

## 양산단층 동편 화강암질암의 대자율 이방성(AMS)

조형성 · 손문 · 김인수\*

부산대학교 지질학과

### Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) of Granitic Rocks in the Eastern Region of the Yangsan Fault

Hyeongseong Cho, Moon Son and In-Soo Kim\*

Department of Geology, Pusan National University

A study of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) was undertaken on Cretaceous granitic, volcanic and sedimentary rocks in the eastern region of the Yangsan fault, southeast Korea. A total of 542 independently oriented core samples collected from 77 sites were studied. The main magnetic mineral in granitic rocks is magnetite according to the magnitude of bulk susceptibility, high-temperature susceptibility variation and isothermal remanent magnetization. Both of magnetic lineation and foliation with NE-SW trends are revealed in the granitic rocks, while volcanic rocks show scattered directions and sedimentary rocks show only load foliation parallel to the bedding planes. The following evidences read to the conclusion that both magnetic fabrics in the granitic rocks have been obtained by a tectonic stress before full solidification of the magma: (i) A fully hardened granitic rocks would get hardly any fabric, (ii) Difference of the magnetic fabric trends with those of the geological structures in the granitic rocks themselves formed by brittle deformation after solidification (e.g. patterns of small-faults and joints), (iii) Kinking of biotite and undulose extinction in quartz observed under the polarizing microscope, (iv) Discordance of magnetic fabrics in the granitic rocks with those in the surrounding rocks. The NE-SW trend of the magnetic foliations suggests a NW-SE compressive stress of nearly contemporaneous with the emplacement of the granitic rocks. The compression should have caused a sinistral strike-slip movement of the Yangsan Fault considering the trend of the latter. As the age of the granitic rocks in the study area is reported to be around 60~70 Ma, it is concluded that the Yangsan fault did the sinistral strike-slip movement during this time (L. Cretaceous Maastrichtian - Cenozoic Paleocene).

**Key words :** Yangsan Fault, Granitic rocks, Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), Magnetic lineation, Magnetic foliation, Sinistral strike-slip movement

경상분지 남동부에 위치한 양산단층 동편의 화강암질암, 화산암류, 퇴적암류를 대상으로 총 77개 지점으로부터 독립적으로 정향된 542개의 코어시료를 채취하여 대자율 이방성(AMS) 연구를 실시하였다. 총 대자율 측정, 고온대자율 실험 및 등온잔류자기 획득실험을 통하여 연구대상 암석들의 주 자성광물이 자철석 위주의 티탄자철석계열의 것임이 밝혀졌다. 연구의 주 대상암체인 화강암질암에는 자기적 엮리구조와 자기적 선구조 모두가 존재하고 있으며, 자기적 엮리구조의 주향은 북동-남서가 지배적이다. 이 자기적 엮리구조는 화강암질암의 변형에 대한 강한 저항의 물성, 주변 모암의 자기적 엮리구조와의 불일치, 고화 이후 취성변형으로 만들어진 소단층이나 절리 등의 지질구조와의 모순점, 현미경에서 관찰되는 조직 등의 증거로부터 마그마가 관입정지하여 완전히 고화되기 전에 응력을 받아 생성된 일차 미세구조(primary fabric)로 판단된다. 이 북동-남서 주향의 자기적 엮리구조는 북서-남동의 압축력으로 만들어질 수 있는데 이러한 응력은 양산단층의 좌수향 주향운동의 산물로 해석된다. 연구지역 화강암질암의 연령이 약 60~70 Ma로 알려져 있음을 감안하면 양산단층은 이 시기(백악기 말에서 신생대 초)에 걸쳐서 좌수향 주향이동 운동을 하였음을 알 수 있다.

**주요어 :** 양산단층, 화강암질암, 대자율 이방성(AMS), 자기적 선구조, 자기적 엮리구조, 좌수향 주향이동운동

\*Corresponding author: insookim@pusan.ac.kr

1. 서 언

경상분지 동부의 양산단층(Fig. 1)은 우리나라는 물론 동아시아에서도 중요한 의미를 갖는 구조선이다. 따라서 양산단층의 구조적 특징과 운동사, 그리고 고응력장에 관한 여러 연구들이 이어져 왔다. 이 연구들은 주로 주변 지질분포의 차이(Lee and Kang, 1964; Lee and Lee, 1972; Son *et al.*, 1978; Kim, 1988), 단층조산 및 소단층, 절리의 특징 분석(Chang *et al.*, 1993; Chae and Chang, 1994; Chang and Chang, 1998; Chang, 2001), 지구물리탐사 결과(Kim *et al.*, 1990; Lee and Han, 1999) 등에 근거하여 양산단층

의 구조적 운동사를 고찰하였으며, 때로는 단층점토의 연대측정을 통하여 단층운동의 시기가 연구되기도 하였다(Chang and Choo, 1999). 과거 한 동안은 양산단층의 운동에 대하여 주향이동단층, 경사단층 및 회전단층 등 다양한 견해들이 제시되었는데, 점차 단순한 우수향 주향이동단층으로 보는 견해가 지배적으로 되었다. 그러나 Kim (1992)은 새로운 동해의 성인모형을 제시하면서, 양산단층이 백악기로부터 중기 에오세 이전까지는 좌수향 주향이동 운동을, 그 후 16 Ma까지는 우수향 주향이동운동을, 그리고 15 Ma경에 이르러서는 다시 좌수향 주향이동운동을 하였다고 추론한 바 있다. 한편 최근에는 야외조사를 통한 고응력 분석

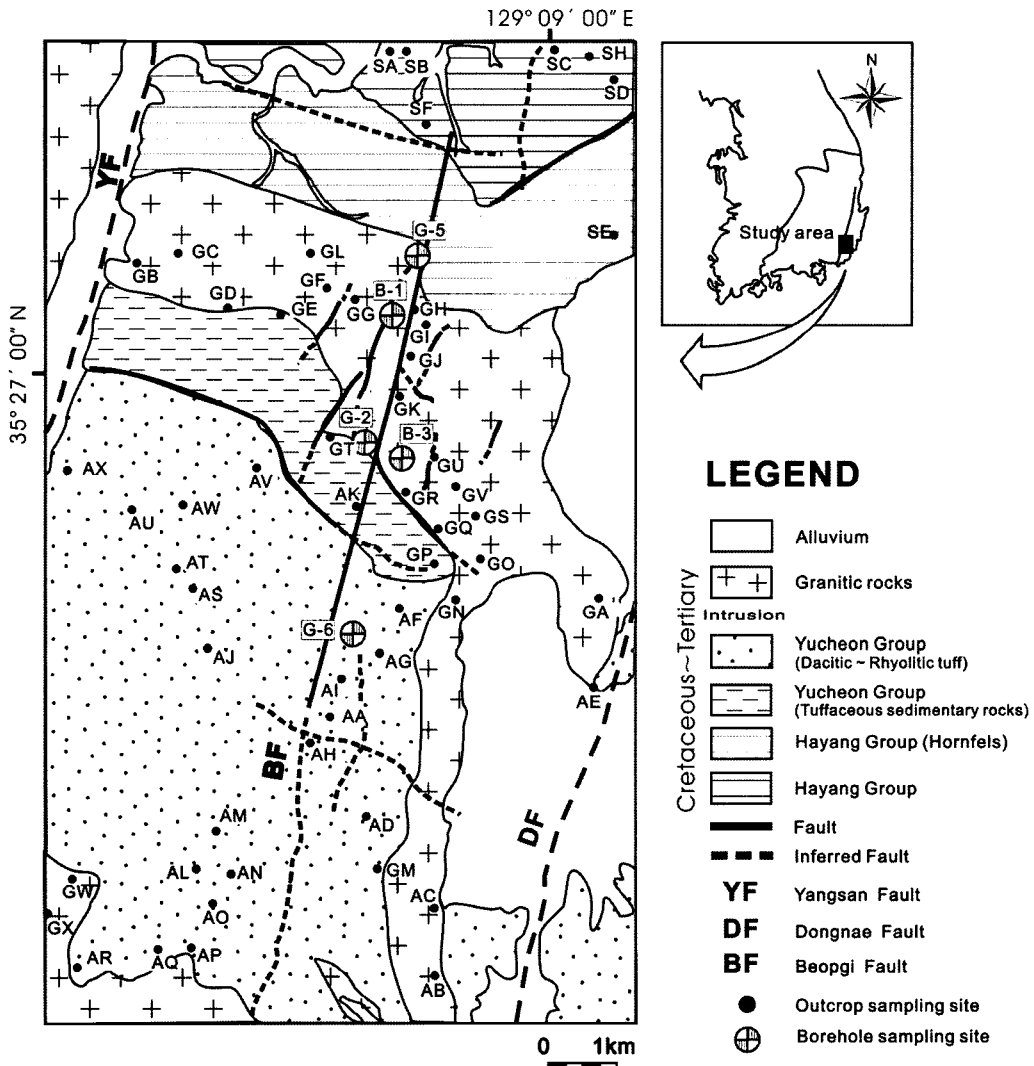


Fig. 1. Geological map of the study area with sampling sites (modified from Son *et al.*, 2003).

을 통해 양산단층의 운동이 단순 우수향 주향이동인 아닌 단계적으로 서로 다른 운동체계에서 복합적 발달 과정을 겪었다는 우수향-좌수향-우수향의 다중변형모델이 제시되기도 하였다(Chang and Chang, 1998).

본 연구에서는 남부 양산단층 동편에 분포하는 화강암질암, 화산암류 그리고 퇴적암을 대상으로 대자율 이방성(AMS: Anisotropy of Magnetic Susceptibility) 연구라는 새로운 접근방법을 통하여 고응력장을 규명하고 양산단층의 운동양식과 그 시기에 대한 고찰을 해보고자 한다. 대자율 이방성 연구의 목표는 암석내의 미세구조(즉, rock fabrics)를 알아내는 데에 있다. 이 방법은 암석의 자기적 성질 중 하나인 대자율이 측정방향에 따라 다른 값을 보이는 데에 바탕을 둔 것으로서, 그 방법이 야외조사를 통하여 습곡, 단층, 절리 등을 구조적으로 해석하는 방법이나, 암석박편을 통하여 미세구조를 해석하는 것 등과는 근본적으로 다르다. 즉, 야외에서 채취한 코어시료에 대하여 자성을 띠는 능력, 즉 대자율을 서로 수직인 세 방향으로 측정함으로써 암석내의 자기적 선구조(magnetic lineation)와 자기적 엽리구조(magnetic foliation)를 규명하고 이를 다양한 지질현상의 해석에 적용하는 것이다. 최근에 와서 대자율 이방성을 더욱 정밀하게 측정할 수 있는 기기가 개발되면서 이 방법은 세계적으로 널리 사용되어지고 있다. 국내에서도 이러한 연구 방법의 소개가 있었으나(Kim, 1990), 몇몇 연구(Lee et al., 1993; Suk and Doh, 1994; Kim et al., 1997; Choi et al., 1998; Son et al., 2000, 2001)를 제외하고는 아직은 적용 사례가 그리 많지 않다.

## 2. 지질학적 배경

연구지역은 경상분지 동남부, 양산단층의 동편에 위치하며, 행정구역상 경상남도 양산시와 울산광역시 울주군에 해당된다(Fig. 1). 연구지역의 지형은 전반적으로 협준한 산세를 형성하고 있는데, 산지들은 북북동 방향을 보이며 북에서 남으로 정족산, 천성산, 원효산이 위치하고 있다. 대체적으로 동쪽 사면은 급경사를 이루고 서쪽은 동쪽에 비해 완만하다. 연구지역의 동쪽에는 회야강, 서쪽에는 양산천이 흐르고 있으며, 정족산과 천성산으로부터 발원한 주요하천들은 그물망형 수계를 나타내고 있다.

연구지역의 지질은 지질계통과 암상에 따라 하부로 부터 접촉변성작용을 받지 않은 경상누층군의 하양층군 퇴적암, 접촉열변성작용을 받아 혼펠스(hornfels)화

된 하양층군 퇴적암, 이를 정합적으로 피복하고 있는 유천층군 화산암류, 이들을 관입하고 있는 불국사 화강암류, 그리고 최후기의 산성 및 염기성 암맥들로 구성된다. 연구지역의 양변에는 한반도 동남부의 주요구조선인 양산단층과 동래단층이 각각 위치하고 있으며, 두 단층의 사이에서는 북북동 방향의 우수향 주향이동 단층인 법기단층이 연구지역을 관통하고 있다(Fig. 1; Son et al., 2003).

대자율 이방성 연구의 주 대상 암체인 화강암질암은 마그마혼합의 증거로 알려져 있는 염기성 미립 포유암(MME, mafic microgranular enclave; Kim et al., 2002)을 소량 함유하는 반상 화강암인데, 대체적으로 응식된 석영, 정장석, 그리고 사장석 등이 반정광물로 나타난다. 경우에 따라서는 중조립의 등립상 내지 세리에이트(seriate) 조적을 보이기도 하며, 특징적으로 라파키비(rapakivi) 조적의 장석을 함유한다. 주로 석영, 정장석, 사장석으로 구성되어 있고, 유색광물로는 흑운모가 우세하게 나타나며, 소량의 각섬석, 인회석, 알라나이트(allanite), 지어콘, 녹니석 등이 불투명광물과 혼재되어 나타난다(Hwang, 2004). 한편 Son et al. (2003)은 모드분석을 통해 이 암체가 화강섬록암 영역에 도시된다고 한 바 있다. 한편 이 암체의 연령에 대해서는 Hwang(2004)은 주변 화강암체와의 Rb/Sr 등시선도 연령으로 58~59 Ma를, KIGAM (1995)은 K-Ar 흑운모 연령으로 75 Ma를 보고하였다.

연구지역의 화산암류들은 유천층군에 해당하며, 주로 테사이트-유문암질용회암으로 이루어져 있다. 그러나 안산암 및 안산암질용회암과 응회질퇴적암 등이 함께 나타나는 복합적 산상을 보인다. Son et al.(2003)은 이 지역의 유문암질용회암이 혼펠스화된 하양층군 퇴적암을 정합적으로 피복한다고 하였다.

하양층군 퇴적암류는 접촉열변성작용을 거의 받지 않은 퇴적층과, 강하게 받아 혼펠스화 된 것으로 크게 나누어진다. 혼펠스화 되지 않은 하양층군은 적갈색 및 회색의 사암과 이암으로 구성되는데 Lee and Kang (1964)은 이 지층을 대양동층으로 명명하였다. 접촉열변성작용을 강하게 받아 혼펠스화 된 하양층군은 치밀 견고한 조적을 보이며, 담회색 및 담청색을 띠고 있다.

## 3. 시료채취와 측정

### 3.1. 시료채취와 시편제작

이 연구에 사용된 시료들은 휴대용 착암기(rock drill)를 사용하여 야외노두에서 직경 1인치의 코어시료(core

sample)로 직접 채취하거나, NX 규격(직경 54.7 mm)의 수직 야외시추공으로부터 회수한 것이다. 후자의 시추공 시료들에 대해서는 실내 착암기(drill press)를 사

용하여 다시 1인치 직경의 코어시료를 착공(coring)하였다. 양 시료들의 현장위치는 Fig. 1에 나타나 있다. 야외노두 시료는 화강암질암을 중심으로 유천층군 화

Table 1. Summary of sampling sites.

Site name	Sample (N)	Specimen (n)	Site name	Sample (N)	Specimen (n)
GA	10	17	AA	11	16
GB	2	3	AB	2	4
GC	2	3	AC	12	22
GD	3	5	AD	2	2
GE	3	5	AE	2	2
GF	2	4	AF	2	3
GG	3	5	AG	2	2
GH	3	5	AH	2	2
GI	12	14	AI	9	13
GJ	2	7	AJ	2	2
GK	2	3	AK	12	21
GL	2	3	AL	3	3
GM	3	4	AM	3	3
GN	3	3	AN	7	8
GO	11	22	AO	2	2
GP	2	2	AP	2	2
GQ	2	2	AQ	2	2
GR	2	4	AR	2	2
GS	2	4	AS	11	14
GT	3	6	AT	3	3
GU	2	2	AU	2	2
GV	2	3	AV	12	19
GW	2	4	AW	2	4
GX	11	14	AX	2	2
*B1-1	7	7	*G6-1	14	14
*B1-2	10	10	*G6-2	9	9
*B1-3	7	7	Sum	26 sites	134
*B1-4	6	6	SA	12	18
*B3-1	13	13	SB	15	26
*B3-2	10	10	SC	13	25
*B3-3	10	10	SD	3	7
*B3-4	13	13	SE	2	4
*B3-5	8	8	SF	12	15
*G2-1	19	19	SG	14	18
*G2-2	15	15	SH	7	12
*G2-3	15	15	Sum	8 sites	78
*G2-4	16	16			
*G2-5	12	12			
*G2-6	18	18			
*G2-7	12	12			
*G2-8	18	18			
*G5-1	13	13			
*G5-2	10	10			
Sum	43 sites	330	Total	77 sites	N=542

\*Borehole sampling site

산암류와 하양층군 퇴적암류에서도 채취하였고, 시추공 시료는 화강암질암 4개 공, 화산암류 1개 공에서 채취하였다. 시추시료는 약 10~20 m의 심도구간을 하나의 위치(site)로 취급하여 얇은 심도에서 깊은 심도의 순으로 위치 이름을 부여하였다. 이리하여 연구지역내 77개 장소로부터 독립적으로 정향된 542개의 코어시료가 획득되었다(Table 1).

야외노두 시료의 정향(定向) 작업(orientation)에는 지질조사용 주향경사계를 이용하였다. 시추공 시료의 정향에는 시추공 내부에 대한 텔레뷰어(televiwer) 탐사 결과를 이용하였다. 텔레뷰어 탐사에서는 시추공내부에 나타나는 절리나 파쇄대의 주향과 경사를 초음파 영상으로 찍어낸다. 따라서 시추공 밖으로 끌어 올려진 시추코어를 검사하면 코어에서의 정북 위치를 알 수 있다.

채취된 542개의 코어시료(sample)들을 실험실에서 높이/직경비율이 0.9인 원주형 시편(specimen)으로 잘랐다. 이렇게 모두 684개의 시편이 만들어졌는데, 이들 중 형태가 표준 원주형에서 크게 벗어나는 5개의 시편은 형태에 따른 이방성(shape anisotropy)이 우려되기에 제외하고 나머지인 679개의 시편들만을 연구에 이용하였다.

**3.2. 측정**

제작된 모든 시편들에 대해서 총 대자율(bulk susceptibility)과 대자율 이방성(AMS)을 측정하였다. 여기에는 체코 AGICO사의 Kappabridge KLY-4S를 사용하였는데, 이 기기의 정밀도는  $2 \times 10^{-8}$ (SI), 정확도는 0.3%이다.

일부 시편에 대해서는 주 구성 자성광물을 판별할 목적으로 등온잔류자기(IRM: Isothermal Remanent Magnetization) 획득실험과 고온대자율 실험을 실시하였다. 후자는 상온~700°C의 구간에서 온도에 따른 대자율 변화를 측정하는 실험으로서 이를 통하여 열자기곡선(thermomagnetic curve)이 획득된다. 등온잔류자기 획득실험은 미국 ASC사의 IM-30 Impulse 자화기와 영국 Molspin사의 Minispin spinner 자력계를 이용하였다. 고온대자율 실험에는 체코 AGICO사의 Kappabridge KLY-4S 및 CS-3이 이용되었다.

이상의 모든 측정과 실험은 자기세척(magnetic cleaning, demagnetization) 작업이 실시되지 않은 시료들을 사용하여 이루어졌다.

**4. 대자율 이방성 측정결과와 해석**

**4.1. 총 대자율**

각 시편에서 측정된 총 대자율(bulk susceptibility)의 값을 암석별로 로그 값으로 나타내었으며(Fig. 2), 각 site별로 총 대자율 값도 계산하였다(Table 2A, B). 대자율은 외부자기장의 세기에 따라 그 값이 다소 달라진다. 본 연구에서 사용된 외부자기장은 300 A/m이다. 또한 대자율 값은 시료의 부피에 따라서 달라지기 때문에 단위부피당 총 대자율 값으로 계산하였다.

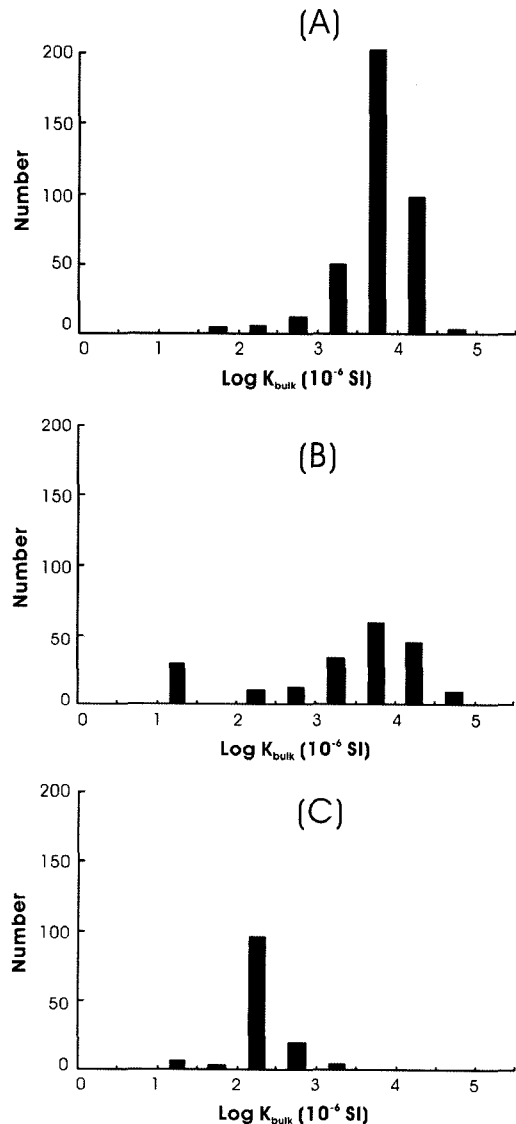


Fig. 2. Histograms of bulk susceptibility ( $10^{-6}$  SI) of granitic rocks (A), volcanic rocks (B), and sedimentary rocks (C).

화강암질암의 총 대자율 값은  $1,000\sim 15,000\times 10^6$  (SI)에 집중되어 있으며, 평균은  $7,621\times 10^6$ (SI)이다. 화산암류에서는 전반적으로  $1,000\sim 10,000\times 10^6$ (SI)의 총 대자율 값이 우세한데, 화강암질암에 비해 값의 분포범위가 넓다. 이는 연구지역 화산암류의 산출이 안산암 및 안산암질응회암, 유문석영안산암 및 응회질퇴적암 등으로 다양한 데에 기인하는 것으로 생각된다. 화산암류의 총 대자율 값의 평균은  $6,991\times 10^6$ (SI)이다. 퇴적암류의 경우에는 전자의 두 암상에 비해 상당히 낮은 총 대자율 값을 보임이 특징이다. 응회질 퇴적암으로 의심되는  $500\times 10^6$ (SI)이상의 SE site를 제외하고는 모두  $300\times 10^6$ (SI) 미만의 총 대자율 값을 보인다. 퇴적암류의 총 대자율 값의 평균은  $244\times 10^6$ (SI)이다.

화강암질암과 화산암류의 총 대자율 값이  $5,000\times 10^6$

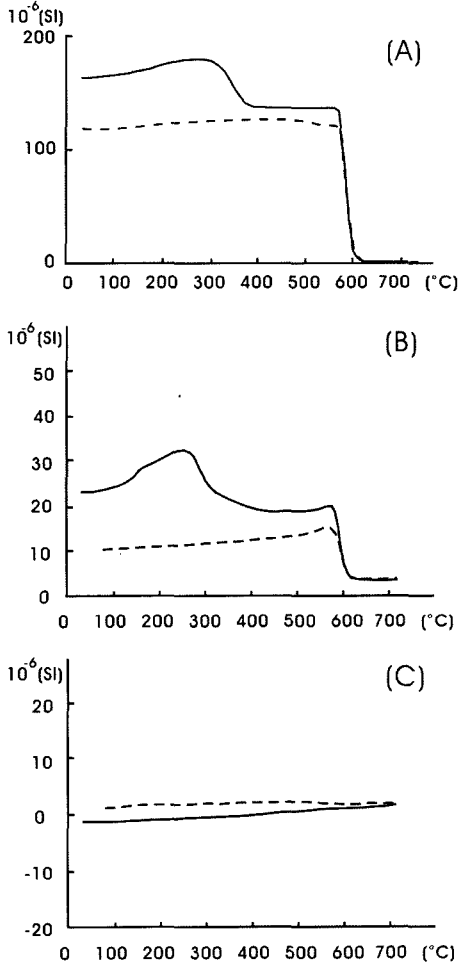


Fig. 3. Typical thermomagnetic curves of granitic rocks (A), volcanic rocks (B), and sedimentary rocks (C). Solid (dashed) lines are heating (cooling) curves.

(SI)을 충분히 초과한다는 것은 이들 암석의 자기적 특성을 규제하는 광물이 자철석(magnetite)이나 맥히마이트(maghemite)와 같은 페리자성광물(ferrimagnetic mineral)일 가능성이 높음을 지시한다(Tarling and Hrouda, 1993; Bouchez, 1997). 이는 다음에 논의할 고온대자율 실험과 등온잔류자기 실험에서도 잘 나타난다.

4.2. 자성광물

연구지역 암석 내에 함유된 자성광물의 종류를 판별하기 위하여 고온대자율 실험과 등온잔류자기획득 실험을 실시하였다. 먼저 고온대자율 실험 결과, 화강암질암과 화산암류의 경우에는 측정된 모든 시료들이 580°C에서 급격한 대자율의 감소를 보였다(Fig. 3A, B). 따라서 이들에 함유된 주 자성광물은 자철석(magnetite)인 것으로 판단된다. 또한 300~350°C에서도 대자율의 감소가 나타나는데, 이는 자류철석(pyrrhotite) 또는 맥히마이트(maghemite)가 함유 되었을 때 나타나는 양상과 유사하다(Bultler, 1992; Tauxe, 1998). 이 둘을 구

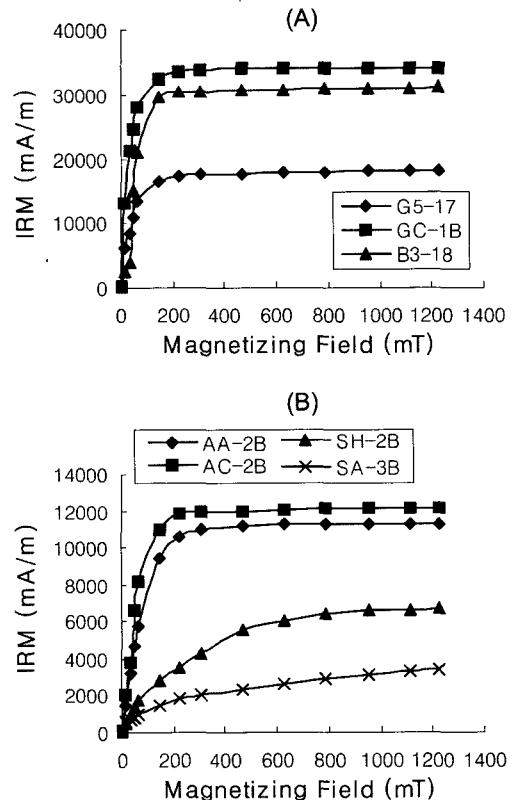


Fig. 4. Typical IRM acquisition curves of granitic rocks (A), volcanic and sedimentary rocks (B).

분화하려면 더 세밀한 연구가 요구된다. 퇴적암류에서는 전 온도에 걸쳐서 특이할 만한 대자율의 변화가 관찰되지 않았으며, 일관되게 아주 낮은 대자율을 보였다(Fig. 3C). 그러므로 퇴적암류에는 자성광물이 극미량만 포함되었으리라 판단된다.

등온잔류자기 실험 결과도 고온대자율 실험의 결과와 거의 일치하게 나타난다. 화강암질암은 모두 300 mT 이전에 완전히 포화되고, 그 이후로는 자기강도의 증가가 나타나지 않는다(Fig. 4A). 이는 화강암질암에 포함된 자성광물들이 자철석 등의 티탄자철석계열의 광물임을 지시하는 것이다. 화산암류 시료의 경우도 역시 300 mT 이전에 완전 포화된다. 퇴적암류 시료에서는 300 mT 이전에 등온잔류자기의 대부분이 획득되지만 그 이후에도 자기강도가 약간씩 증가한다(Fig. 4B). 퇴적암류의 이러한 특징은 티탄자철석계열 광물이 주를 이루나 부분적으로는 티탄자철석계열 광물도 존재함을 시사한다. 포화화강암 강도는 화강암질암이 가장 크며 퇴적암류가 가장 작게 나타난다.

이상의 고온대자율 실험, 등온잔류자기 실험 그리고 총 대자율 측정의 결과로부터 화강암질암과 화산암류에 포함된 자성광물은 주로 티탄자철석계열의 자철석이 밝혀졌다. 대자율 이방성 연구는 대상 암석의 주 자성광물 입자들이 강한 형태이방성(shape anisotropy)을 가지는 티탄자철석계열일 때 성공가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Collison, 1983; Kim, 1990; Tarling and Hrouda, 1993). 그러므로 연구지역의 화성암들은 대자율 이방성 연구에 적합한 대상이라고 평가된다.

### 4.3. 대자율 이방성 타원체의 자세

암석의 대자율 값이 측정방향에 따라 다르게 나타나면 그 암석은 자기적으로 이방성(magnetic anisotropy)을 띠는 것이다. 이때 암석의 대자율은 대칭형 이차 텐서(tensor of second order)로 표현된다. 이 텐서로부터 고유벡터(eigenvectors)와 고유값(eigenvalues)을 계산하면 이들은 각각 각 시편에 대한 대자율 이방성 타원체의 모양과 세 주축(principal axes)의 방향과 크기가 된다. 이 세 주축은  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 로 표현되며,  $k_1$ 이 대자율이 가장 높은 축이고,  $k_3$ 가 가장 낮은 축으로 정의한다(즉,  $k_1 > k_2 > k_3$ ). 이들  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  값의 상대적 크기(eigenvalues)에 따라 대자율 이방성 타원체의 형태가 결정되게 되는데,  $k_1 > k_2 \approx k_3$ 인 경우에는 대자율 이방성 타원체의 형태가 편장형(prolate)이 되어 자기적 선구조를,  $k_1 \approx k_2 > k_3$ 인 경우에는 대자율 이방성 타원체의 형태가 편평형(oblate)이 되어 자기적 엽리구

조를 가지는 것으로 판별된다. 자기적 선구조로 판별되었을 때  $k_1$  방향은 흐름방향을 지시하는 것으로 해석할 수 있으며, 자기적 엽리구구조로 판별되었을 때  $k_3$  방향, 즉 엽리면에 수직한 방향(즉, 엽리면의 pole)은 작용한 응력의 방향으로 해석된다(Kim, 1990).

위의 방법에 근거하여 각 시편에 대한 세 주축 즉  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 의 방향과 크기를 모두 계산하고, 장소별로 평균값을 구해내었다(Table 2A, B). 그런데 대자율 이방성 타원체의 주축방향들은 사실 벡터가 아닌 두 극을 가진(bipolar) 방향이다. 그러므로 이들의 평균방향을 구하려고 할 때, 벡터를 전체로 한 Fisher (1959) 통계를 적용하는 것은 곤란하다. 따라서 이를 위한 다양한 다른 통계모델들이 제안되고 있는데(Jelinek, 1978; Ellwood and Whitney, 1980; Park *et al.*, 1988), 이 연구에서는 Jelinek(1978)의 통계법을 사용하여 장소별의 평균을 구하였다.

화강암질암의  $k_1$ 방향은 대부분의 장소(site)에서 북동-남서 방향으로 나타나며, 일부 장소에서는 남-북 방향(GA, GG, GM)이나 동서 방향(GI, B3-4)을 보이기도 한다(Table 2A, Fig. 5). 지표노두에서는 다소 분산된 방향을 보이지만, 시추공 내에서는 훌륭한 방향의 일치를 보여준다.  $k_3$ 방향은 대체로 북서-남동 방향으로 나타나는데, 역시 시추공 site가 더 일관된 분포를 보인다(Table 2A, Fig. 6). GP와 GQ site는 시료수가 너무 적고 분산된 방향을 보여 평균을 계산하는 의미가 없었다.

화산암류의  $k_1$ ,  $k_3$ 방향은 장소별로 대단히 분산된 방향으로 나타난다(Table 2B, Fig. 5, 6). 퇴적암류의  $k_1$  방향은 북동-남서가 우세하며,  $k_3$ 방향은 분산되어 나타난다(Table 2B, Fig. 5, 6). 퇴적암에서 주목할 점은 SC site를 제외하고는  $k_3$ 의 방향이 지층면에 거의 수직으로 나타난다는 점이다(Fig. 6). 이러한 현상은 자기적 엽리구조가 지구조적응력에 기인한 것이 아니라, 지층하중에 의한 것(load foliation)임을 의미한다(Kim, 1990).

### 4.4. 대자율 이방성 타원체의 모양

암석의 대자율 이방성의 정도와 자기적 선구조 및 엽리구조의 발달 및 우세 정도를 가늠하기 위해서는 다양한 모수(母數, parameter)들이 제안되고 있는데, 이 연구에서는 이방성의 정도를 판단하기 위한 Jelinek (1981)의  $P_j$  parameter와, 자기적 선구조와 엽리구조를 판단하기 위한 Jelinek(1981)과 Hrouda(1982)의 T parameter를 사용하였다. 그리고 계산된  $P_j$ 와 T 값을

**Table 2A.** Site-mean AMS data of each granitic site.

Site	n	$k_{\text{bulk}}$ ( $10^{-6}$ SI)	Principal directions of anisotropy ellipsoid			Degree of anisotropy			AMS parameters			
			$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k'_1$	$k'_2$	$k'_3$	L	F	$P_J$	T
GA	17	7812	177/00	86/77	267/14	1.008	1.001	0.990	1.007	1.011	1.018	0.190
GB	3	10404	34/02	130/74	304/16	1.013	0.996	0.990	1.017	1.006	1.023	-0.481
GC	3	10305	30/29	226/60	124/07	0.012	0.999	0.989	1.012	1.010	1.023	-0.085
GD	5	8061	15/22	145/59	276/21	1.020	0.996	0.984	1.024	1.012	1.036	-0.319
GE	5	9202	30/02	298/43	122/47	1.011	0.996	0.992	1.015	1.004	1.019	-0.588
GF	4	8061	213/41	64/45	317/16	1.008	0.998	0.994	1.011	1.004	1.015	-0.443
GG	5	9454	355/30	86/02	179/60	1.007	0.999	0.994	1.008	1.005	1.013	-0.256
GH	5	12144	209/14	321/56	111/30	1.006	0.999	0.995	1.007	1.005	1.011	-0.207
GI	14	10137	95/36	272/04	170/71	1.007	1.000	0.993	1.007	1.007	1.014	-0.047
GJ	7	9902	20/25	27/40	115/28	1.011	0.998	0.991	1.013	1.008	1.020	-0.246
GK	3	9813	40/46	204/43	302/08	1.014	0.998	0.988	1.016	1.010	1.026	-0.256
GL	3	12123	35/30	231/60	124/10	1.008	1.002	0.990	1.007	1.012	1.018	0.281
GM	4	9533	355/04	88/34	259/55	1.006	1.003	0.991	1.003	1.013	1.015	0.668
GN	3	14519	38/07	131/19	292/60	1.012	1.004	0.983	1.008	1.021	1.029	0.468
GO	22	13554	49/19	158/44	302/40	1.018	1.010	0.972	1.009	1.039	1.048	0.631
GP	2	27614	not calculated			1.007	0.999	0.994	1.008	1.005	1.013	-0.256
GQ	2	4954	not calculated			1.017	0.999	0.984	1.017	1.015	1.033	-0.066
GR	4	1921	70/02	163/45	339/45	1.016	1.003	0.981	1.012	1.023	1.035	0.303
GS	4	7152	27/51	202/39	294/03	1.021	0.993	0.986	1.028	1.008	1.036	-0.565
GT	6	4941	43/18	197/70	310/08	1.017	0.998	0.985	1.019	1.013	1.033	-0.179
GU	2	437	23/131	19/55	132/15	1.002	1.000	0.998	1.002	1.002	1.004	-0.137
GV	3	8561	39/26	250/60	136/14	1.018	0.994	0.988	1.025	1.006	1.031	-0.605
GW	4	20031	247/28	354/29	121/47	1.046	1.002	0.952	1.044	1.053	1.099	0.090
GX	14	16652	218/28	96/46	327/31	1.006	1.001	0.993	1.006	1.008	1.014	0.209
*B1-1	7	11432	249/04	147/70	341/20	1.009	1.001	0.990	1.008	1.011	1.019	0.134
*B1-2	10	10212	53/03	147/53	320/37	1.011	1.005	0.984	1.006	1.022	1.027	0.592
*B1-3	7	11517	308/63	81/19	178/18	1.009	1.000	0.991	1.009	1.010	1.018	0.055
*B1-4	6	12713	29/07	124/40	291/49	1.008	1.005	0.987	1.003	1.018	1.021	0.701
*B3-1	13	4455	246/40	65/50	156/01	1.024	1.001	0.976	1.023	1.025	1.049	0.048
*B3-2	10	4033	240/29	45/60	147/07	1.011	1.000	0.988	1.011	1.012	1.023	0.032
*B3-3	10	5821	245/28	39/59	149/11	1.016	1.001	0.983	1.014	1.018	1.033	0.107
*B3-4	13	5973	271/59	82/31	175/04	1.008	1.001	0.991	1.007	1.010	1.016	0.177
*B3-5	8	4203	250/48	51/40	149/09	1.017	0.999	0.984	1.017	1.015	1.033	-0.066
*G2-1	19	3597	256/36	39/48	151/19	1.015	0.995	0.990	1.019	1.006	1.025	-0.550
*G2-2	15	3291	242/39	39/49	143/11	1.013	0.996	0.991	1.019	1.006	1.025	-0.522
*G2-3	15	4634	248/38	38/48	146/15	1.015	0.997	0.988	1.017	1.009	1.026	-0.302
*G2-4	16	6624	255/18	24/63	158/20	1.010	0.999	0.990	1.011	1.009	1.020	-0.116
*G2-5	12	13814	238/14	339/38	131/49	1.011	0.998	0.990	1.013	1.008	1.021	-0.223
*G2-6	18	3293	245/27	14/52	141/25	1.016	0.994	0.990	1.022	1.003	1.026	-0.754
*G2-7	12	3357	252/17	358/37	142/48	1.015	0.995	0.990	1.020	1.006	1.025	-0.556
*G2-8	18	7371	250/39	66/51	158/02	1.025	0.996	0.979	1.029	1.017	1.047	-0.257
*G5-1	13	470	239/50	90/35	349/16	1.006	1.001	0.994	1.005	1.007	1.012	0.168
*G5-2	10	2391	215/60	56/28	321/09	1.016	1.002	0.982	1.014	1.020	1.034	0.178

• n: number of specimens •  $k_{\text{bulk}}$ : magnitude of bulk susceptibility

• **Principal directions of anisotropy ellipsoid:** site-mean direction, declination/inclination of  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  after Jelinek (1978)

• **Degree of Anisotropy:**  $k'_1=k_1/\{(k_1+k_2+k_3)/3\}$ ,  $k'_2=k_2/\{(k_1+k_2+k_3)/3\}$ ,  $k'_3=k_3/\{(k_1+k_2+k_3)/3\}$

• **AMS parameters:** L= $k_1/k_2$  after Balsley and Buddington (1958, 1960), F= $k_3/k_2$  after Stacey *et al.*(1960, 1961),

$P_J=\exp[2\{(\eta_1-\eta_m)^2+(\eta_2-\eta_m)^2+(\eta_3-\eta_m)^2\}]^{1/2}$ ,  $\eta_1=\ln k_1$ ,  $\eta_2=\ln k_2$ ,  $\eta_3=\ln k_3$ ,  $\eta_m=(\eta_1+\eta_2+\eta_3)/3$  after Jelinek (1981), T= $(2\eta_2-\eta_1-\eta_3)/(\eta_1-\eta_3)$  after Jelinek (1981) and Hrouda (1982)

\*Borehole sampling site



**Table 2B.** Site-mean AMS data of each volcanic and sedimentary site.

Site	n	$k_{bulk}$ ( $10^{-6}$ SI)	Principal directions of anisotropy ellipsoid			Degree of anisotropy			AMS parameters			
			$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k'_1$	$k'_2$	$k'_3$	L	F	$P_j$	T
AA	16	5153	302/37	162/45	49/21	1.019	0.997	0.985	1.022	1.012	1.034	-0.288
AB	4	3082	41/14	298/43	145/44	1.041	1.011	0.948	1.030	1.066	1.097	0.373
AC	22	6734	254/36	351/09	92/53	1.015	1.001	0.984	1.013	1.018	1.031	0.139
AD	2	38032	142/34	49/04	314/56	1.016	0.995	0.989	1.021	1.006	1.027	-0.571
AE	2	22912	232/26	341/35	114/44	1.028	0.997	0.975	1.031	1.023	1.054	-0.157
AF	3	2641	211/14	305/15	79/69	1.013	1.008	0.979	1.005	1.030	1.035	0.693
AG	2	2821	197/21	288/02	23/69	1.009	1.005	0.985	1.004	1.020	1.024	0.672
AH	2	4967	122/00	215/85	32/05	1.005	1.000	0.994	1.005	1.006	1.011	0.126
AI	13	9221	351/10	83/08	209/77	1.006	1.004	0.990	1.002	1.013	1.016	0.688
AJ	2	206	273/43	165/19	58/42	1.005	1.001	0.994	1.004	1.007	1.011	0.280
AK	21	112	6/47	143/34	249/22	1.002	1.000	0.997	1.002	1.003	1.005	0.289
AL	3	480	128/05	344/30	244/17	1.011	1.004	0.985	1.006	1.020	1.026	0.529
AM	3	738	119/09	237/70	26/17	1.032	0.993	0.975	1.040	1.018	1.059	-0.372
AN	8	5512	22/15	129/47	280/39	1.008	1.004	0.988	1.003	1.016	1.020	0.664
AO	2	4345	67/44	163/05	258/46	1.014	1.003	0.982	1.011	1.021	1.032	0.336
AP	2	3491	19/06	283/38	117/51	1.037	0.984	0.978	1.054	1.006	1.060	-0.799
AQ	2	4233	33/06	302/13	146/76	1.021	0.999	0.980	1.022	1.019	1.042	-0.067
AR	2	183	248/26	14/51	142/27	1.002	1.001	0.998	1.001	1.003	1.004	0.615
AS	14	5477	269/48	159/17	56/37	1.034	1.001	0.965	1.032	1.037	1.071	0.064
AT	3	6191	209/56	9/33	105/09	1.019	1.000	0.981	1.019	1.019	1.038	-0.017
AU	2	5312	262/51	80/39	171/01	1.012	1.000	0.988	1.012	1.012	1.024	0.002
AV	19	27112	39/17	286/62	134/25	1.015	1.005	0.981	1.010	1.024	1.035	0.419
AW	4	7651	47/17	312/16	182/69	1.006	1.000	0.994	1.007	1.006	1.013	-0.098
AX	2	7132	72/04	310/83	163/06	1.009	1.001	0.990	1.007	1.012	1.019	0.221
*G6-1	14	844	257/48	78/42	348/01	1.016	1.000	0.983	1.016	1.017	1.034	0.032
*G6-2	9	550	277/50	95/39	186/01	1.008	1.001	0.991	1.007	1.010	1.017	0.131
SA	18	231	37/02	127/01	229/88	1.003	1.000	0.997	1.003	1.003	1.007	-0.022
SB	26	217	62/11	159/37	316/64	1.003	1.002	0.995	1.001	1.006	1.007	0.746
SC	25	281	241/83	129/03	38/07	1.010	0.997	0.993	1.012	1.004	1.016	-0.495
SD	7	349	21/10	286/28	128/66	1.014	0.996	0.990	1.019	1.005	1.024	-0.560
SE	4	1499	276/23	9/06	113/69	1.006	1.005	0.989	1.001	1.016	1.017	0.888
SF	15	216	48/03	138/05	100/83	1.009	0.999	0.993	1.010	1.006	1.016	-0.220
SG	18	117	226/03	316/06	100/83	1.011	0.998	0.990	1.013	1.008	1.021	-0.231
SH	12	283	203/07	112/02	4/82	1.014	0.999	0.987	1.015	1.012	1.028	-0.122

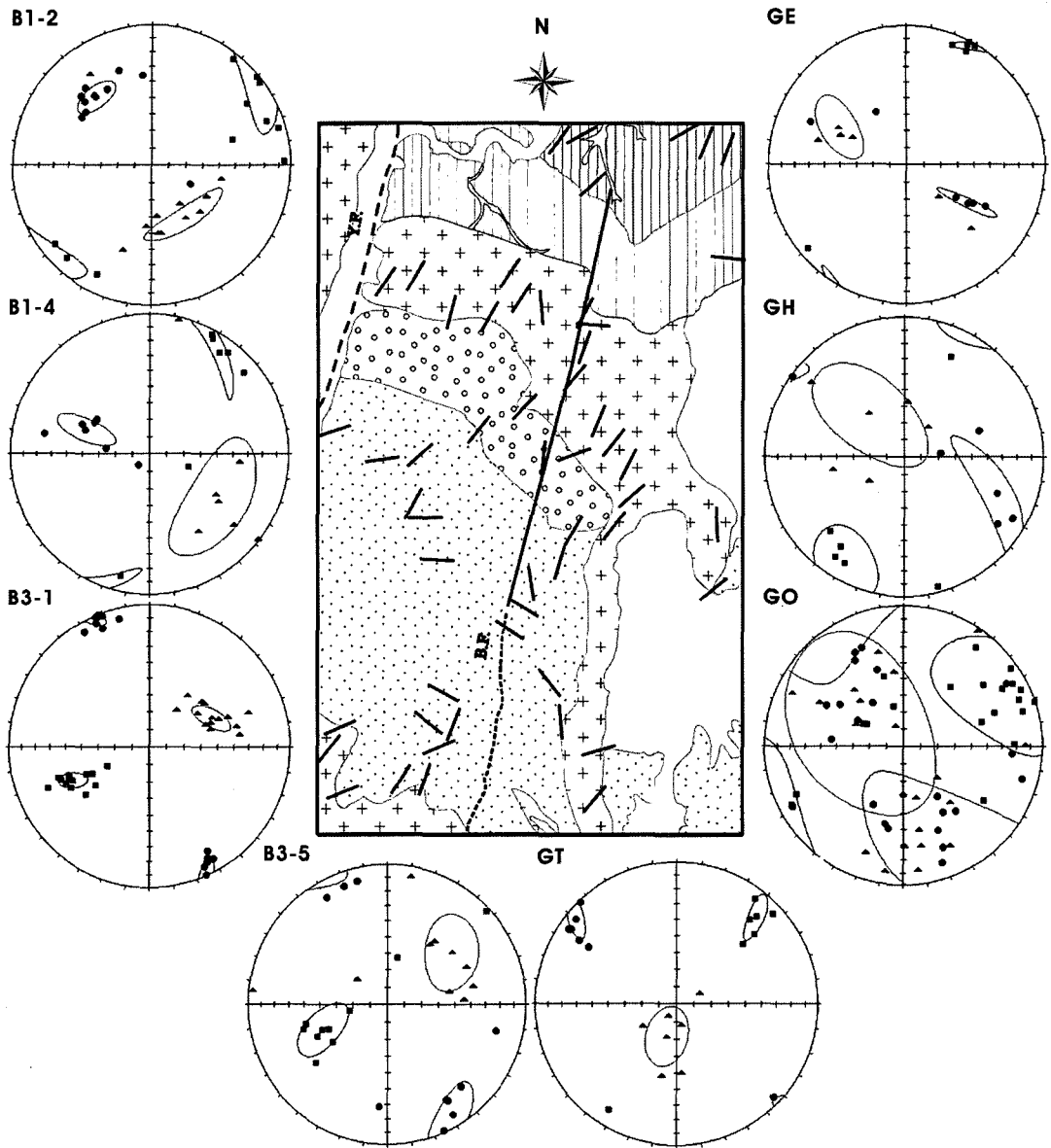
- n: number of specimens •  $k_{bulk}$ : magnitude of bulk susceptibility
- Principal directions of anisotropy ellipsoid: site-mean direction, declination/inclination of  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  after Jelinek (1978)
- Degree of Anisotropy:  $k'_1=k_1/\{(k_1+k_2+k_3)/3\}$ ,  $k'_2=k_2/\{(k_1+k_2+k_3)/3\}$ ,  $k'_3=k_3/\{(k_1+k_2+k_3)/3\}$
- AMS parameters:  $L=k_1/k_2$  after Balsley and Buddington (1958, 1960),  $F=k_3/k_2$  after Stacey *et al.*(1960, 1961),  
 $P_j = \exp\{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]\}^{1/2}$ ,  $\eta_1 = \ln k_1$ ,  $\eta_2 = \ln k_2$ ,  $\eta_3 = \ln k_3$ ,  $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$  after Jelinek (1981),  
 $T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3)$  after Jelinek(1981) and Hrouda(1982)

\*Borehole sampling site

사용하여 T- $P_j$  diagram(Jelinek, 1981, Hrouda, 1982; Tarling and Hrouda, 1993; Kim *et al.*, 1997; Choi *et al.*, 1998)을 도시하여 대자율 이방성의 정도 및 선구조와 엮리구조의 우세를 판단하였다. T- $P_j$  diagram에서는 오른쪽으로 갈수록(즉,  $P_j$  값이 클수록) 이방성의 정도가 큰 것을 의미하며, 상부로 갈수록(즉, T 값이 +쪽으로 클수록) 엮리구조가, 하부로 갈수록(즉, T 값이 -쪽으로

클수록) 선구조가 우세한 것을 의미한다.

이방성의 정도를 가늠하는  $P_j$  값에서는 화산암류가 가장 높은 값을 보이며 화강암질암, 퇴적암류의 순서로 낮아진다(Fig. 7). 화강암질암과 퇴적암류는 시료별로 대체로 비슷한  $P_j$  값을 보이지만 화산암류의  $P_j$  값은 편차가 큰 편이다. 이러한 양상은 역시 화산암류의 암상이 안산암 및 안산암질용회암, 유문석영안산암 등



**Fig. 5.** Map of site-mean magnetic lineation directions. Equal-area lower-hemisphere projections show  $k_1$  (square),  $k_2$  (triangle),  $k_3$  (dot) directions and their means of the representative granitic rock sites. Gray symbols and ellipses in the stereonets indicate site means of  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  directions and their 95% confidence ranges, respectively.

으로 매우 다양하며, 산상 또한 용암류에서 화산쇄설류, 천차관입(epizonal intrusion) 등으로 복잡 다양한 것에 관련된 것으로 판단된다. 앞에서 언급하였듯이 화산암류의  $k_1$ ,  $k_3$  방향과 총 대자율 값이 분산되어 나타나는 것도 역시 이러한 점이 원인일 것이다.

자기적 선구조와 엽리구조를 판별할 수 있는 T 값의 분포는 모든 암상에서 두 영역 걸쳐서 분산되어 나타난다(Fig. 7). 이는 암석내에 선구조와 엽리구조가 공

존함을 의미한다. 암석내에서 자기적 선구조만 우세한 경우에는 입체투영도(stereonet)상에서  $k_1$ 은 한 방향에 집중되고  $k_2$ 와  $k_3$ 는 대원상에 분포하며, 반대로 자기적 엽리구조만 우세한 경우에는  $k_3$ 가 한 방향에 집중되고  $k_1$ 과  $k_2$ 는 대원상에 분포하게 된다. 이에 반하여 선구조와 엽리구조 모두가 존재하는 경우에는  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 가 각기의 방향으로 집중하게 된다(Tarling and Hrouda, 1993). 연구지역 암석에서는  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 가 모두 각각의

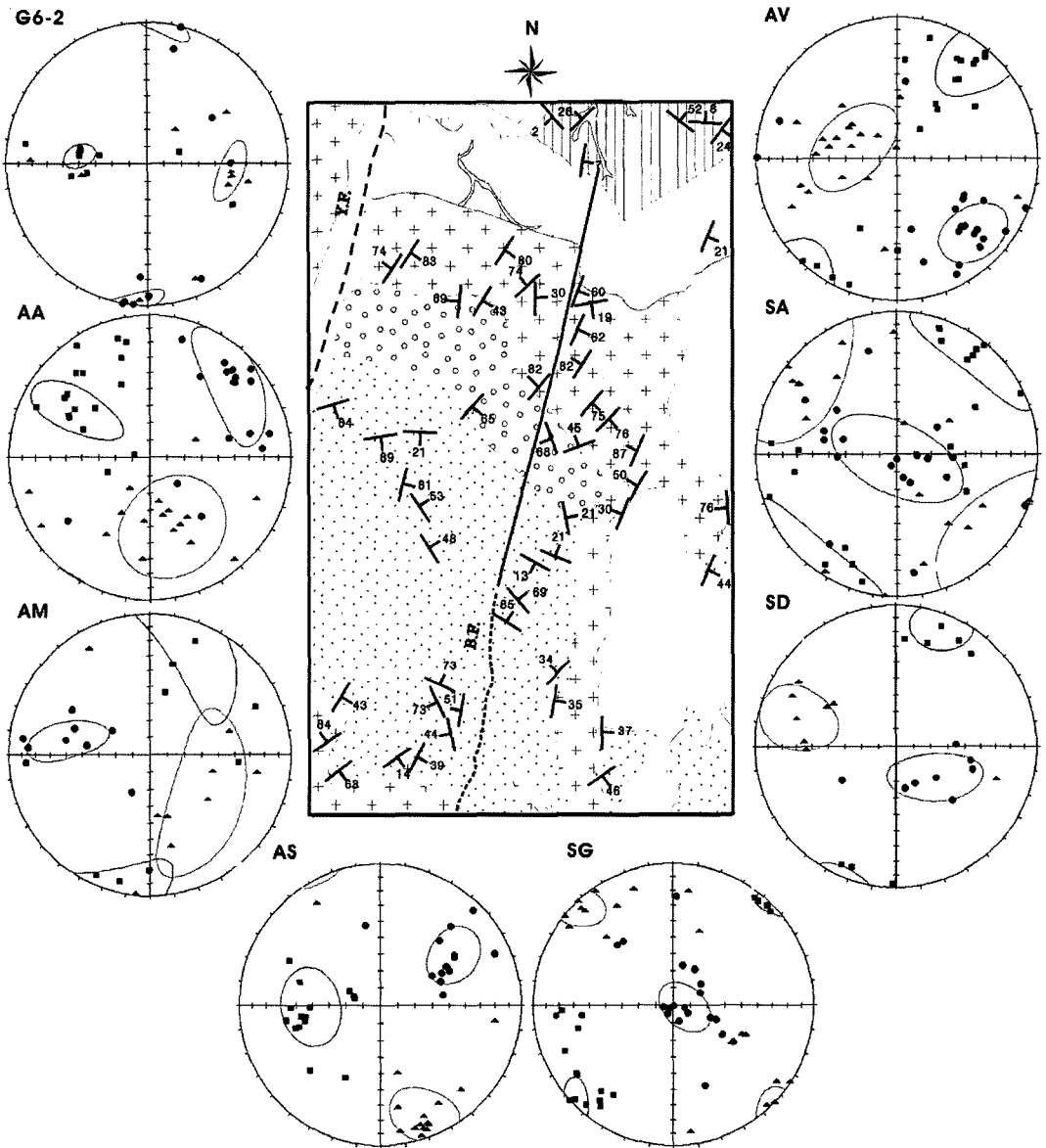


Fig. 6. Map of magnetic foliation directions. Equal-area lower-hemisphere projections showing  $k_1$  (square),  $k_2$  (triangle),  $k_3$  (dot) directions and their means of the representative volcanic and sedimentary rock sites. Gray symbols and ellipses in the stereonets indicate site means of  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  directions and their 95% confidence ranges, respectively.

방향으로 집중되어 있다(Fig 5, 6). 따라서 자기적 선 구조와 엽리구조가 모두 존재하는 것이다.

### 5. 토 론

화강암질암에 대한 대자율 이방성의 연구결과,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 축이 모든 장소에 걸쳐 대체로 일치하는 방향을

보였으며, 자기적 선구조와 엽리구조 모두가 존재하고 있음이 밝혀졌다.  $k_1$ 축 방향은 선구조 방향으로서 북동-남서 방향이 지배적이었고,  $k_3$ 축에 수직인 방향은 엽리구조 방향으로서 북동-남서 주향이 우세하였다. 또한  $k_3$ 의 방향이 수직이 아니고 20° 가량의 경사를 보이는 사실은 엽리구조가 지층의 하중에 의한 것(load foliation)이 아니라 지구조적 응력에 의한 것(tectonic

foliation) 임을 의미한다.

화강암질암에 나타나는 이 자기적 미세구조(magnetic fabrics)의 생성시기는 크게 두 가지로 분류될 수 있다. 하나는 마그마가 완전히 고화되기 전 결정죽(crystal mush) 상태에서 마그마의 유동이나 지구조적 응력의

작용으로 생성되는 것이고(=일차 미세구조, primary fabric), 다른 하나는 마그마가 완전 고화된 후 상당기간 이후에 지구조적 응력이나 변질변성작용에 의해 생성되는 것이다(=이차 미세구조, secondary fabric). 마그마 유동이나 응력의 작용에 의한 화강암의 일차 미

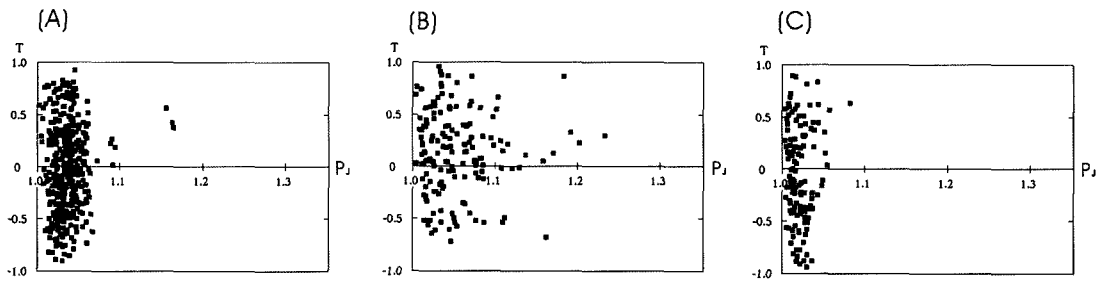


Fig. 7.  $P_j$ - $T$  diagrams for all specimens of granitic (A), volcanic (B), and sedimentary (C) rocks.

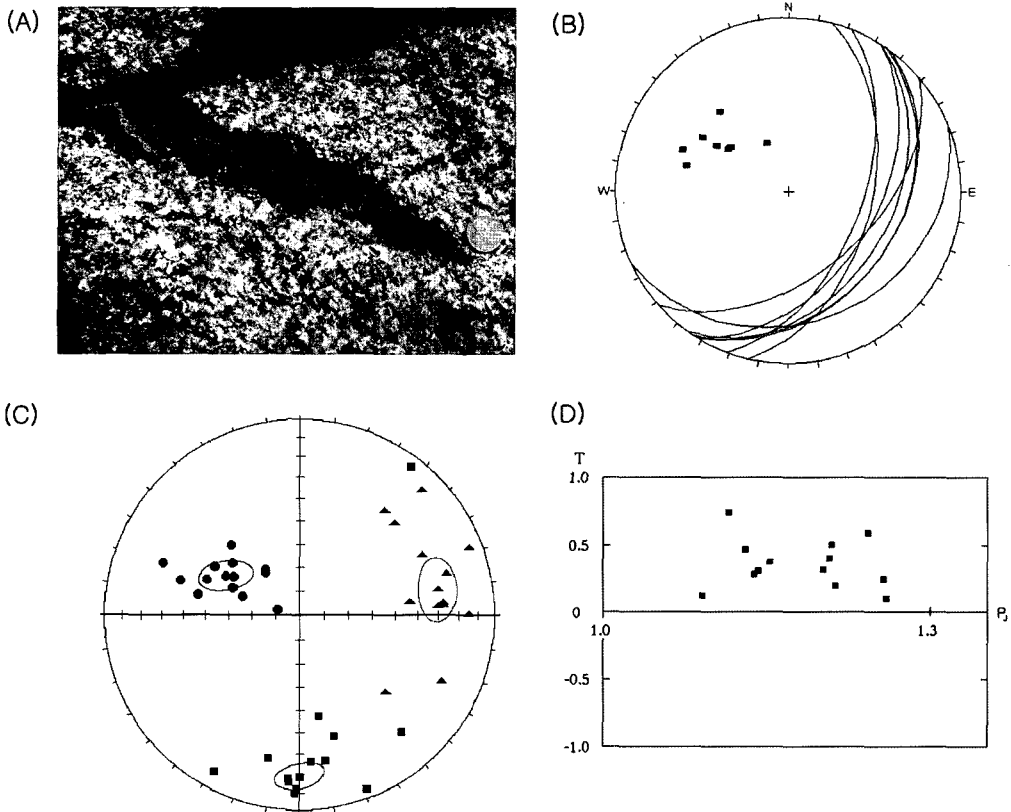


Fig. 8. Correlation of magnetic and geologic fabrics in the Andong granitic pluton.

(A) Photograph of elongated MMEs at an outcrop.

(B) Stereonet showing the attitude of the MME planes with their poles.

(C) Principal directions ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ) of AMS ellipsoids of the pluton matrix. Note that the minimum principal directions ( $k_3$ , dot) coincide well with the poles of the MME planes shown in (B).

(D)  $P_j$ - $T$  diagram showing dominance of magnetic foliation fabric.

세구조는 점성을 가진 결정축 상태에서 가장 잘 만들어지며, 고화된 이후에도 변형작용(deformation)으로 교란되지 않고 잘 보존되는 것으로 알려져 있다(Wagner *et al.*, 1981; MacDonald and Ellwood, 1988; Turling and Hrouda, 1993). 한편 낮은 깊이에서는 취성변형(brittle deformation)으로 이차 미세구조가 추가된다는 연구결과들도 있다(Hrouda *et al.*, 1971a, 1983; Duff, 1975). 중요한 사실은 일차 미세구조는 낮은 지구조적 응력에도 민감하게 반응하여 잘 만들어질 수 있지만, 이차 미세구조를 만들기 위해서는 보다 강한 지구조적 응력이 필요하다는 것이다.

연구지역 화강암질암에 나타나는 상기의 자기적 미세구조가 일차적인지 이차적인지를 구별하는 데는 본질적 어려움이 있겠으나, 아래와 같은 다양한 이유에서 마그마의 완전고화 이전에 형성된 일차적 미세구조라고 판단한다.

**5.1. 화강암질암내 다른 미세구조와의 비교**

자기적 미세구조(magnetic fabrics)가 일차구조인 경우에는 야외에서 관찰되는 장석 등의 광물배열이나 MME와 같은 포유암의 배열방향(magmatic fabrics)과 일치할 것이다. 이들은 공통적으로 마그마의 유동이라는 동일 생성기작의 산물이기 때문이다. 그러나 마그마가 완전히 고화된 후 변질로 인해 새로운 자성광물이 생성되어 만들어진 미세구조나 재결정 작용에 의한 미세구조, 그리고 새로운 지구조적 응력에 의한 미세구조들에서는 이러한 일치성이 나타나지 않는다(Hrouda *et al.*, 1971b; Ellwood *et al.*, 1980; Ellwood and Whitney, 1980). 이와 같은 일치성을 비교하기 위하여 경상북지 북부의 안동저반(Hwang *et al.*, 2002)을 대상으로 대자율 이방성 연구를 추가하여 검토하였다. 그 결과 관찰되는 장석반정이나 MME의 배열방향이 대자율 이방성 측정에 의한 자기적 열리구조의 방향과 훌륭한 일치를 보였다(Fig. 8). 이는 일차 미세구조의 특징을 잘 나타내는 것이다. 그러나 연구지역의 화강암질암에는 MME가 거의 없으며(Hwang, 2004) 육상상의 광물배열 또한 미약하므로 이러한 방법을 적용하기가 곤란하였다. 이는 마그마의 관입에서부터 완전고화까지 작용했던 지구조적 응력의 세기가 광물들의 거시적 배열을 야기할 정도로까지 강하지는 않았던 것으로 해석된다. 대자율 이방성의 정도를 가늠하는  $P_j$  값이 안동저반에 비해서 연구지역 화강암질암에서 현저히 낮은 것이 이를 뒷받침한다(Fig. 7A, 8D). 한편 안동단층, 대곡단층, 그리고 웅천단층이 지나가는 안동저

반에서 역시 마그마 고화 이후에 상당한 취성변형을 받았음에도 불구하고(Lee and Lee, 1963; Kim *et al.*, 1970; Chang, 1990), 대자율 이방성 결과에 의한 일차 미세구조가 훌륭히 보존해 있다는 것은 마그마의 완전고화 이후에 단층작용과 같은 취성변형에 의해서도 일차 미세구조의 교란이 쉽게 초래되지 않는다는 것을 시사한다. 이상과 같이 안동저반의 대자율 이방성 연구결과는 본 연구지역 화강암질암의 자기적 미세구조 또한 일차구조일 가능성을 시사한다.

**5.2. 화강암질암내 광물의 변형 모습**

한편, 마그마가 완전히 고화되기 전에 변형을 받게 되면 석영에서 파동소광(undulose extinction)이 나타나며, 흑운모에서는 구부러지거나 뒤틀림 현상(kinking)이 나타나는 것으로 알려져 있다(Bouchez *et al.*, 1992; Paterson *et al.*, 1998; Vernon, 2000; Talbot, 2005). 미약하지만 연구지역의 화강암질암에서도 이러

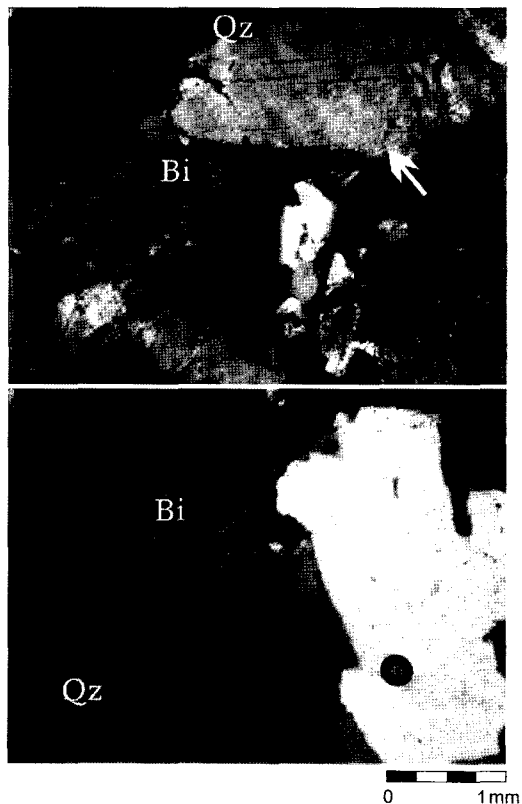


Fig. 9. Photographs showing evidence of magmatic deformation of the granitic rocks. Biotite grains (Bi) show weak kinking, while quartz grains (Qz) show undulose extinction (especially in both the left and the right sides of the arrowed grain).

한 특징들이 관찰된다(Fig. 9). 이들이 미약한 것은 앞서 언급한 바와 같이 작용한 지구구조적 응력장의 세기가 크지 않았던 때문으로 해석된다. 따라서 대자율 이방성의 정도를 나타내는  $P_j$  값도 안동저반에 비하여 약하게 나타난다.

### 5.3. 주변 모암의 조직 및 구조와의 비교

화강암질암이 관입한 화산암류나 퇴적암의 자기적 엽리구조 방향이 전자의 것과 상이하다는 것 또한 화강암질암의 자기적 미세구조가 일차구조라는 증거이다. 화강암질암은 북동-남서 방향의 일관성 있는 자기적 엽리구조를 보이지만 화산암류에서는 남-북, 북서-남동, 북동-남서 방향 등 복잡적으로 나타나며, 퇴적암류에서는 상부층의 하층에 의한 엽리구조만 나타나고 있다. 층서적으로 가장 후기인 화강암질암의 자기적 미세구조가 마그마 완전 고화이후의 지구구조적 응력장에 의한 이차 미세구조라면 층서적으로 전기인 화산암류와 퇴적암류의 자기적 미세구조도 동일한 방향으로 나타나야 할 것이다. 특히 화산암류나 퇴적암류는 화강암질암에 비하여 변형에 대한 저항력이 더 약한 물성을 가지기 때문에 더욱 두드러진 이차 미세구조가 나타나야 할 것이다.

또한 양산단층의 주변에서는 우수향 주향운동을 지시하는 인장절리 및 소단층, 그리고 북동 방향으로 우세하게 분포하는 암맥들이 보고되어 있다(Son *et al.*, 2003). 따라서 화강암질암의 자기적 미세구조가 마그마의 완전 고화 이후에 양산단층의 운동에 수반된 이차구조라면 우수향 운동을 지시하는 자기적 엽리구조가 우세하여야 할 것이며 이는 북서-남동 방향이어야 한다. 그러나 실제 연구지역 화강암질암에서 나타나는 자기적 엽리구조는 이와 달리 북동-남서방향이 압도적이다. 이는 사실 양산단층이 좌수향의 운동을 보일 때 만들어질 수 있는 자기적 엽리구조이며(Fig. 10), 이 역시 화강암질암의 자기적 미세구조가 일차구조라는 방증이다.

한편 여기서 또 검토되어야 할 것은 단층이나 지구조운동에 기인한 연구지역 지괴 자체의 수평회전(vertical axis rotation) 운동이다. 즉, 기존에는 다른 방향이었던 자기적 미세구조가 지괴의 수평회전으로 지금과 같이 북동-남서방향으로 나타날 가능성도 검토되어야 한다. 그러나 경상분지 전역에 걸친 잔류자기 연구(Kang, 1995; Kang *et al.*, 1996)에 따르면 신동충군 퇴적 이후에 경상분지 각 지괴는 상대적인 지괴회전운동을 일으키지 않았다. 특히 양산단층에 접근함에

다른 체계적인 편각방향의 변화나 단층선 양편 노두에서의 잔류자기 편각의 차이도 관찰되지 않았다. 이번 연구지역내의 범기단층(Fig. 1)의 경우도 마찬가지로(Fig. 5, 6). 따라서 화강암질암의 완전 고화 이후에 지괴의 회전이나 기울어지는(傾動) 운동은 없었던 것이므로, 이로 인한 미세구조 방향의 변화 가능성은 무시된다.

### 5.4. 마그마의 고화와 미세구조 형성

이상의 논의로부터 화강암질암내에 존재하는 자기적 미세구조는 마그마가 완전 고화되기 전의 결정축과 같은 상태에서 만들어진 일차구조이며 완전고화 이후의 지구구조적 응력장이나 양산단층의 운동에 관련된 변형 효과는 나타나지 않았음을 알 수 있다. 그러므로 화강암질암의 대자율 이방성 연구결과로 밝혀진 응력장은 마그마가 관입한 이후부터 완전고화 이전까지의 응력장을 의미한다.

마그마의 고화과정에서 언제 어떻게 미세구조가 획득되는지를 이해하기 위해서는 마그마 암석학적 지식이 필요하다(Rey, 2007). 마그마의 냉각에 따라 정출되는 고체 결정들의 체적비( $\phi$ )가 증가되면 점성도(viscosity)는 지수함수적으로 증가된다. 화강암 마그마의 경우 우선  $0.3 < \phi < 0.35$ 에 이르게 되면 지금까지 완전 액체(Newtonian fluid)로 작용하던 마그마는 가소성(pseudoplastic)을 띠게 된다. 이러한 물성변화가 일어나는 임계구간을 마그마 암석학자들은 FRT(First Rheological Threshold)라고 부른다. 마그마의 냉각 및 정출이 계속되어  $\phi > 0.5$ 의 상태를 돌파하게 되면 고체 결정들은 모두 서로 접하기 시작하고 점성 유체였던 마그마는 탄성 고체(elastic solid)적 물성을 가지게 된다. 화강암 마그마에서의 가장 중요한 변화는  $0.65 < \phi < 0.80$  상태인 SRT(Second Rheological Threshold)에서 일어난다. 이때 화강암 마그마는  $10^8$ 배에 달하는 급격한 점성도 증가로 액체적 성질을 벗어나 고체적(Bingham plastic) 성질로 전환된다. 간단히 말하자면 이 SRT는 액체에서 고체로 넘어가는 문지방인 셈이다. 이상은 액체의 마그마가 냉각되면서 고체로 되어가는 관점에서의 상황이었는 데 거꾸로의 관점 즉, 고체 암석이 용융되어 액체 마그마로 변화되어 가는 관점에서 고찰한 암석학자들도 이에 거의 일치하는 결론을 제시하였다. 즉, 부분용융의 정도가 15~35%에 달하면 고체였던 암석의 강도가 급격히 떨어져서 액체적 성격을 띠게 된다고 하는데, 그들은 이를 CMF(Critical Melt Fraction)나 RCMP(Rheological Critical Melt Percentage)라는

용어로 표현하였다(Arzi, 1978; Rosenberg, 2001).

이상은 사실상 마그마의 온도 변화에 따른 점성도의 변화만을 고려한 것이다. 그러나 고체와 액체를 가르는 실제의 CMF 값을 좌우하는 요인으로는 이밖에도 마그마의 화학적 성질은 물론, 정출결정의 조직, 입자 크기, 입자배열의 기하학적 상태, 등 다른 요인들도 있다(Rey, 2007). 특히 후자의 여러 요인들은 암석의 미세구조 형성을 다루는 이 논문에서 중요한 관심사가 되는데, 입자간의 접촉도(contiguity: C)의 개념으로 포괄하여 다루면 비교적 간단해진다(Miller *et al.*, 1988). 접촉도(C)란 마그마 내에서 고체 입자들이 공유하는 표면적의 비율(fraction of surface area)이다. 최초 10%의 부분용융이 일어나면 C 값은 1에서 0.45로 급격하게 떨어지며, C 값이 0.15~0.25로 내려가면 고체 암석을 지탱하는 골격구조(continuous self-supporting skeleton)가 붕괴된다고 한다. 이에 해당하는 부분용융은 50~65%인데 이는 과거 Arzi(1978)와 van der

Molen and Paterson(1979)이 제시한 15~35%의 CMF보다 상당히 큰 값이다. 이를 거꾸로 해석하면 냉각하는 마그마에서는  $0.35 < \phi < 0.50$ 의 상황에 벌써 고체의 골격이 형성된다는 뜻이 된다. 따라서 이 연구결과가 우리의 논문에 주는 의의는 상당히 크다. CMF 즉 “고체”에 미치지 못하 “결정죽” 상태의 마그마라 할지라도 접촉도(C)라는 기작(mechanism)에 의하여 결정들이 벌써 연속된 골격구조를 이룬다는 것이다. 이러한 상황에서 외부 응력이 작용하면 이 골격구조는 변형을 받게 되고 보다 늦게 정출되는 자철석 등의 자성광물들은 이 변형된 골격구조내의 공간에서 형태 이방성을 가지며 성장되는 것이다. 이것이 미고화 마그마가 자기적 미세구조(magnetic fabrics)를 가지게 되는 기작이다.

여기서 또 하나의 중요한 요인은 작용응력(differential stress)의 크기와 시간이다. 작은 응력이 오랜 동안 작용하는 경우에는(결국 low  $\dot{\epsilon}$ ) 오랜 결정죽 기간에 걸쳐

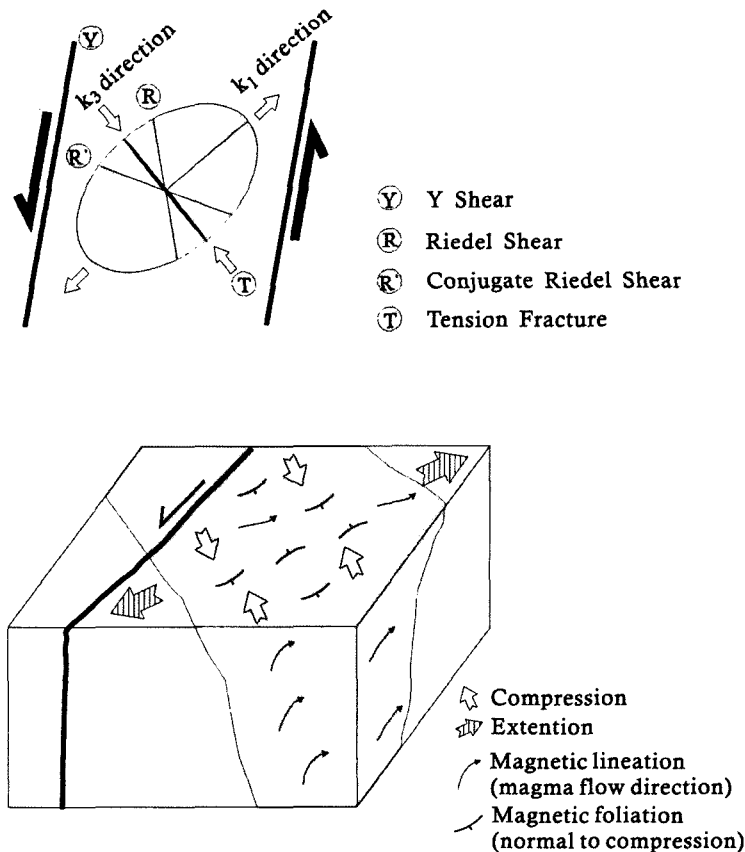


Fig. 10. Schematic representation of fracture patterns (upper diagram) and magnetic fabrics (lower diagram). Magnetic lineation and foliation were generated by the sinistral strike-slip movement of the Yangsan fault.

접촉도(C)와 골격구조가 유지되어서 점성효과의 증대를 가져오고 이에 따라 미세구조가 잘 형성되는 반면, 쉐인 응력이 급하게 작용하면 골격구조가 파괴되고 이에 따라 점성효과가 낮아져서 마그마가 액체처럼 작용하게 되므로 미세구조의 형성이 용이하지 않다는 것이다 (Rey, 2007). 이 논문의 연구지역인 양산단층에서의 상황은 전자이었던 것 같다. 다음 절에서 논의하겠지만 연구지역 화강암질암에 작용하였던 압축력의 방향은 양산단층의 주향에 거의 수직이어서 마그마가 받았던 좌수향의 응력(sinistral shear) 성분은 그리 크지는 않았던 것으로 추정되는데 실제로 측정된 자기 이방성의 정도( $P_j$ )도 상당히 낮은 편이다. 그러나 선구조와 엽리구조가 공히 잘 발달되면서 전 지역에 걸쳐 일관성 있는 방향을 가진다는 점은 미세구조의 생성효과가 높았음을 의미한다.

### 5.5. 양산단층의 좌수향 운동

앞서 살펴본 바와 같이 화강암질암의 자기적 엽리구조는 북동-남서 주향이 우세하고 이를 만든 응력은 북서-남동 방향의 압축력이다. 한편, 양산단층의 주향은 북북동-남남서 이다(Fig. 1). 따라서 화강암질암의 관입당시부터 완전히 고화되기 전까지는 양산단층이 좌수향 주향운동을 한 것으로 해석된다(Fig. 10). Lee *et al.* (1993)도 언양지역의 양산단층에서 동일한 방향의 엽리구조를 판별해내고 같은 결론을 내린 바 있다. 나아가서 지질도에 나타난 화강암질암의 관입산상이 북서-남동방향의 대상을 보이는데, 이 역시 양산단층의 좌수향 주향운동에 기인한 북서-남동방향의 인장균열을 통한 관입으로 해석된다(Fig. 10).

한편 연구지역의 화강암질암의 연령에 대해, Hwang (2004)은 Rb/Sr 동시선도를 통해서  $59.2 \pm 2.9$  Ma로, KIGAM(1995)은 K-Ar 흑운모 연령을 통해서 75 Ma로, Lee(1991)는 연구지역 남부에 분포하는 화강암질암의 Rb/Sr 전암연령을 통해서 71 Ma로 각각 보고하였다. 따라서 약 60~70 Ma를 전후하여 양산단층이 좌수향 주향이동 운동을 한 것이다. 이는 동해의 새로운 성인모델을 제시하면서 양산단층이 백악기로부터 중기에 오신 이전까지 좌수향 주향이동 운동을 하였다고 언급한 Kim(1992)의 의견과 잘 부합된다.

한편 화강암질암에서 북동으로 향하는 자기적 선구조는 마그마의 정치(emplacement)와 관련된 흐름방향을 지시하는 것으로 해석된다. 또한 화강암질암의  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  각기의 방향이 잘 집중된 양상은  $k_1$  방향 인장력과  $k_3$  방향 압축력의 두 힘이 동시에 작용하였음을

표현하는 것으로 해석된다. 즉, 양산단층의 좌수향 운동이(Fig. 10) 정치하는 마그마의 북동 방향 흐름과 북서-남동 방향의 압축력을 야기하여 화강암질암의 두 미세구조가 형성된 것이다. 그러나 이 압축방향이 양산단층의 주향과 거의 수직을 이루고 있어 마그마가 받았던 좌수향 응력(sinistral shear)의 강도는 그리 크지는 않았던 것으로 보인다. 이는 언양지역 양산단층의 경우(Lee *et al.*, 1993)에도 마찬가지이다. 따라서 위에서 언급한 바와 같이 자기 이방성의 강도를 표현하는  $P_j$  값도 안동저반 등에 비교하여 낮게 나온 것으로 해석된다.

결국, 이상을 요약해보면 다음과 같다. 즉, 백악기 말에서 신생대 초인 약 60~70 Ma경에 양산단층의 좌수향 주향이동으로 북서-남동방향의 인장균열이 만들어지고 화강암질 마그마가 남서에서 북동쪽으로 흐르며 관입정치되었으며 동시에 북서-남동방향의 압축력이 작용하였는데, 이 모든 결과로 북동-남서 주향의 자기적 선구조와 자기적 엽리구조가 생성되었다고 결론 지을 수 있다(Fig. 10).

끝으로 양산단층 주변에는 이 연구의 대상이었던 화강암질암과 시기를 달리하는 다른 관입암체들이 분포하는 바, 차후 이들에 대한 대자율 이방성 연구를 추가한다면 양산단층의 운동사에 대한 좀 더 훌륭한 정보를 획득하게 될 것으로 생각된다.

## 6. 요약과 결론

경상분지 남동부에 위치한 양산단층 동편의 화강암질암, 화산암류, 퇴적암류를 대상으로 대자율 이방성(AMS)연구를 실시하였다. 총 대자율 측정, 고온대자율 실험 및 동온잔류자기획득 실험으로부터 연구대상 암석들은 대자율 이방성 연구의 성공가능성이 높은 자철석 위주의 티탄자철석계열 자성광물로 이루어져 있음이 밝혀졌다.

연구의 주 대상암체인 화강암질암에서는 자기적 엽리구조와 자기적 선구조 모두가 나타나며, 이들의 주향은 북동-남서 방향이 우세하다.

이 자기적 미세구조들은 다양한 측면에서 마그마가 관입하여 완전히 고화되기 전에 응력을 받아 생성된 일차 미세구조라는 결론이 내려진다. 즉, 전통적 연구들에 의하면 화강암의 미세구조는 마그마가 완전고화되기 전의 결정축 상태에서 잘 만들어지고 고화 이후의 취성변형에 의해서는 쉽게 교란되지 않는다는 점, 층서적으로 후기인 화강암질암의 자기적 미세구조 방



향이 주변의 화산암류나 퇴적암류의 자기적 미세구조 방향과 일치하지 않는다는 점, 양산단층 주변에서 절리 및 소단층으로 구해낸 보다 거시적인 지질구조의 방향이 화강암질암의 미세구조의 방향과 일치하지 않는다는 점 등이 이 결론을 뒷받침한다. 그리고 잔류자기 연구결과에 의하면 이 양산단층 지역에서 지구의 수평회전운동이 일어나지 않았다. 따라서 화강암질암의 자기적 엽리구조는 마그마가 관입하여 완전히 고화되기 전까지의 지구조적 응력을 대변한다.

화강암질암의 북동-남서 주향의 자기적 엽리구조는 북서-남동의 압축력으로 만들어졌으며 이러한 응력은 양산단층의 좌수향 주향운동에 의해 야기되었을 것이다. 연구지역의 화강암류의 연령이 약 60~70 Ma로 알려진 것을 감안한다면 양산단층은 이 시기(백악기 말)에서 신생대 초에 걸쳐서 좌수향 주향이동 운동을 한 것으로 해석된다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호: R01-2006-000-10457-0)의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 대하여 감사드립니다. 또한 여러 가지 지적과 조언을 해주신 한양대학교 석동우 교수와 한국지질자원연구원의 이윤수 박사에게도 감사드립니다. 특히 이 논문의 심사과정에서 편집위원장인 고려대학교 최선규 교수께서 마그마의 고화과정에 관한 유익한 조언을 해주셨는 바, 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다. 끝으로 야외시료 채취와 제도작업을 도와준 우종하, 배성우, 김경아, 김옥진, 학우들에게도 깊이 감사합니다.

## 참고문헌

- Arzi, A.A. (1978) Critical phenomena in the rheology of partially melted rocks. *Tectonophysics*, v. 44, p. 173-184.
- Balsley, J.R. and Buddington, A.F. (1958) Iron-titanium oxide minerals, rocks and areo-magnetic anomalies of the Adirondack area, New York. *Econ. Geol.*, v. 53, p. 777-805.
- Balsley, J.R. and Buddington, A.F. (1960) Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and ortho-gneisses. *Amer. J. Sci.*, v. 258-A, p. 6-20.
- Bouchez, J.L. (1997) Granite is never isotropic: An introduction to AMS studies of granitic rocks, In "Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics" edited by Bouchez, J.L., Hutton, D.H.W. and Stephens, W.E. p. 95-112, Springer, New York.
- Bouchez, J.L., Delas, C., Gleizes, G., Nedelec, A. and Cuney, M. (1992) Submagmatic microfractures in granites. *Geology*, v. 20, p. 35-38.
- Bultler, F.R. (1992) Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes. Blackwell Scientific Publication, 319p.
- Chae, B.-G. and Chang, T.W. (1994) Movement history of Yangsan Fault and its related fractures at Chongha-Yongdok area, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 30, p. 379-394 (in Korean with English abstract).
- Chang, C.J. (2001) Structural characteristics and evolution of the Yangsan Fault, SE Korea. Ph. D. thesis of the Kyungpook National University, 259p. (in Korean with English abstract).
- Chang, C.J. and Chang, T.W. (1998) Movement history of the Yangsan Fault based on paleostress analysis. *J. Engineering Geol.*, v. 8, p. 35-49 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.W. (1990) Relative timing of shear zone formation and granite emplacement in the Yecheon shear zone, Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 23, p. 453-463.
- Chang, T.W., Chang, C.J. and Kim, Y.K. (1993) The geometric analysis of fractures near the Yangsan Fault in Eonyang area. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 26, p. 227-236 (in Korean with English abstract).
- Chang, T.W. and Choo, C.-O. (1999) Faulting processes and K-Ar ages of fault gouges in the Yangsan Fault Zone. *J. Korean Earth Science Soc.*, v. 20, p. 25-37 (in Korean with English abstract).
- Choi, E.-K., Kim, S.-W. and Kim, I.-S. (1998) Paleomagnetic results from the Okchon Belt: anisotropy of the magnetic susceptibility (AMS) and tectonic stress field in the northeastern Okchon Belt. *J. Korean Earth Science Soc.*, v. 19, p. 9-21 (in Korean with English abstract).
- Collinson, D.W. (1983) *Methods in Rock Magnetism and Paleomagnetism: Techniques and Instrumentation*. Chapman & Hall, London, 503p.
- Duff, B.A. (1975) The magnetic fabric of the Moruya Granite, New South Wales. *J. Geol. Soc. Austral.*, v. 22, p. 159-165.
- Ellwood, B.B. and Whitney, J.A. (1980) Magnetic fabric of the Elberton granite, northeast Georgia. *J. Geophys. Res.*, v. 85, p. 1,481-1,486.
- Ellwood, B.B., Whitney, J.A., Wenner, C.B., Mose, D. and American, C. (1980) Age, paleomagnetism and tectonic significance of the Elberton granite, northeast Georgia Piedmont. *J. Geophys. Res.*, v. 85, p. 1,481-1,486.
- Fisher, R.A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*. v. A217, p. 295-305.
- Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, v. 5, p. 37-82.
- Hrouda, F., Chlupacova, M. and Rejl, L. (1971a) The mimetic fabric of magnetite in some foliated granodiorites, as indicated by magnetic anisotropy. *Earth Planet. Sci. Letters*, v. 11, p. 381-384.
- Hrouda, F., Janak, F., Rejl, L. and Weiss, J. (1971b) The use of magnetic susceptibility anisotropy for estimating the ferromagnetic mineral fabrics of meta-

- morphic rocks. *Geol. Rundsch.*, v. 60, p. 1,124-1,142.
- Hrouda, F., Kahan, S. and Putis, M. (1983) The magnetic and mesoscopic fabrics of the crystalline complexes of the Strazovskévchry Mts. and their tectonic implications. *Geologica Carpathica*, v. 34, p. 717-731.
- Hwang, B.H. (2004) Petrology, isotope and petrogenesis of the granitic rocks in the southern Gyeongsang Basin. Ph. D. thesis of the Pusan National University, 309p. (in Korean with English abstract).
- Hwang, S.K., Jang, Y.D. and Lee, Y.J. (2002) Petrogenesis of plutonic rocks in the Andong Batholith. *J. Petro. Soc. Korea*, v. 11, p. 200-213 (in Korean with English abstract).
- Jelinek, V. (1978) Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Stud. Geophys. Geodet.*, v. 22, p. 50-62.
- Jelinek, V. (1981) Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, v. 79, p. 563-567.
- Kang, H.-C. (1995) Palaeomagnetism of Kyongsang Supergroup and igneous rock in the Kyongsang Basin, Korea. Ph. D. thesis of the Pusan National University, 190p. (in Korean with English abstract).
- Kang, H.-C., Kim, I.-S., Son, M. and Jung, H.-J. (1996) Paleomagnetic study of sedimentary and igneous rocks in the Yangsan strike-slip Fault area, SE Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 29, p. 753-765 (in Korean with English abstract).
- KIGAM (1995) Isotope age map of plutonic rocks in Korea, 1:1,000,000. *Sungji Atlas Co.*
- Kim, I.-S. (1990) Magnetic anisotropy and tectonic stress field of Tertiary rocks in Pohang-Ulsan area, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 23, p. 59-71 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.-S. (1992) Origin of tectonic evolution of the East Sea (Sea of Japan) and the Yangsan Fault System: a new synthetic interpretation. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 28, p. 84-109 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.S., Shin, K.C., and Lee, J.D. (2002) Petrographical study on the Yucheon granite and its enclave. *Geosciences Journal*, v. 6, p. 289-302.
- Kim, J.Y. (1988) A Study on the nature and movement history of the Yangsan Fault. Ph. D. thesis of the Pusan National University, 97p. (in Korean with English abstract).
- Kim, N.J. and Lee, H.K. (1970) Explanatory text of the geological map of Jungpyeongdong sheet, 1:50,000. *Geological Survey of Korea*, 19p.
- Kim, S.-W., Choi, E.-K., Jung, Y.-K. and Kim, I.-S. (1997) Paleomagnetic results from the Okchon Belt: anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and tectonic stress field in the Taebaek area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 30, p. 613-624 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y., Lee, K. and Seong, I.K. (1990) A geoelectric study on the structure of the Yangsan Fault, north of Kyeongju. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 26, p. 393-403 (in Korean with English abstract).
- Lee, D.S. and Lee, H.Y. (1963) Explanatory text of the geological map of Yeon sheet, 1:50,000. *Geological Survey of Korea*, 22p.
- Lee, J.D., Kim, I.-S., Yoon, S., Sang, K.N. and Kim, Y. (1993) Study on the Yangsan Fault in Eonyang area - with emphasis on fracturing and magnetic anisotropy-. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 29, p. 128-144 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.I. (1991) Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Kyongsang Basin, Korea -origin of micrographic granite-. Ph. D. thesis of the Tokyo University, 197p.
- Lee, K. and Han, W.-S. (1990) Electrical resistivity surveys in Yangsan Fault area near Kyongju. *J. Korean Geophys. Soc.*, v. 2, p. 259-268 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.S. and Kang, P.C. (1964) Explanatory text of the geological map of Yangsan sheet, 1:50,000. *Geological Survey of Korea*, 27p.
- Lee, Y.J. and Lee, I.K. (1972) Explanatory text of the geological map of Eonyang sheet, 1:50,000. *Geological Survey of Korea*, 22p.
- MacDonald, W.D. and Ellwood, B.B. (1988) Magnetic fabric of peridotite with intersecting petrofabric surfaces, Tinaquillo, Venezuela. *Phys. Earth Planet. Ints.*, v. 51, p. 301-312.
- Miller, C.F., Watson, E.B. and Harrison, T.M. (1988) Perspectives on the source, segregation and transport of granitoid magmas. *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, v. 79, p. 135-156.
- Park, J.K., Tanczyk, E.I. and Desbarats, A. (1991) Magnetic fabric and its significance in the 1,400 Ma Mealy Diabase Dykes of Labrador, Canada. *J. Geophys. Res.*, v. 93, p. 13,689-13,704.
- Paterson, S.R., Fowler Jr. K. Schmidt, K.L., Yoshinobu, A.S., Yuan, E.S. and Miller, R.B. (1998) Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos*, v. 44, p. 53-82.
- Rey, P.F. (2007) From segregation, transport, and emplacement of magmas, to the solid state deformation of granitoids: Microstructures, fabrics, and finite strain fields. <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Granite/Granite.html>.
- Rosenberg, C.L. (2001) Deformation of partially molten granite: a review and composition of experimental and natural case studies. *International Journal of Earth Sciences.*, v. 90, p. 60-76.
- Son, C.M., Lee, S.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S. (1978) Explanatory text of the geological map of Dongrae and Weolnae sheets, 1:50,000. *Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resource*, 27p.
- Son, M., Kim, I.-S. and Kang, H.-C. (2001) Paleomagnetism of the Okchon Belt, Korea: anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) and deformation of the Hwanggangri Formation in Chungju-Suanbo area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 34, p. 133-146 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, I.-S., Lee, D., Lee, J.-D., Kim, J.S. and Paik, I.S. (2000) Geological characteristics in the eastern part of the Ulsan Fault area, Korea: structural geology and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in the Tertiary Miocene Waup Basin. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 36, p. 195-216 (in Korean with English abstract).
- Son, M., Kim, J.S., Hwang, B.-H., Ryoo, C.-R., Ock, S.-S., Hamm, S.-Y. and Kim, I.-S. (2003) Geology and fracture distribution in the vicinities of the Cheonseong

- and Jeongjok Mountains. *J. Engineering Geol.* v. 13, p. 107-127 (in Korean with English abstract).
- Stacey, F.D., Joplin, G. and Lindsay, J. (1960) Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from S.E. Australia. *Geofiz. Pura Appl.*, v. 47, p. 30-40.
- Stacey, F.D., Lovering, J.F. and Parry, L.G. (1961) Thermomagnetic properties, natural magnetic moments, and magnetic anisotropies of some chondritic meteorites. *J. Geophys. Res.*, v. 96, p. 1,523-1,534.
- Suk, D. and Doh, S.-J. (1994) Anisotropy of magnetic susceptibility of Cretaceous volcanic rocks in Euseong area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 27, p. 411-420 (in Korean with English abstract).
- Talbot, J.Y., Chen, Y. and Faure, M. (2005) A magnetic fabric study of the Aigoual-Saint Guiral-Liron granite pluton (French Massif Central) and relationships with its associated dikes. *J. Geophys. Res.* v. 110, p. 1-14.
- Tarling, D.H. and Hrouda, F. (1993) *The magnetic anisotropy of rocks.* Chapman & Hall, 217p.
- Tauxe, L. (1998) *Paleomagnetic principles and practice.* Kluwer Academic Publishers, 299p.
- Van der Molen, I. and Paterson, M.S. (1979) Experimental deformation of partially melted granite. *Contr. Mineral. Petrol.* v. 70, p. 299-318.
- Vernon, R.H. (2002) Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. *Electr. Geosci.*, 5:2, 23p.
- Wagner, J.J., Hedley, I.G., Steen, C., Tinkler, C. and Vuagnat, M. (1981) Magnetic anisotropy and fabric of some progressively deformed ophiolitic gabbros. *J. Geophys. Res.*, v. 86, p. 307-315.

---

2006년 8월 16일 원고접수, 2007년 2월 23일 게재승인.