주요 구조선 (tectolineament)으로 인지된 후, 최현일 등 (1980)이 울산만과 경주시를 잇는 북북서 방향의 7번 국도변 계곡선을 울산단층이라 처음 명명하였다. 최현일 등 (1980)은 단층선 양측에서 암상의 변화가 없고 울산단층이 양산단층에 의해 단절되어 있음을 근거로 양산단층보다 전기의 단층으로 생각하였다.

울산단층의 실제 규모 및 그 연속성은 최근 몇 건의 물리탐사연구에 힘입어 일부 밝혀지고 있다. Baag, Kang (1994)은 항공 자력탐사를 실시하여 울산단층 상부 파쇄대의 최대 깊이와 폭이 각각 1km와 3km인 것으로 보고하였다. 이들에 앞서 Lee, Um (1992)은 지전기 탐사를 통하여 울산단층을 경주시 외동읍 모하리를 기준으로 북부와 남부로 나누고 모하리를 중심으로 파쇄대의 수직 및 수평 규모가 점점 확대된다고 보고하였다. 또한 이들은 모하리 북부의 파쇄대는 북서방향과 북북서방향으로 나누어져 두개의 파쇄대로 분리됨을 지적하였다. 최근에 들어서는 한반도에서의 지진발생 가능성이라는 입장에서 울산단층의 활성여부에 관한 연구들이 진행되고 있다 (Kyung, Okada, 1995; Okada *et al.*, 1995; 류충렬 등, 1996a, b). 이들 연구들은 모두 울산단층을 활성단층으로 규정하고 있으며, 특히 주 활성단층선을 앞선 여러 연구자들의 울산단층선 (울산-경주간 7번 국도 연장선, Fig. 1)보다 약 3km정도 동쪽에 설정하고 있다.

이상의 연구들로 미루어 볼 때, 울산단층의 실존 가능성은 충분한 것으로 보이나 단층의 정확한 규모나 연속성 그리고 운동사에 관한 정보는 아직 미미한 상태로 남아있다. 오직 울산단층은 상당히 넓은 파쇄 폭을 가지며 지질 시대별의 한반도주변 지구조 환경 변화에 따라 주 운동선의 위치를 달리하며 재활성되었을 가능성을 짐작케 할 뿐이다.

본 연구의 목적은 동해연변 제3기분지내에서 관찰되는 잔류자기의 시계방향 편향현상이 보다 서편의 울산단층까지에서도 나타나는가를 알아보고, 그렇게 함으로써 제3기분지가 형성, 진화하는 과정에서의 울산단층의 역할을 파악해보고자 하는 데에 있다. 이러한 목적을 위하여 울산단층선 주변에 널리 분포하는 화강암류의 시료들을 광범위하게 채취하여 잔류자기 연구를 실시하였다. 또한 이에 아울러 암석의 대자율연구도 병행하여 기존의 암석학

적 암상분대와의 관계도 고찰하였다.

### 지질개요

연구지역은 선행연구에서 울산단층선으로 추정하고 있는 북북서 방향의 경주-울산간 7번 국도를 중심으로하여 서편으로 약 6 km, 동편으로는 약 15 km 해안선까지인바, 그 면적은 약 400 km<sup>2</sup> 이다 (Fig. 1). 이 지역의 기저는 경상누층군의 하양층군으로 이루어져 있으며 그 상위는 유천층군과 불국사화강암류가 접하고 있다 (장기홍, 1975). 울산단층선의 동부에는 주로 제3기 화산암류와 퇴적암류가 넓게 분포하고 있으며 울산단층 파쇄대로 추정되는 7번 국도 인접부에는 수백 m에서 수 km의 폭으로 충적층이 피복되어 있다.

하양층군에 해당하는 백악기 퇴적암류는 모량도폭 (김남창 등, 1971)에서는 대구층으로, 울산도폭 (엄상호 등, 1964)에서는 울산층으로 기재되어 있다. 박양대, 윤형대 (1968)에 의하면 이 울산층은 대구도폭의 대구층, 마산도폭의 함안층에 대비되며 적색 세일, 사암, 응회질 사암 그리고 소량의 역암 및 이회암층으로 구성된다. 이들의 대

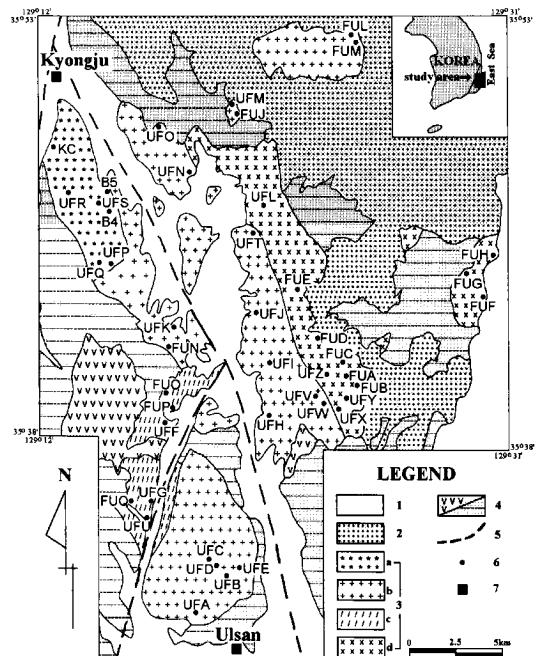


Fig. 1. Geologic and sample site map of the study area. 1. Alluvium, 2. Tertiary strata, 3. Late Cretaceous-Early Tertiary granitic rocks a: Alkali-feldspar granite, b: Biotite granite, c: Hornblende granite, d: Hornblende biotite granodiorite 4. Kyongsang Supergroup, 5. Inferred fault, 6. Sample site, 7. Town.

부분은 주변 화강암류들의 관입으로 열접촉변성되어 호온펠스화 되어 있다. 최현일 등 (1980)은 이 퇴적암류가 울산시 북부에 나타나는 압주상 화강암류를 중심으로 전형적인 돔 (dome)구조를 이루고 있다고 기재하였다. 유천층군에 해당하는 화산암류는 결정질응회암, 용결응회암, 유문암 그리고 래피리응회암으로 구성된다. 이들도 하양층군과 마찬가지로 화강암 관입으로 호온펠스화 되어 있다.

울산단층 주변에는 화강암류가 상당 면적을 점유하고 있는데 암석학자들은 이를 여러 암상으로 세분하고 있으며 그 기원에 대해서 활발한 논의를 전개하고 있다 (박양대, 윤형대, 1968; 이운종, 1980; 윤성효, 황인호, 1990; 고정선, 1994; 이미정 등, 1995; 황병훈, 1995). 금번 연구에서는 화강암류를 이들 암석학자들의 연구결과에 의거하여 각섬석흑운모 화강섬록암, 각섬석 화강암, 흑운모 화강암, 알카리장석 화강암의 네 암상으로 구분하여 기본 지질도를 작성하였다 (Fig. 1). 이에 대한 타당성여부는 각 암상에 따른 대자율과 자연잔류자기 (NRM)강도의 분포 및 자기극성 그리고 자기세척 습성을 근거로 뒤에서 토의해보기로 하겠다.

각섬석흑운모 화강섬록암은 울산단층의 동부에 분포하며 중립 내지 조립의 입자크기를 보인다. 주로 사장석, 석영, 알칼리 장석, 흑운모, 각섬석으로 구성되며 소량의 저어콘 (zircon), 인회석, 엘란나이트 (allanite)와 불투명광물들을 포함하고 있다 (이미정 등, 1995). 황병훈 (1995)은 야외관찰과 암석화학적 연구를 통해 이 화강섬록암을 주변 화강암류에 비해 초기의 분화상으로 해석하였다. 이미정 등 (1995)과 진명식 등 (1990)에 의하면 이 화강암류의 K-Ar 흑운모 연령은 각각 47.6~50.0 Ma, 52.9~53.6 Ma (토함산)이다. 그러나 진명식 등 (1991)은 양북면 효동리 부근에서 저어콘과 인회석 핏선트랙연령을 각각 41.8 Ma와 42.1 Ma로, 김근수 등 (1995)은 감포읍 부근에서 Rb-Sr 전암연령을 42 Ma와 39 Ma로 보다 짧게 보고한 바도 있다.

각섬석 화강암의 주성분 광물은 석영, 정장석, 사장석 그리고 각섬석이며 소량의 흑운모, 녹니석 그리고 불투명광물들이 포함되어 있다. 이 화강암은 흑운모 화강암과 同源마그마 (comagma) 기원이며 그의 연변상인 것으로 기재된 바 있다 (박양대, 윤형대, 1968). 그러나 이미정 등 (1995)은 울산시 북부에 존재하는 흑운모 화강암과 묶어서 울산화강암 복합체 (각섬석 흑운모 화강암)로 독립 기재하였다. 신성천, 진명식 (1995)은 K-Ar 각섬석 방사능 연대측정을 통하여 그 연령을 52 Ma로 보고하였다.

흑운모 화강암은 연구지역내 화강암류 중 가장 넓은 분

포를 보인다. 알칼리 장석이 특징적으로 많이 나타나며 석영, 사장석, 흑운모와 더불어 소량의 저어콘, 인회석 그리고 불투명광물과 엘란나이트도 산출된다 (이미정 등, 1995). 이 화강암은 분포지역에 따라 연구지역의 북부에 위치한 경주시 덕동호와 기림사부근에 고립되어 있는 北部岩體, 울산단층 양면을 따라 평행하게 帶狀분포하는 中部岩體, 그리고 하양층군 퇴적암류를 돔 (dome)시킨 (최현일 등, 1980) 울산시 일원의 南部岩體로 크게 나눌 수 있다. 기존의 방사능 연령측정 결과들을 종합해 보면 北部岩體는 Rb-Sr 전암연령 (김근수 등, 1995)과 휘선트랙연령 (신성천, 진명식, 1995)이 각각 39.7~45.6 Ma와 37~49 Ma이며, 中部岩體는 K-Ar 흑운모연령 (진명식 등, 1991)이 48.7 Ma, 휘선트랙연령과 Rb-Sr 흑운모연령 (신성천, 진명식, 1995)이 각각 42 Ma와 49 Ma이다. 南部岩體에 대해서는 K-Ar 흑운모연령과 휘선트랙 연령이 각각 58~64 Ma와 51~74 Ma로 알려져 있다.

알카리장석 화강암은 주로 알카리장석, 석영, 흑운모와 각섬석 그리고 형석으로 구성되어 있는데 소량의 저어콘과 인회석 그리고 불투명광물들도 나타난다. 리베카이트-아페소나이트 조성의 알칼리 각섬석과 페리-에나이트 조성의 흑운모를 특징적으로 함유하고 있어 전형적인 A-형 화강암으로 해석되고 있다 (이미정 등, 1995; 윤성효, 황인호, 1990). 이미정 등 (1995)은 K-Ar 흑운모와 Rb-Sr 전암연령을 46.5~48.2 Ma로 보고하였다. 그러나 Jin *et al.* (1984)과 진명식 등 (1990)은 같은 방법을 사용하여 보다 오랜 연령인 49.3~65.6 Ma를 얻은 바 있다.

이와같이 화강암류들에서 측정된 여러 방사능연령들을 종합해보면 본 연구지역 화강암류의 정치시기는 흑운모 화강암인 남부암체 일부를 제외하고는 전체적으로 제3기 초 (약 40~65 Ma: Paleocene-Eocene)인 것으로 나타난다. 한편 각 암상별의 방사능연령을 비교해 볼 때, 암상별의 확실한 연령차이를 발견하기는 어렵다.

연구지역의 동부에 분포하는 제3기 화산암류들은 유문암질에서부터 현무암질에 이르기까지 다양한 구성을 보인다. 제3기 퇴적암류들 또한 각 소분지들 (어일분지, 하서분지, 정자분지, 울산분지)마다 복잡하고 다양한 층서를 보인다.

## 시료채취 및 세척실험

연구를 위한 시료채취의 대상은 화강암류이었다. 화강암류들은 울산단층을 따르며 양편 모두에 분포하고 있으며 연구지역에서 비교적 전반적으로 노출되고 있어, 울산단층을 중심으로 잔류자기방향의 측방변화를 알아내기에

**Table 1.** Site-mean ChRM directions of granitic rocks in the Ulsan fault area.

Site	Lithology	n/N	Method of analysis	Before	tilt	correction		Polarity
				D(°)	I(°)	$\alpha_{95}$ (°)	k	
UFL		8/10	AF, TH	249.5	-60.3	2.9	289.5	R
UFX		14/20	AF, TH	183.1	-62.1	3.5	113.8	R
UFY		11/11	AF, TH	189.1	-64.9	2.0	456.3	R
UFZ		8/9	AF, TH	190.1	-18.1	4.3	134.4	R
FUA	Hornblende	13/13	AF, TH	193.1	-60.9	1.5	635.9	R
FUB	biotite	12/12	AF, TH	182.1	-65.9	2.7	217.2	R
FUC	grano-	0/13						
FUD	diorite	10/10	AF, TH	226.8	-55.2	6.3	50.1	R
FUE		14/14	AF, TH	152.5	-27.6	2.8	174.0	R
FUF		11/12	AF, TH	244.5	-45.0	2.6	265.8	R
FUG		3/9	GC, TH	247.1	-50.3	23.8	11.6	R
FUH		0/10						
	mean*		10 sites	204.3	-56.1	14.3	9.6	R
UFF		3/8	AF, TH	181.8	-53.0	3.6	511.9	R
UFG		5/8	GC, AF	6.0	54.0	6.5	116.6	N
UFU	Hornblende	0/12						
FUO	granite	4/10	AF	6.5	60.0	5.7	153.6	N
FUP		1/12	GC	14.7	65.3			N
FUQ		3/10	AF	9.3	55.5	11.6	48.3	N
	mean		5 sites	7.2	57.6	4.4	206.2	N+R
UFA		5/8	AF, TH	7.9	53.8	9.4	44.8	N
UFB		7/11	AF, TH	350.8	52.5	5.3	100.2	N
UFC		3/6	AF, TH	2.8	64.2	5.5	216.2	N
UFD		4/6	AF, TH	345.3	47.8	11.7	35.6	N
UFE		4/7	AF, TH	347.7	62.1	5.0	193.6	N
UFH		4/7	AF, TH	357.1	42.6	5.7	152.6	N
UFI		6/7	AF, TH	358.2	51.7	5.8	96.1	N
UFJ		2/5	AF	358.8	49.2	8.0	153.8	N
UFK		4/9	GC, AF	3.0	58.2	9.9	50.1	N
UFM	Biotite	8/11	AF, TH	216.2	-59.1	5.2	89.5	R
UFN	granite	4/8	GC, TH	169.2	-64.6	13.2	37.5	R
UFO		9/20	GC, AF, TH	350.0	69.8	5.5	72.6	N
UFT		9/15	AF, TH	58.0	40.9	11.2	17.4	N
UFV		0/13						
UFW		5/14	GC, AF, TH	334.5	56.7	6.3	99.9	N
FUJ		8/10	AF, TH	228.0	-63.4	3.3	231.3	R
FUL		5/11	GC, AF, TH	7.8	56.0	6.2	103.1	N
FUM		0/10						
FUN		6/11	AF, TH	182.8	-57.0	4.1	198.6	R
	mean*		17 sites	4.6	57.9	6.2	30.1	N+R
UFP		0/10						
UFQ		0/12						
UFR	Alkali-	4/25	AF	1.9	51.8	5.3	174.0	N
UFS	feldspar	0/16						
KC	granite	3/7	TH	16.3	59.8	15.6	63.8	N
B4		2/3	TH	9.1	52.4	5.0	2454.7	N
B5		4/4	TH	191.4	-55.8	4.3	468.0	R
	mean		4 sites	9.7	55.0	4.3	260.5	N+R
	Total mean*		36 sites	11.4	56.9	4.4	258.7	N+R

N; Number of samples collected, n; Number of specimens used to calculate site-mean ChRM. Note: The stated mean values have no significant meaning, because the petrographic groups either include unusually shallow (<30°) site-mean inclinations or is a mixture of both deflected and undeflected site-mean declinations.

용이할 것으로 기대되었다. 반면에 경상누층군 퇴적암류와 화산암류들은 화강암류의 定置동안 접촉 열변성작용으로 많은 부분들이 호온펠스화되어 있어 연구대상에서 제외하였다. 총 시료수는 44개 지점 469개인데 암상별로는 각섬석흑운모 화강섬록암 12개지점 143개, 각섬석 화강암 6개지점 60개, 흑운모 화강암 19개지점 189개 그리고 알카리장석 화강암 7개지점 77개이었다 (Table 1, Fig. 1).

대자율 측정을 위해서는 영국 Molspin사의 Minisep 대자율측정기를 사용하였으며 잔류자기 측정을 위해서는 Molspin사의 Minispin spinner magnetometer를 사용하였다. 고자기학의 일차목표인 특성잔류자기(ChRM: characteristic remanent magnetization) 방향을 알아내기 위해서는 각 시료들에 대해 단계적 교류자기세척실험과 열자기세척실험을 수행하였다. 교류자기세척은 영국 Molspin사의 교류세척기를 이용하였으며 열자기세척은 미국 Schonstedt사의 TSD-1 열세척기를 사용하였다. 실험의 진행은 기본적으로 김인수 (1984)에 준하여 실시하였는데 각 세척단계의 직후에는 벡터 다이어그램 (Zijderveld, 1967), 세척강도에 따른 자기강도 변화곡선 그리고 等積투영망 (equal-area net)들을 통하여 세척의 효과를 관찰하였다.

**세척실험 결과**

이차잔류자기 성분의 제거를 위한 자기세척실험의 결과들은 Table 1과 Fig. 8에 요약 및 도시되어 있다. 아래에는 각 암상별로 세척실험의 경과를 보고한다.

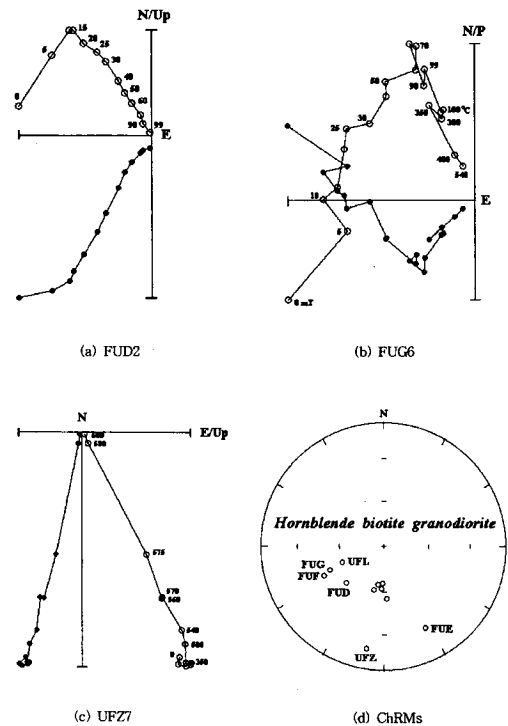
**각섬석흑운모 화강섬록암**

시료채취지점은 12개 (UFL, X, Y, Z, FUA, B, C, D, E, F, G, H)로 모두 울산단층선의 동부에 위치한다. 총 143개의 시료들 중 77개의 시료에 대해서 교류자기세척실험을, 나머지 66개에 대해서 열자기세척실험을 실시하였다.

시료들의 자연잔류자기 (NRM) 강도는 평균 296.6 mA/m이었으며 총대자율 (bulk magnetic susceptibility)은 평균  $1,603.2 \times 10^{-6} \text{G/Oe}$ 이었다 (Fig. 7). 일반적으로 화강암과 현무암의 평균 자연잔류자기 강도가 각각 100 mA/m, 1,000 mA/m으로 알려지고 있는데 (Butler, 1992) 비하여 본 연구지역의 화강암은 다소 높은 자화강도를 갖는 편이다. Ishihara (1979)는 대자율의 크기  $50 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$ 을 기준으로하여 화강암류를 자철석계열

(magnetite-series)과 티탄철석계열 (ilmenite-series)로 분류한 바 있는데 이에 따르면 본 연구지역의 각섬석흑운모 화강섬록암은 자철석계열의 화강암류에 해당된다.

교류자기세척실험 결과, 9개 지점 (UFL, X, Y, Z, FUA, B, D, E, F)에서는 대체로 비슷한 세척양상이 나타났다. 이곳 시료들에서의 잔류자기의 방향은 세척강도 약 20~30 mT에서 안정중점에 도달하여 최대 세척강도인 100 mT에 이르러 자화강도의 90%이상이 소멸되었다 (Fig. 2a). 이와같이 비교적 쉽게 특성잔류자기 (ChRM) 방향이 나타나는 경우에 반하여, 다른 3개 지점 (FUC, G, H)의 경우에는 세척강도 약 30 mT 근처에서부터 자화방향이 산란되어 특성잔류자기를 구해낼 수 없었다. 잔류자기방향이 안정중점에는 도달하지 못하고 등적투영망 상에서 재자화원 (circle of remagnetization)을 그리는 시료에 대해서는 Halls (1976, 1978)의 대원분석법을 적



**Fig. 2.** Examples of successful demagnetization of Hornblende biotite granodiorite. (a) AF demagnetization. (b) AF demagnetization followed by thermal demagnetization. (c) Thermal demagnetization. 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. (d) Site-mean ChRM directions obtained by great-circle as well as stable endpoint methods. All the stereonets in this paper are equal-area lower hemisphere projections in the geographic coordinates.

용하여 특성잔류자기방향을 구해내었다. 한편, 일부의 시료에서는 최대 교류세척에도 불구하고 초기 자연잔류자기의 35% 정도만이 감소되어 열자기세척실험의 속행이 필요했다 (Fig. 2b).

열자기세척실험 결과는 교류자기세척실험에서와 마찬가지로 9개 지점 (UFL, X, Y, Z, FUA, B, D, E, F) 시료들의 대부분이 500~550°C에서 안정종점방향에 도달되었다. 세척초기에는 자화강도의 변화가 거의 없다가 약 570°C이후에 급격한 자화강도의 감소가 나타나고 580°C에 이르러서는 자화강도 90% 이상이 감소된 후, 600°C에는 거의 원점에 도달되었다 (Fig. 2c). 나머지 세지점 (FUC, G, H)의 경우에는 교류자기세척실험에서와 마찬가지로 세척강도를 높임에 따라 자화방향이 산란되는 경우가 대부분이었으며, 일부 시료들은 등적투영망상에서 재자화원을 그리기도 하였다.

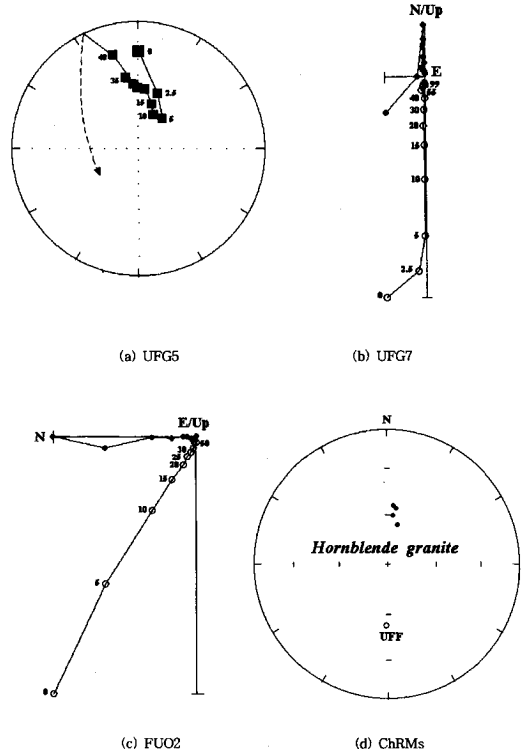
이상의 결과들로 볼 때 FUC, FUG, FUH를 제외한 9개 지점들에서 1차잔류자기를 지배하는 주 자성광물은 티탄 함량이 적은 거의 순수한 자철석인 것으로 판단된다. 그러나 FUC, FUG, FUH 세 지점의 경우에는 암상이 조립질이며 파쇄면을 따라 일반암맥이나 열수광맥들이 충전 및 풍화변질되어 있어, 2차적 화학잔류자기 (CRM)나 열점성잔류자기 (TVRM)가 생성되고 1차잔류자기의 보존이 힘들게 된 것으로 추정된다.

각 지점의 평균 ChRM들을 등적투영망에 도시하면 Fig. 2d와 같다. 이들의 극성은 모두 역자화이다.

**각섬석 화강암**

시료채취는 6개 지점 (UFF, G, U, FUO, P, Q)에서 실시되었는데 모두 울산단층의 서편에 위치하면서 동래단층에 인접해 있다. 총 60개의 시료들 중 28개에 대해서는 교류자기세척을 실시하였고 나머지 32개에 대해서는 열자기세척을 실시하였다. NRM강도는 평균 80.3 mA/m이었고 총대자율의 평균은  $336.2 \times 10^{-6} \text{G/Oe}$ 이었다. 앞서의 각섬석흑운모 화강섬록암에 비해 자화강도와 대자율 모두가 현저하게 낮은 값을 가지나 역시 Ishihara (1979)의 자철석계열 화강암에 해당된다 (Fig. 7).

교류자기 및 열자기세척실험을 실시한 결과, 총 60개의 시료 중 13개에서만 안정종점이나 재자화원 (Fig. 3a)이 나타나서 실험성공율이 저조한 편이었다 (Table 1). 대부분 시료들은 교류자기세척강도 약 30 mT, 열자기세척강도 약 300°C 부근에서부터 불안정한 자화거동을 보여주었다. 그러나 일부 시료들은 10~20 mT의 낮은 세척단계에서 안정종점방향에 도달하였고 70 mT에 이르러서는 거의 원점



**Fig. 3.** Examples of successful demagnetization of Hornblende granite. (a) AF demagnetization result showing a great-circle trajectory. (b), (c) AF demagnetization. (d) Site-mean ChRM directions obtained by great-circle as well as stable endpoint methods.

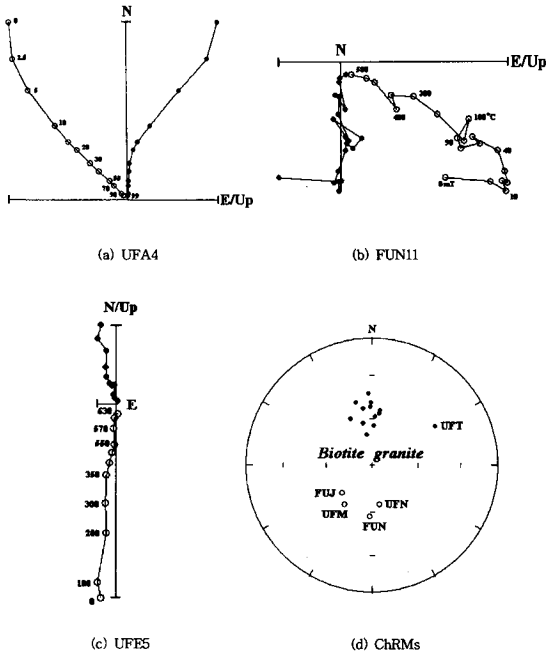
으로 향하였다 (Fig. 3b, c). 한편, 열자기세척의 경우 대략 550~600°C 사이에서 자화강도의 대부분을 잃어 앞서의 각섬석흑운모 화강섬록암의 경우처럼 비교적 순수한 자철석이 주 자성광물을 이루고 있는 것으로 판단된다.

총 5개 지점중에서 1개 지점에서는 역자화를, 4개 지점에서는 정자화의 극성을 보여주었다 (Fig. 3d).

**흑운모 화강암**

시료채취 지점은 19개 지점이었는데 10개 지점 (UFH, I, J, M, N, O, T, FUJ, L, M)은 울산단층선의 동편에, 나머지 9개 지점 (UFA, B, C, D, E, K, V, W, FUN)은 서편에 위치하여 있다. 평균 NRM강도는 91.8 mA/m이었으며, 평균 총대자율은  $440.8 \times 10^{-6} \text{G/Oe}$ 로써 이 흑운모 화강암 역시 Ishihara (1979)의 자철석계열 화강암으로 분류된다 (Fig. 7). 총 189개의 시료들 중 92개의 시료를 교류자기세척실험에, 나머지 97개를 열자기세척실험에 사용하였다.

교류자기세척을 실시한 결과, 13개 지점 (UFA, UFB,

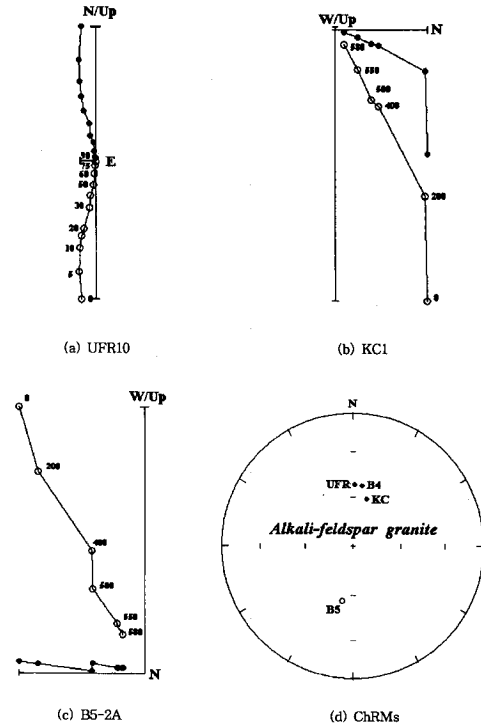


**Fig. 4.** Examples of successful demagnetization of Biotite granite. (a) AF demagnetization. (b) AF demagnetization followed by thermal demagnetization. (c) Thermal demagnetization. (d) Site-mean ChRM directions obtained by great-circle as well as stable endpoint methods.

UFC, UFD, UFE, UFH, UFI, UFJ, UFM, UFO, UFT, FUJ, FUN)에서 비슷한 세척양상이 나타났는데 대부분 시료들이 20~30 mT의 낮은 세척강도에서 안정종점에 도달하였고 40~50 mT에서는 초기NRM 강도의 80% 이상이 감소되며 원점에 도달되었다 (Fig. 4a). 그러나 일부 시료들에서는 최고 교류세척 (100 mT)에도 불구하고 자화강도가 완전히 줄어들지 않아 열자기세척실험을 계속하여 ChRM을 구하였다 (Fig. 4b). 일부 시료들에서는 재자화원도 나타났다. 다른 지점의 시료들은 세척강도 20 mT에서부터 잔류자기 방향이 산란되어서 안정종점방향을 구할 수 없었다.

열자기세척의 경우 350~400°C에서 안정종점방향에 도달하였고 550°C에서는 초기NRM 강도의 70% 이상이 감소되었으며 600°C 근처에 이르러 거의 원점에 도달하였다 (Fig. 4c). 그러나 UFJ, UFK, UFV, FUM의 네지점 시료들은 열자기세척에서도 불안정한 거동을 보여 ChRM을 구해낼 수 없었다. 이상의 세척실험결과 UFV, FUM을 제외한 이 흑운도 화강암 17개 지점들에서의 주자성광물은 티탄함량이 적은 티탄자철석계열 (titano-magnetite series)의 광물인 것으로 나타났다.

지점평균 ChRM들은 (Fig. 4d) 4개 지점에서 역자화를,



**Fig. 5.** Examples of successful demagnetization of Alkali-feldspar granite. (a) AF demagnetization. (b), (c) Thermal demagnetization. (d) Site-mean ChRM directions obtained solely by stable endpoint method.

13개 지점에서 정자화를 보여주었다.

### 알카리장석 화강암

시료채취 지점은 7개 지점 (UFP, Q, R, S, KC, B4, B5)이었는데 모두 울산단층선 서편에 위치하여 있다. 이 화강암은 양산단층과 울산단층이 사교하는 지점에 고립되어 있어 전단대가 발달되고 광맥들도 많이 관찰된다. 총 77개의 시료들 중 40개는 교류자기세척을, 37개는 열자기세척실험을 실시하였으나 오직 13개의 시료에서만 ChRM이 유리되었다.

NRM강도는 평균 13.8 mA/m이었으며, 총대자율의 평균은  $79.8 \times 10^{-6} \text{G/Oe}$ 로 다른 암상들에 비해 현저히 낮아 이 화강암은 유일하게 Ishihara (1979)의 티탄철석계열 (ilmenite-series)로 분류되었다 (Fig. 7).

교류자기세척실험에서 대부분의 시료들은 세척강도가 증가됨에 따라 자화강도가 급격히 감소하여 20~30 mT에 이르러 초기NRM 강도의 80% 이상이 감소되고 그 이후에는 자화방향이 산란되어 ChRM의 추출에 실패하였다. 오

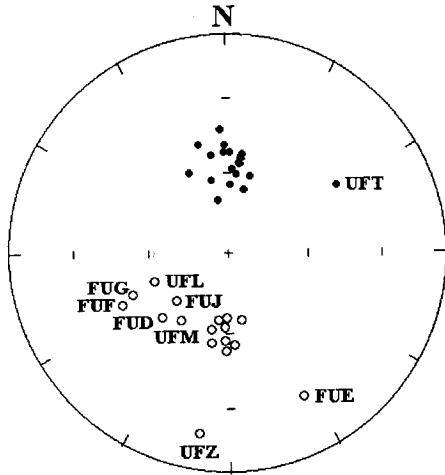


Fig. 6. Site-mean ChRM directions from all granite sites of the study area. Solid (open) symbols represent sample sites with positive (negative) ChRM inclination.

직 UFR지점의 4개 시료에서만 30~40 mT의 처리에서 안정중점이 나타났다 (Fig. 5a).

열자기세척에서는 KC, B4와 B5 지점의 일부 시료들이 약 400°C부근에서 안정중점방향에 도달되고 600°C이전에 원점 가까이 도달하는 것이 관찰되었다 (Fig. 5b, c). 이로써 티탄자철석계열 (titanomagnetite series) 광물이 이 알카리장석 화강암의 주자성광물을 이루고 있음을 알 수 있었다. 다른 지점 대부분의 시료들은 350~400°C의 열세척에서 90%이상의 자화강도의 급격한 감소를 보이고 방향 또한 산란되어 ChRM을 구하는 것이 불가능하였다.

이 알카리장석 화강암의 1개 지점은 역자화로, 3개 지점은 정자화로 자화되어 있다. 지점평균 ChRM은 95% 신뢰도 내에서 역전검사를 통과한다 (Fig. 5d).

이상과 같은 세척실험 결과, 연구지역 총 44개 지점 중 37개 지점에서 평균 ChRM을 구할 수 있었으며 17개 지점은 역자화로, 20개 지점은 정자화로 자화되어 있음이 밝혀졌다 (Fig. 6). 주목할 만한 점은 울산단층선 연변부와 서쪽에서는 잔류자기의 편향현상이 전혀 나타나지 않고 있으며 울산단층선으로부터 동편으로 약 6 km이상이 되어야 비로소 잔류자기의 시계방향 편향현상과 낮은 북각이상 (UFZ, FUE)이 관찰된다는 사실이다.

### 결과해석과 토의

#### 화강암류의 암상분대

본 연구에서는 우선 기존의 암석기재학적, 암석화학적

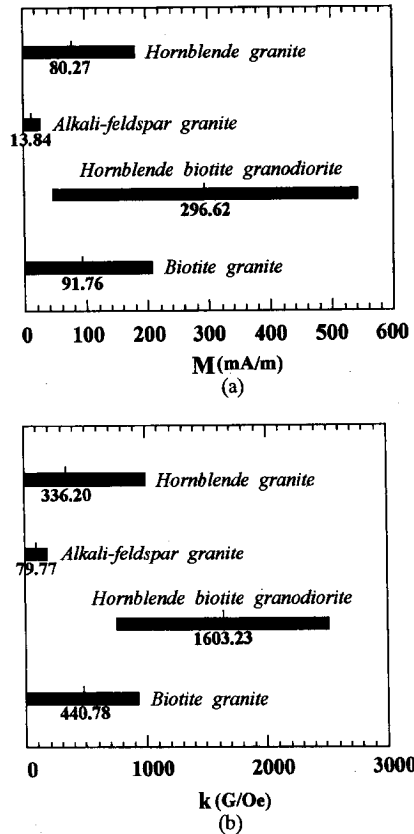


Fig. 7. (a) Distribution of NRM intensity ( $M$  in  $\text{mA m}^{-1}$ ) according to the petrographic rock phases, (b) Distribution of bulk magnetic susceptibility ( $k$  in  $\text{GOe}^{-1}$ ) according to the petrographic rock phases. Numbers and bars represent mean values and standard deviations, respectively.

연구들 (박양대, 윤희대, 1968; 이윤중, 1980; 윤성효, 황인호, 1990; 고정선, 1994; 이미정 등, 1995; 황병훈, 1995)을 근거로 화강암류들을 각섬석 흑운모 화강섬록암, 각섬석 화강암, 흑운모 화강암 그리고 알카리장석 화강암의 네 암상으로 분류하였다. 암상분포의 공간적 분류작업은 심성암체의 定置機構 (emplacement mechanism)를 이해하는 근본으로 인정되어 근래들어 새로운 관심을 불러 일으키고 있다 (Hutton, Reavy, 1992; Paterson, Fowler, 1993; Tobisch, Cruden, 1995; Gleizes *et al.*, 1995). 본 연구에서는 총대자율 및 초기NRM 강도와 분포, 그리고 자기세척흡성과 磁化極性 등의 암석자기학 내지 고자기학적 파라미터들을 통하여 위와 같은 암석학적 암상구분과의 연관성을 검토해보았다.

Fig. 7은 실험에서 얻어진 NRM강도 ( $M$ )와 체적총대자율 ( $k$ )의 분포를 각 암상별로 나타낸 그래프이다. 분포



범위를 알려주는 막대의 길이는 표준편차를 나타내며 숫자는 평균값이다. 우선 각섬석흑운모 화강섬록암 (hornblende biotite granodiorite)의 경우, 자화강도와 대자율의 평균값이 가장 크고 표준편차 또한 크므로 다른 암상과 확연히 구분된다. 이 암석의 자화강도와 대자율의 평균값이 큰 것은 화강암류의 색지수 (color index)와 관련되어 자철석의 함량이 가장 높음을 지시하는 것이다. 한편, 이들 값의 표준편차가 큰 것은 시료의 변질정도에 관련되었을 가능성이 있다. FUG지점의 경우 매우 낮은 평균 자화강도 ( $6.8 \text{ mA/m}$ )와 대자율값 ( $6.0 \times 10^{-6} \text{ G/Oe}$ )을 보이는데 실제로 노두가 상당히 풍화변질되어 있는 것이 야외에서 관찰되었다.

각섬석 화강암 (hornblende granite)과 흑운모 화강암 (biotite granite) 사이에는 자화강도 및 대자율의 평균값이나 분포범위가 유사하여 서로간의 구별이 어렵다. 그러나 이 값들은 앞서의 화강섬록암이나 아래의 알카리장석 화강암의 값들과 확연히 구별되고 있다.

알카리장석 화강암 (alkali-feldspar granite)은 가장 낮은 자화강도와 대자율을 보인다. 암석의 자화강도나 대자율의 크기를 결정하는 요인들은 여러 가지가 있을 수 있겠으나 무엇보다도 자철석의 함량에 직접 비례되는 것으로 알려져 있다 (Ishihara, 1979; Tarling, Hrouda, 1993; 등). 따라서 알카리장석 화강암에는 다른 암상에 비교하여 상대적으로 자철석이 결핍되어 있음을 알 수 있다. 이는 이 암석의 기원과 무관하지 않을 것이다. 한편, 총대자율 평균치를 단순히 Ishihara (1979)의 기준에 비교하면 알카리장석 화강암은 티탄철석계열 (ilmenite-series)로 분류되어 자철석계열 (magnetite-series)인 다른 암상들과 구별되고 있다.

한편, 특성잔류자기의 자화극성 (magnetic polarity)을 암상에 따라 비교해 보면, 각섬석흑운모 화강섬록암은 모든 지점에서 역자화를 보이는 특이성을 갖는다. 이에 반하여 나머지 암상들에서는 대부분 정자화가 우세하였다 (Table 1). 이는 각섬석 흑운모 화강섬록암의 정치시기가 다른 암상들과 다르다는 것을 시사하고 있다.

각 암상별에서의 자기세척 습성들은 거의 비슷하였다. 교류자기세척에서는 대부분 약 20~40 mT의 약한 세척강도에서 자화방향의 변화가 안정중점에 도달하였으며, 열 자기세척에서도 약 300~500°C에서 안정중점에 도달하고 600°C이전에 90%이상의 자화강도를 잃는 현상을 공통으로 보여주었다. 이러한 항자력 (coercivity)과 폐색온도 (unblocking temperature)의 정보로 미루어보아 모든 암상들에서의 주 자성광물은 티탄자철석계열 (titanomagnetite series)의 광물인 것으로 판단된다.

이상에서 본 바와 같이 각섬석흑운모 화강섬록암과 알칼리장석 화강암은 암석자기학 내지 고자기학적 특성에서 다른 암상들과 확연히 구분되나, 각섬석 화강암과 흑운모 화강암의 경우에는 서로의 차이가 확인되기 어려웠다. 이와같은 근거로 후자인 각섬석 화강암과 흑운모 화강암을 동일암상으로 간주한다면 울산단층 주변의 화강암류는 세가지의 암상으로 분대되며 모든 암상이 울산단층선에 거의 평행한 대상분포를 하는 것으로 단순화 된다 (Fig. 1).

### 잔류자기의 방향

지질시대에 따른 북극위치의 변화 (APWP: apparent polar wandering path) 연구들에 의하면 제3기초 (Paleogene-Early Miocene)의 동아시아 지자기 방향은 오늘날의 지자기 방향과 거의 일치하는 것으로 알려져 있다 (Besse, Courtillot, 1991; Irving, 1977). 이를 염두에 두고 울산단층일원 화강암류의 특성잔류자기 (ChRM) 방향들 (Fig. 6, 8, Table 1)을 크게 세 가지 방향군으로 구분

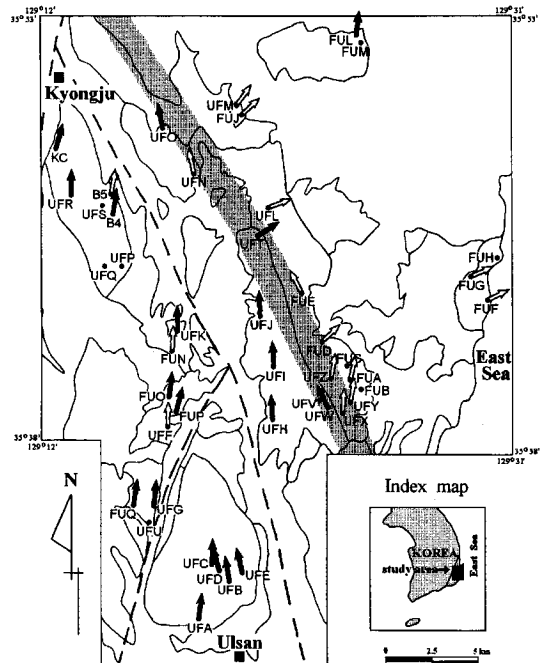


Fig. 8. Summary map showing declination of site-mean ChRMs. For exact values refer to Table 1. Solid (white) arrows represent the sample sites with normal (reversed) ChRM polarity, whereas solid dots without arrow represent the sample sites from which no stable ChRM direction could be obtained. Note a shadow band which represents the newly found tectonic line (=Yonil tectonic line).

하였다. 즉, 첫째는 편각이 현재의 지자기 방향으로부터 30°이상 시계방향으로 편향된 방향군, 둘째는 영년변화 오차의 한계내 (Butler, 1992)에서 현재의 지자기 방향과 일치하는 방향군, 그리고 세째는 복각이 30°이하로 특이하게 낮은 방향군이 그것이다. 이들에 대해서 아래에 토의해 보기로 한다.

### 30°이상 편향을 보이는 ChRMs

이는 총 7개 지점에서 나타났는데 이 지점들은 한결같이 울산단층선으로 추정되는 7번 국도선으로부터 동쪽으로 최소 약 6km이상 떨어져 위치해 있다 (Fig. 8). 암상별로는 각섬석 흑운모 화강섬록암 4개지점 (UFL, FUD, FUF, FUG)과 흑운모 화강암 3개 지점 (UFM, T, FUJ)이 이에 해당되며, 6개지점에서는 역자화 극성이 그리고 나머지 1개 지점에서는 정자화의 극성이 나타났다 (Fig. 6).

이러한 ChRM들의 평균 잔류자기 방향은  $D=236.6^\circ$ ,  $I=-54.0^\circ$ ,  $\alpha_{95}=7.1^\circ$ ,  $k=55.3$ 으로써 약 35~70°의 범위에서 평균 약 55 시계방향으로 편향된 양상이다. 이러한 결과는 제3기분지 지역내 16 Ma이전의 암석에서 관찰되고 있는 전반적인 현상으로써 (김인수, 강희철, 1989; Han, 1989; 김광호, 도성재, 1994; 손문 등, 1996) 동해의 확장 에 수반된 우향전단작용 (dextral simple shear)으로 동해안에 제3기분지가 裂開되고 진화되는 대사전에 연관된 것으로 해석되고 있다 (김인수, 1992). 그렇다면 이 우향 전단력의 영향범위인 서쪽으로는 한계선은 어디인가? 이에 대한 대답으로 상상할 수 있는 응력 해소 (release)의 주 경계선 (tectonic boundary)은 우선 양산단층선과 울산단층선이 될 수 있다. 그러나 양산단층지역에서의 강희철 등 (1996)의 고자기 연구결과와 울산단층지역에서의 본 연구결과에 의하면 이 두 단층선이 잔류자기 편향여부를 한계짓는 경계선이 아니라는 것이 드러났다. 따라서 이 두 단층선은 동해쪽으로부터의 응력을 해소했던 주 구조경계선이 아닌 것이다. 따라서 지금까지 울산단층선으로 추정되어 온 울산과 경주를 연결하는 7번 국도선은 최소한 신생대동안에는 주된 단층운동선이 아니었으며, 대신 이로부터 동편으로 약 6km떨어져 울산단층선과 대략 평행하게 달리는 새로운 구조선이 주 단층선이 되는 것으로 부각된다. 구체적으로 말하여 이 구조선 (tectonic boundary)은 잔류자기 편향현상이 나타나는 지점들 중 가장 서편에 위치한 UFM, UFJ, UFL, UFT 그리고 FUD 지점을 연결하는 선으로써 7번 국도를 기준으로 약 6 km 동편에 위치하는 선, 즉 경주시 덕동, 토함산 동산능선 그리고 경주시 양남면 석촌리 용암마을을 연결하는 선

이다. 본 고자기학적 연구의 결과로써 새롭게 상정된 이 구조선의 실존여부나 변위운동의 성격 그리고 변위정도 등의 문제들은 차후의 야외조사로써 규명될 것이다. 그러나 본 연구를 수행하는 과정에서 필자들이 국지적으로 관찰한 바에 의하면 이 선을 따라 수십m 폭의 심한 파쇄대가 나타나고 있었으며 심지어는 직경 수십m에 달하는 특이한 화강암 거력의 集塊들이 상당구간 수평적 수직적으로 연속분포되어 있는 등의 사실들이 발견되었다. 이들은 이 구조선의 존재를 지시하는 야외현장적인 단서로 생각 된다.

### 편향되지 않은 ChRMs

연구지점들 중 28개 지점에서는 별다른 ChRM 편각의 편향이 관찰되지 않았다. 이들 지점들을 위치별로 살펴보면, 많은 수가 7번 국도를 중심으로 서쪽편에 위치하는데 11개 지점은 동쪽편에 위치한다 (Fig. 8). 동편 11개의 지점중 10개 지점은 7번 국도선으로부터 약 6km이내에 위치하고 있으며 1개 지점 (UFL)은 제3기분지구내에 포함된다. 이로보아 편향여부를 나누는 주 경계선이자 제3기분지 발달의 한계선이 7번 국도에서 약 6 km 동쪽에 있음이 분명하다.

이들 중 9개 지점은 역자화되어 있고, 19개 지점은 정자화되어 있었다 (Table 1, Fig. 6). 이들 전체의 평균 ChRM방향은  $D=1.4^\circ$ ,  $I=57.7^\circ$ ,  $\alpha_{95}=2.7^\circ$ ,  $k=96.5$ 이며 역전점사를 통과한다. 이에 의한 자북의 위치는 87.1 N, 151.9 E,  $dp=2.9$   $dm=4.0$ 으로써 제3기초의 유라시아 APWP연구 (Besse, Courtillot, 1991; Irving, 1977)로 알려지고 있는 자북의 위치와 오차의 한계내에서 일치하고 있다. 이는 본 연구의 이 ChRM방향이 1차잔류자기 방향임을 입증해주는 것이며, 아울러서 연구대상 화강암류들이 정치된 이후 별다른 경동 (tilting)이나 수평회전운동을 받지 않았다는 것을 의미한다. 최현일 등 (1980)은 양산단층과 울산단층사이 지괴의 지질과 지화학연구에서 화강암체의 관입으로 주변 퇴적암에 전형적인 돔 (dome)구조가 생성되었음을 지적한 바 있다. 그들의 지질도를 살펴보면 이 도움구조는 생성이후에 변형된 바 없었음이 확실하다. 이는 화강암체의 관입이후 이 지역에서 지구조적 변형 작용이 거의 없었다는 것을 설명하는 것이다.

### 30°이하의 복각을 가지는 ChRMs

2개 지점 (UFZ, FUE)이 이에 해당된다. 이 두 지점은 앞서 설정한 신생대 단층운동의 주 구조선 (즉, 울산-경주

를 연결하는 7번 국도선으로부터 동편으로 약 6 km떨어진 북북서 주향의 구조선)상에 놓여 있음이 주목된다 (Fig. 8). 이러한 이상복각의 현상은 단층선 주변에서 일어날 수 있는 파쇄작용에 의한 소규모 지괴 (block)의 경동운동에 의한 것으로 추정된다.

### 지구조적 고찰

본 연구결과의 가장 주된 요점은 종래로부터 알려졌던 울산단층선, 즉 울산과 경주를 연결하는 7번 국도선의 주변에서는 잔류자기의 편향현상이 나타나지 않는다는 것이었다. 이러한 결과는 강회철 등 (1996)에 의한 양산단층지역에서의 연구결과와 부합되는 것으로서 제3기분지의 형성에 중요한 역할을 하였을 것으로 추정되던 (한종환 등, 1987; 김인수, 1992) 양산단층과 울산단층의 역할에 대해서 의심을 가지게 한다.

여기서 우리가 확실히 하고 싶은 것은 양산단층지역이나 본 연구지역에서의 고자기학적 사실이 양산단층과 울산단층에서의 주향이동운동의 가능성을 완전히 배제하는가 하는 점이다. 이는 주향이동단층에 의한 변위량이 크더라도 실제로는 주변의 지괴들이 회전되지 않을 가능성이 있기 때문이다. 이러한 가능성은 크게 3가지 정도가 유추된다 (Platzman *et al.*, 1994). 첫째는 변위 (slip)를 일으키는 단층면이 짝 (pair)을 이루지 못하여 하나의 단층면에만 변위가 집중되는 경우이고, 둘째로는 단층면들이 짝을 이루기는 하나 각 지괴들이 길쭉한 모양 (elongated shape)을 하고 장축방향이 단층선과 평행한 경우이다. 이 두 경우는 지괴의 회전운동이 지괴경계부에서의 마찰력 (traction)에 기인한다는 생각 (Beck, 1976, Luyendyk *et al.*, 1985; 등 다수)에 기초를 두고 있다. 셋째로는 단층의 역방향 재활성 (reactivation)으로 우향 주향운동과 좌향 주향운동이 중복되어서 지괴의 회전량이 상쇄되었을 가능성도 생각해볼 수 있다. 그러나 울산단층과 양산단층은 각각 수개의 단층면을 가진 단층대 (fault zone)를 이루고 있으며 서로 인접하여 사교하고 있음이 알려진 이상 앞선 두 가정에 의한 가능성은 배제될 수 있을 것이다. 또한 7번 국도의 동쪽 6 km (以東)에서는 확실한 지괴의 회전이 확인되어 있으므로 재활성에 의한 지괴회전량의 상쇄라는 가정도 논리적이 못하다. 따라서 본 연구에서 나타난 사실은 울산-경주를 잇는 7번 국도선 (즉, 종래의 "울산단층"선)이 신생대 지구조운동의 주요 구조선이 아님을 지시하는 것으로 받아들여져야 할 것이다. 대신에 신생대 제3기분지의 발달에 지대한 역할을 하였던 주 지구조운동선은 이 울산단층선보다 약 6

km 동쪽에 위치하면서 울산단층과 동일한 북북서의 주향을 가진, 지금까지 알려지지 않았던 새 구조선이다. 이 새 구조선은 제3기 연일운동과 깊은 관련을 가진 것이므로 우리는 이를 延日構造線이라고 부르려 한다. 한편 이 연일구조선 동편의 제3기 정자분지에서도 이 방향의 단층이 분지발달에서 중요한 역할을 하였던 것으로 밝혀진 바 있다 (손문, 김인수, 1994). 정자분지의 분포를 규제하는 이 북북서방향의 단층은 尾浦斷層으로 명명되어 있는데 (손문 등, 1996), 그 노두에서는 주향이동단층의 특징으로써 널리 알려져 있는 (Bartler *et al.*, 1981; 등 다수) 꽃다발구조 (flower structure)가 관찰된다 (손문, 김인수, 1994). 본 연구에서 새로 정의된 이 연일구조선은 그 활동시기와 활동양식이 미포단층의 경우와 같을 것으로 추정된다.

앞선 논의와 같이 본 연구의 결과들은 울산단층선 동편의 새로운 구조선 (연일구조선)이 우리나라 동해안의 신생대 지구조발달에서 선도적인 역할을 하였음을 강하게 시사하고 있다. 그러나 울산-경주 국도변을 따르는 울산단층선의 중요성을 완전히 배제할 수는 없다. 울산단층선 지역에서 실시된 지구물리탐사결과에 의하면 (Lee, Um, 1992; Baag, Kang, 1994) 이 국도선을 따라 비교적 넓은 파쇄대의 존재가 나타난다고 한다. 또한 본 연구지역 남쪽에서는 이 국도선에 접하여 제3기 울산분지가 발달하여 있고 주변의 화강암류에서는 잔류자기의 시계방향 편향이 보고되어 있어 (손문 등, 1996) 울산-경주간 계곡선을 따르는 지각 균열대의 존재는 의심의 여지가 없다. 아울러 이 울산단층선 자체 (proper)로부터 동쪽으로 약 1~2 km 벗어나고 있는 여러 야외조사 연구들은 제4기의 정단층과 역단층 활동의 증거들을 속속 보고하고 있다 (Kyung, Okada, 1995; Okada *et al.*, 1995; 류충렬 등, 1996a, b). 따라서 제3기분지가 생성 발달하는 동안, 그리고 제4기에 이르러서 이 울산단층대를 따르는 최소한의 단층활동은 배제될 수가 없는 것이다.

### 결론

본 연구에서는 울산단층일원의 총 44개 지점에서 469개의 화강암류 시료를 채취하여 잔류자기와 대자율 연구를 수행하였다. 그 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 기존의 암석기재 및 암석화학적 연구들을 종합할 때 연구지역의 화강암류는 각섬석 흑운모 화강섬록암, 각섬석 화강암, 흑운모 화강암 그리고 알카리장석 화강암의 네 암상으로 구분된다. 이들 암상별로 대자율과 자연잔류자기의 강도 그리고 자화극성과 세척습성 등을 비교하였

을 때, 각섬석 흑운모 화강섬록암과 알카리장석 화강암은 현저하게 다른 부류로 구별되었다. 그러나 각섬석 화강암과 흑운모 화강암은 상호 거의 동일한 고자기학적 특성을 나타내었다. 따라서 고자기학적 전지에서는 연구지역의 화강암류는 세 유형으로 구분된다. 그렇게 하였을 때 이들 암상은 울산단층선에 평행한 대상분포를 보인다.

2. Ishihara (1979)의 대자율 강도에 따른 화강암의 분류안을 따를 때, 연구지역 화강암류 중 알카리장석 화강암은 티탄철석계열 (ilmenite-series)에 속하며 나머지 세 암상은 자철석계열 (magnetite-series)에 속한다.

3. 종래부터 울산단층선으로 알려진 울산-경주간 계곡(7번 국도)선 주변에서는 잔류자기의 편향현상이 나타나지 않았다. 동해안의 제3기분지 지역에서 널리 나타나는 잔류자기의 시계방향 편향은 이 계곡선으로부터 동쪽으로 약 6 km 이東의 지역에서만 관찰된다.

4. 위의 사실은 한반도 남동부의 신생대 지체구조 및 제3기분지 발달에서 주된 역할을 하였던 새로운 구조선(tectonic boundary)의 존재를 의미하는 것이며, 그 구조선은 울산-경주간 7번 국도로 부터 약 6 km 이상 동편에서 이에 거의 평행하게 달리고 있다. 동해가 확장되는 동안 동해안에 작용되던 우향전단력 (dextral simple shear)의 효과는 울산-경주간 계곡선보다는 이로부터 약 6 km 동쪽에 위치한 이 구조선을 통하여 대부분 해소 (release)되고 울산단층이나 양산단층 등이 위치한 보다 서편지역으로는 거의 전달되지 않았던 것으로 결론지워진다.

5. 위의 새 구조선은 제3기 연일운동과 깊은 연관을 가진 것이므로 이를 延日構造線이라고 부르고자 한다.

## 사 사

“본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비 (기초과학 BSRI-97-5423)에 의하여 연구되었음”을 밝히며 이에 대하여 감사한다.

## 참고문헌

강희철, 김인수, 손문, 정현정 (1996) 양산단층지역에 분포하는 퇴적암 및 화성암류에 대한 고자기 연구. 자원환경지질, 29권, p. 753-765.  
 고정선 (1994) 경주 남산 일대의 A-type 화강암류의 지화학적 특징 및 성인. 부산대학교 교육학석사학위논문, 61p.  
 김광호, 도성재 (1994) 양남분지에 분포하는 제3기 지층의 고자기 연구. 지구과학회지, 15권, p. 36-45.  
 김근수, 김종열, 정규귀, 황진연, 이준동 (1995) 경상북도 경주-감포 일원에 분포하는 화강암류의 Rb-Sr연대. 지구과학회지, 16권, p. 272-280.  
 김남장, 권영일, 진명식 (1971) 한국지질도 (1:50,000), 모량

도폭 및 설명서. 국립지질조사소.  
 김옥준, 정봉일, 엄상호, 장기홍, 박봉순, 강필중 (1980) 한반도의 지진지체구조 분석에 관한 연구. 과학기술처, p. 101-112.  
 김인수 (1984) 고자기학의 방법 (I). 광산지질, 17권, p. 141-147.  
 김인수 (1992) 새로운 東海의 成因모델과 양산단층계의 주황 이동운동. 지질학회지, 28권, p. 84-109.  
 김인수, 강희철 (1989) 어일분지 일대에 분포하는 제3기층에 대한 고자기학적 연구. 지질학회지, 25권, p. 273-293.  
 김종환, 강필중, 임정용 (1976) Landsat-I 영상에 의한 영남지역 지질구조와 광산과의 관계연구. 지질학회지, 12권, p. 79-89.  
 류충렬, 양경희, 김인수 (1996a) 울산단층 주변의 제4기단층: 활성단층인가? 제51차 대한지질학회 학술발표회 요약집, p. 79-80.  
 류충렬, 양경희, 이상원, 김인수 (1996b) 울산단층 주변의 제4기단층. 부산대학교 사대논문집, 33집, p. 311-327.  
 박양대, 윤형대 (1968) 한국지질도 (1:50,000), 울산도폭 (Sheet-7020-I) 및 설명서. 국립지질조사소.  
 손문, 강희철, 김인수 (1996) 남한 제3기 분지지역에 대한 고자기 연구: 3. 정자-울산분지와 그 일원. 자원환경지질, 29권, p. 509-522.  
 손문, 김인수 (1994) 울산군 강동면 제3기 정자분지의 지질 구조와 분지발달. 자원환경지질, 27권, p. 65-80.  
 신성천, 진명식 (1995) 한국 심성암 동위원소 연대지도 (1:1,000,000). 한국자원연구소.  
 엄상호, 이동우, 박봉순 (1964) 한국지질도 (1:50,000), 포항도폭 및 설명서. 국립지질조사소, 20p.  
 윤성효, 황인호 (1990) 경주 남산일대의 화강암의 암석학 및 지구화학의 특성. 지구과학회지, 11권, p. 51-66.  
 이미정, 이종익, 이민성 (1995) 경주지역의 A-형 알카리장석 화강암에 대한 광물학 및 주성분원소 지구화학. 지질학회지, 31권, p. 583-607.  
 이윤중 (1980) 연암 및 울산지역 화강암질암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 13권, p. 69-79.  
 장기홍 (1975) 경상분지 상부 중생대의 층서. 지질학회지, 11권, p. 1-23.  
 진명식, 김성재, 신성천 (1990) K-Ar과 쉐튼트랙 연령측정에 의한 한국 동남부지역 화강암류의 지열사와 냉각사 연구. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-89-1C, p. 65-105.  
 진명식, 김성재, 신성천 (1991) 한국 동남부지역 화강암류의 쉐튼트랙 및 K-Ar 연령: 화성활동사와 지체구조적 의의. 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-90-1B-2, p. 57-98.  
 최현일, 오재호, 신성천, 양문렬 (1980) 울산지역 경상계 지층의 지질 및 지화학적연구. 자원개발연구소, KIGAM B-20, p. 5-33.  
 한중환, 광영훈, 손진담, 손병국 (1987) 한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체구조발달 및 퇴적환경 연구. 한국동력자원연구소, KR-86-2-(B)-4, 109p.  
 황병훈 (1995) 경주 남산-도함산 일원의 화강암질 암체에 관한 암석학적연구. 부산대학교 이학석사 학위논문, 70p.  
 Baag, C.E. and Kang, D.J. (1994) Geophysical studies on major faults in the Kyongsang Basin : Aeromagnetic and radiometric data interpretation on the Ulsan fault. Jour. Geol. Soc. Korea, v. 30, p. 193-205.  
 Bartler, W.L., Friedman, M. and Logan, J.M. (1981) Experimental folding and faulting of rocks under confining pressure, Part IX. Wrench faults in limestone layers. Tectonophysics, v. 79, p. 255-277.  
 Beck, M.E., Jr. (1976) Discordant Paleomagnetic pole positions as evidence of regional shear in the western

- Cordillera of North America. *Am. Jour. Sci.*, v. 276, p. 694-712.
- Besse, J. and Courtillot, V. (1991) Revised and synthetic apparent polar wander paths of the African, Eurasian, North-American and Indian plates, and true polar wander since 200Ma. *Jour. Geophys. Res.*, v. 96, p. 4029-4050.
- Butler, F.R. (1992) Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Blackwell Sci. Publ., 319p.
- Gleizes, E.F.G., Bouchez, J.L. and Nnabo, P.N. (1995) Internal fabric and strike-slip emplacement of the Pan-African granite of Solli Hills, northern Nigeria. *Tectonics*, v. 14, p. 1205-1219.
- Halls, H.C. (1976) A least squares method to find a remanence direction from converging remagnetization circles. *Geophys. Jour. R. astron. Soc.*, v. 45, p. 297-304.
- Halls, H.C. (1978) The use of converging remagnetization circles in paleomagnetism. *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.
- Hutton, D.H.W. and Reavy, R.J. (1992) Strike-slip tectonics and granite petrogenesis. *Tectonics*, v. 11, p. 960-967.
- Irving, E. (1977) Drift of the major continental blocks since the Devonian. *Nature*, v. 270, p. 304-309.
- Ishihara, S. (1979) Lateral variation of magnetic susceptibility of the Japanese granitoids. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 85, p. 509-523.
- Jin, M.S., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F. (1984) Fission track dating of apatite from the Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 20, p. 257-265.
- Kyung, J.B. and Okada, A. (1995) Liquefaction phenomena due to the occurrences of great earthquake: Some cases in central Japan and Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 31, p. 237-250.
- Lee, K.H. and Um, C.R. (1992) Geoelectric survey of the Ulsan fault: Geophysical studies on major faults in Kyeongsang basin. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 28, p. 32-39.
- Luyendyk, B.P., Kammerling, M.J., Terres, R.R., and Hornafius, J.S. (1985) Simple shear of southern California during Neogene time suggested by paleomagnetic declination. *Jour. Geophys. Res.*, v. 90, p. 12,454-12,466.
- Okada, A., Watanabe, M., Suzuki, Y., Kyung, J.B., Jo, H. R., and Kim, S.K. (1995) Active fault topography and fault outcrops in the central part of the Ulsan fault system, southeastern Korea. Program of Japan, Earth and Planetary Science Joint Meeting, A31-R22.
- Paterson, S.R. and Fowler, T.K., Jr. (1993) Extensional pluton-emplacement models: Do they work for large plutonic complexes? *Geology*, v. 21, p. 781-784.
- Platzman, E.S., Platt, J.P., Tapirdamaz, C., Sanver, M. and Rundle, C.C. (1994) Why are there no clockwise rotations along the North Anatolian Fault Zone? *Jour. Geophys. Res.*, v. 99, p. 21,751-21,715.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F. (1993) The Magnetic Anisotropy of Rocks. Chapman & Hall, 217p.
- Tobisch, O.T. and Cruden, A.R. (1995) Fracture-controlled magma conduits in an obliquely convergent continental magmatic arc. *Geology*, v. 23, p. 941-944.
- Zijderveld, J.D.A. (1967) AC demagnetization of rocks: Analysis of results. In: Runcorn, S.K., Creer, K. M. and Collison, D.W. (Eds.), *Methods in Palaeomagnetism*. Elsevier, London. p. 254-286.