

## 대자율 이방성과 이의 지질학적 응용

도 성 재\*

### Anisotropy of Magnetic Susceptibility and Its Geological Applications

Seong-Jae Doh\*

**ABSTRACT** : Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), directional variation of susceptibility in a sample, indicates the relative magnitude and orientation of preferentially aligned magnetic grains in a rock sample and represents important aspects of rock fabrics. This observation leads to various studies which applied the AMS technique to numerous geological problems, especially sedimentology, petrology, structural geology, and tectonics. Since AMS is, relative to conventional methods of petrofabric measurement, quickly measured, easily interpreted, and providing quantitative data, AMS technique has evolved into a powerful tool for detection of rock fabrics and continues to draw the interest of non-specialists as well as magnetists. This paper represents the theory, techniques, and parameters of the relatively new AMS method for estimating petrofabrics and their various geological applications.

#### 서 언

대자율(magnetic susceptibility)은 외부 자기장(applied magnetic field)의 세기와 유도자화(induced magnetization) 강도의 비율로 시료의 자화능력 정도를 나타내며, 주로 자력 탐사시 자기이상(magnetic anomaly)의 해석에 이용되어 왔다. 일반적으로 자연시료의 대자율값은 측정방향에 따라 일정하지 않고 차이를 보여주는데 이러한 특성을 대자율 이방성(anisotropy of magnetic susceptibility, AMS)이라 하며, 이는 암석내에 포함된 자성광물 입자들의 배열방향(orientation)을 지시하여 준다. 시료의 모든 자기특성은 이 방성을 보여주나 이들 중 비교적 쉽고 빠르게 측정할 수 있는 대자율 이방성이 암석조직(petrofabric) 연구에 널리 이용되고 있다. 대자율 이방성 연구는 기존의 암석조직 연구에 주로 이용된 측광법이나 현미경을 이용한 방법들에 비하여 측정 속도가 빠를 뿐더러 정량적인 자료를 제공하는 이점이 있어 최근 많은 연구자들에 의하여 암석조직 연구에 이용되고 있다. 대자율 이방성의 지질학적 응용은 Ising

(1942)이 호상점에서 층리면과 평행한 방향의 대자율값이 수직인 방향의 대자율값 보다 큰 것을 인지하고 대자율 이방성을 퇴적학 연구에 응용한 이래로, 전문가는 물론 많은 비전문가들에 의하여 퇴적학, 암석학, 구조지질학, 해양지질학 등 여러 지질학 분야에 광범위하게 이용되기 시작하였다. 그러나 국내에서는 자기이상의 해석에만 대자율이 주로 이용되고 있을뿐, 대자율 이방성의 기타 지질분야에의 응용은 최근에 발표된 한편의 논문(김인수, 1990)을 제외하고는 전무한 실정이다. 본 논문에서는 비교적 측정이 간단하고 신속하여 누구나 쉽게 이용할 수 있는 대자율 이방성을 소개하여, 이에 관심있는 연구자들(특히 지구물리학 전공이 아닌 연구자들)이 여러 지질학 분야에 응용 및 활용을 할 수 있게 도움을 주고자 하는데 그 목적이 있다.

#### 대자율 이방성

대자율은 다음의 관계에 의하여 정의한다 :

$$k=M/H.$$

여기서 M은 유도자화(induced magnetization), H는 외부 자기장(applied magnetic field), k는 대자율이다. 대자율을 나

\* 고려대학교 지질학과(Dept. of Geology, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

타내는 기호는 시료의 단위 부피에 대한 부피 대자율 (volume susceptibility)은  $k_v$ 로, 단위 질량에 대한 질량 대자율 (mass susceptibility)은  $\chi$ 로 표시한다.

일반적으로 대자율은 시료내에 함유된 자성 광물의 종류 및 함량에 주로 영향을 받지만, 입자 크기와 입자 형태의 변화에도 민감한 반응을 보인다. 자성광물의 종류, 함량 및 입자 크기에 따른 대자율값의 변화는 모든 방향에서 균등하므로 측정 방향에 따른 대자율의 값의 차이를 나타내는 대자율 이방성에는 영향을 주지 못하고 (Harstra, 1982), 다음의 두가지 요인에 의하여 대자율 이방성이 일어날 수 있다: 1) 자성광물의 결정 구조(결정 대칭성)에 기인한 자기결정 이방성(magnetocrystalline anisotropy) 및 2) 자성광물의 입자 형태에 기인한 형태 이방성(shape anisotropy). 자기결정 이방성은 모든 자성광물의 고유 특성이며, 형태 이방성은 타원체나 판상등의 형태와 같은 등크기가 아닌 (non-equidimensional) 자성광물들이 일정한 방향성을 갖는 배열에 기인한 것이다. 만약 종류, 크기, 입자 형태가 동일한 자성광물이 함유된 두 시료들 중 한 시료에는 자성광물 입자들이 불규칙한 방향으로 배열되어 있고 다른 시료에는 특정한 방향으로 배열되어 있다고 가정할 경우, 첫째 시료의 대자율은 모든 방향에서 동일한 등방성을 보여주나, 두번째 시료는 자성광물 입자의 배열 방향으로 최대의 대자율 값을 갖는 이방성을 보여준다. 자연 상태에서 암석이나 퇴적물 내에 함유된 등크기의(equidimensional) 자성광물 결정축이 일정한 방향으로 배열되기는 매우 드문 일이므로 자기결정 이방성 보다 형태 이방성이 암석이나 퇴적물 시료에서 관찰된 이방성의 일반적인 원인이다. 화성암의 경우는 마그마의 유동 과정에서 자성광물 입자들이 유동 방향으로 배열되고, 퇴적물이나 퇴적암의 경우에는 퇴적 과정에서 층리면 방향이나 유수의 방향으로 퇴적되어 형태 이방성을 갖는다. 변성암에서는 변성작용 과정 중 작용한 응력(stress)이 입자 배열의 주 요인으로 작용하며, 이러한 형태 이방성을 흔히 조직 이방성(textural anisotropy)이라 한다.

개별 자성광물 입자의 형태 이방성은 자성광물 입자 모양과 밀접한 관련이 있는 demagnetizing factor에 기인한 것이다. 외부 자기장(H) 하에서 자성광물 입자 내에 작용하는 효과 자기장(effective magnetic field,  $H_i$ )은 아래와 같이 나타낸다.

$$H_i = H - NM$$

여기서 N은 demagnetizing factor이며, M은 효과 자기장에 의한 유도자화로 자성광물의 고유 부피 대자율 (intrinsic volume susceptibility)을  $k_i$ 라 하면  $M = k_i H_i$ 로 나타낼 수 있다. 상기 두 식에서  $H_i = H - Nk_i H_i$ 이므로  $H = H_i(1 + Nk_i)$ 이다. 자성광물의 관찰된 부피 대자율( $k$ )은 유도자화(M)와 외부 자기장(H)의 비율이므로  $k = M/H = k_i H_i / H_i(1 + Nk_i) = k_i / (1 + Nk_i)$ 로 나타낼 수 있다. 여기에서  $k_i$ 는 자성광물의 고유 부피 대자율이므로,  $k$ 값은 N에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 자성광물의 N값은 방향에 따라 다르므로 구형과 같은 등크기가 아닌 자성광물의 경우 측정 방향에 따라 관찰되는  $k$ 값이 변하여 이방성을 갖는다. 바늘형태와 같이 한 축의 길이가 다른 축들에 비하여 매우 긴 자성광물의 경우 장축 방향의 N값은 0에 가깝고, 이에 수직한 축 방향의 N은 2에 근사한 값을 갖는다. (Stacey and Banerjee, 1974). 그러므로, 상기 식에서 장축 방향은  $k = k_i$ , 이에 수직한 축의 방향은  $k = k_i / (1 + 2k_i)$ 가 되므로, 측정 방향에 따라  $k$ 값의 차이를 보여준다. 예를들면, 자철석의 경우 (111)방향이 최소의 N값을 가지므로 이 방향으로 자화가 가장 쉽게 되며 대자율도 최대의 값을 갖는다.

### 측정방법

대자율 이방성은 여러 기자재 및 방법을 이용하여 측정할 수 있으나, 낮은 자기장(low magnetic fields)을 이용한 torsion-fiber magnetometer (torsion balance), spinner magnetometer, susceptibility bridge, cryogenic magnetometer 등의 기자재를 이용하여 측정하는 것이 일반적이다. 이들 중에서 spinner magnetometer, cryogenic magnetometer, susceptibility bridge는 대자율 이방성을 매우 신속히 측정할 수 있으나 기계의 민감도가 낮으므로, 이들 기자재에 비하여 측정속도는 느리나 민감도가 매우 높은 torsion-fiber magnetometer가 대자율 이방성 측정에 가장 선호되고 있다. Torsion-fiber magnetometer는 축이 수평인 Helmholtz coils 중심에 인청동 섬유(phosphor bronze fiber)를 이용하여 시료를 매달아 강도가 낮은 교류 자기장(<5 mT)의 영향하에서 생기는

는 염력(torque)을 측정하는 방법으로, 0-180° (King and Rees, 1962) 혹은 0-360° (Stone, 1967)를 회전하며 45° 간격으로 상호 수직인 3면에 대하여 측정을 한다. 또한, spinner magnetometer를 이용하여 측정한 이방성은 시료의 형태에 의하여 이방성 값이 많은 영향(sample-shape effect)을 받는 반면, torsion-fiber magnetometer를 이용하는 경우는 시료 형태에 의한 영향이 없는 장점이 있다(Kent and Lowrie, 1975). 높은 자기장 (high magnetic fields)을 이용한 대자율 이방성 측정방법(예, vibrating sample magnetometer)은 일반적으로 이용되지는 않으나, 낮은 자기장을 이용한 방법이 대자율 이방성의 반자성 (diamagnetic), 상자성 (paramagnetic), 페리자성(ferrimagnetic) 성분들을 구분할 수 없는 반면, 높은 자기장을 이용한 방법은 대자율 이방성에 비자성광물(반자성 및 상자성광물)의 기여를 판독하는데 중요한 역할을 하므로, 자성광물의 함량이 매우 낮은 시료의 경우는 높은 자기장을 이용한 측정이 필요하다.

측정된 대자율 이방성 자료의 신뢰도 확인 방법 중 비교적 간단하고 신속한 방법은 동일시료를 여러차례 측정하여 최소자승법(a least square method)을 이용하여 최적 값을 계산한 후, 이 최적 값과 최초에 측정된 값과의 차이를 계산하여 root mean square (RMS) error를 계산하는 것이다. RMS error는 계산치와 측정치의 일치 정도를 나타내며, 만약 대자율의 분포가 이계 대칭 텐서 (a second order symmetric tensor) 혹은 3축 타원체로 잘 나타낼 수 있다면, RMS error가 낮은 값을 갖는다. 또한, 시료의 대자율이 크다 할지라도 각 방향별 대자율의 차이가 적은 경우, 이 차이를 감지할 수 있을 정도로 측정기기가 충분히 민감하지 못하면, 측정된 자료를 이용하여 나타내는 대자율 이방성 타원체(AMS ellipsoid)의 형태를 적절히 해석하지 못하므로 대자율 이방성 자료의 신뢰도가 낮아진다.

### 대자율 이방성 변수

측정된 대자율 이방성 자료는 시료 내에 함유된 자성광물 입자들의 형태 및 분포를 해석하는데 이용되는 대자율 이방성 타원체로 나타낸다. 이방성 시료의 유도자화 방향은 외부 자기장의 방향과 일치하지 않으므로 유도자화( $M_i$ )는 아래와 같이 이계 대칭 텐서( $k_{ij}$ )로 나타낼 수 있다.

$$M_i = k_{ij}H_j \quad (i, j=1, 2, 3)$$

여기서  $H_j$ 는 각 축방향에 따른 외부 자기장이다. 이계 대

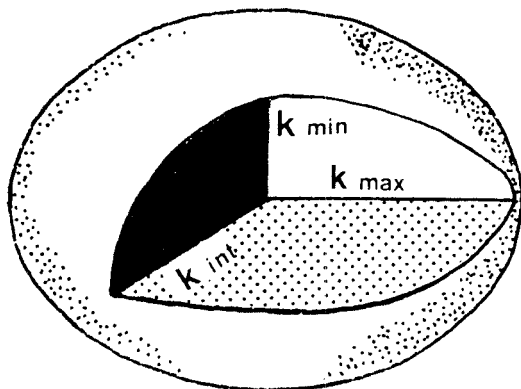


Fig. 1. Anisotropy of magnetic susceptibility ellipsoid.  $k_{max}$ ,  $k_{int}$ , and  $k_{min}$  represent the maximum, intermediate, and minimum susceptibilities, respectively.

칭 텐서( $k_{ij}$ )는 대자율 이방성 타원체의 계산에 이용되며, 최대, 중간, 최소의 대자율 값을 나타내는  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{33}$ (일반적으로  $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{min}$ 으로 인용)의 크기와 방향으로 대자율 이방성 타원체의 형태와 방향을 규정한다 (Fig. 1). 대자율 이방성 타원체는 시료내에 함유된 자성광물의 조직(fabric)을 기하학적으로 묘사한 것으로 축들의 비율인 대자율 이방성 변수들(AMS parameters)로 나타낸다. 자성광물 조직(magnetic fabric) 연구에 이용되는 변수들은 여러 연구자들에 의하여 적어도 25개가 보고 되었지만, 가장 일반적이고 간단한 축들의 비율은 다음과 같다.

- $L = k_{max}/k_{int}$  = lineation factor
- $P = k_{max}/k_{min}$  = anisotropy factor
- $F = k_{int}/k_{min}$  = foliation factor

최대 대자율값과 최소 대자율값의 비율인 anisotropy factor, P는 대자율 이방성을 나타내는 변수로, 화성암이나 퇴적물은 1.01-1.20, 구조적으로 변성을 받은 변성암은 2.0까지의 값을 보여준다. 또한, 대자율 이방성의 측정 결과는 자기 염리구조(magnetic foliation)와 자기 선구조(magnetic lineation)로도 흔히 나타내는데 자기 염리면(magnetic foliation plane)은 최소 대자율 축( $k_{min}$ )에 수직인 면, 자기 선구조는 자기 염리면상에서 최대의 이방성을 갖는 축의 방향으로 정의하고, 대자율 이방성 타원체의 배열 방향은 자기 염리면의 경사각으로 나타낸다.

대자율 이방성을 이용한 암석이나 퇴적물의 조직 연구 방법의 유용한 관점 중의 하나는 조직의 형태(shape) 및 이방성 크기(magnitude)에 관한 정량적인 자료를 제공해 주는 것으로, 다음의 변수들로 나타낼 수 있다.

**형태 변수(shape parameter):** 대자율 이방성 타원체의 형태를 나타내는 변수는 다음과 같이 계산한다.

$$q = (k_{max}/k_{int}) / \{ (k_{max} + k_{int}) / 2 - k_{min} \}$$

q는 0(순수한 자기 엽리구조)에서 2(순수한 자기 선구조) 사이의 값을 가지며, 인공시료나 자연시료의 연구에 의하면 편원(oblite) 형태(디스크 형태)의 조직이 우세한 경우는  $k_{max} > k_{int} > k_{min}$  및  $q < 0.67$ , 편장한(prolate) 형태(시가 형태)의 조직이 우세한 경우는  $k_{max} \gg k_{int}$ ,  $k_{min}$  및  $q > 0.67$ 의 특성을 갖는다(Hamilton, 1967; Hamilton and Rees, 1970; Kent and Lowrie, 1975; Flood et al., 1985) (Fig. 2). 또한, foliation factor와 lineation factor의 비율인  $F/L = E$ 는 대자율 이방성 타원체의 편심율(eccentricity)을 나타내는 변수로,  $E < 1$ 이면 타원체가 편장한 형태를 하며 자기 선구조가 자기 엽리구조보다 우세하게 발달하였음을 나타내고,

$E > 1$ 이면 타원체가 편원 형태를 하고 자기 엽리구조가 우세하게 발달하였음을 나타낸다 (Fig. 2).

**크기 변수 (magnitude parameter):** 조직의 발달 등급을 나타내는 이방성 크기 변수는 아래와 같이 계산한다.

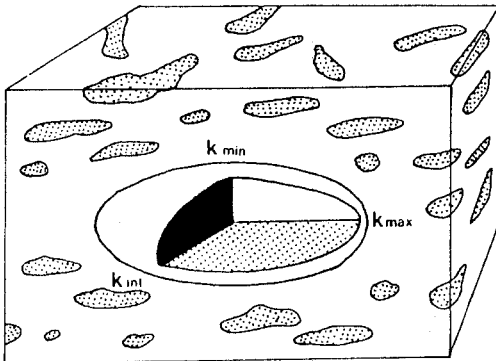
$$h(\%) = [(k_{max} - k_{min}) / \{ (k_{max} + k_{int} + k_{min}) / 3 \}] \times 100$$

등방성의 경우는 h값이 0이고, 내부 조직의 발달이 증가함에 따라 h값이 높아지며 (Hrouda, 1982), 일반적으로 h는 30% 이하의 값을 갖는다.

### 지질학적 응용

Graham(1954)이 암석의 대자율 이방성을 암석조직 연구 및 구조해석에 응용할 수 있음을 제시한 후, 많은 연구자들이 퇴적암, 화성암, 변성암을 대상으로 대자율 이방성 연구를 수행하여 본 연구 방법이 신속하고 정량적인 암석 조직 연구 및 구조해석 연구 방법으로 이용할 수 있음을 입증하였다. 많은 연구 결과에 의하면(예, Balsley and Buddington, 1960; Khan, 1962; Graham, 1966; Hrouda and

#### FOLIATION

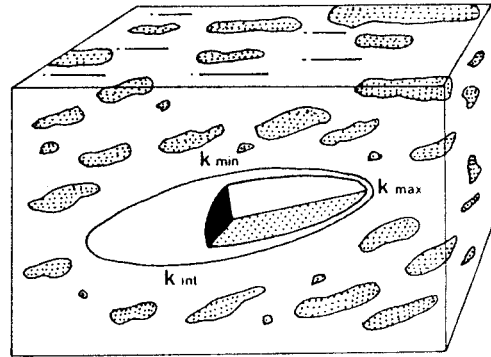


$$k_{max} > k_{int} > k_{min}$$

$$q < 0.67, E > 1.00$$

GRAVITATIONAL SETTLING  
LITHOSTATIC PRESSURE  
TECTONIC STRESS

#### LINEATION



$$k_{max} > k_{int} \approx k_{min}$$

$$q > 0.67, E < 1.00$$

CURRENT-INFLUENCED SEDIMENTATION  
LAVA FLOW

Fig. 2. Shape of anisotropy of magnetic susceptibility ellipsoid. The ellipsoid is oblate (foliar fabric or magnetic foliation) for  $q < 0.67$  and  $E > 1$ , whereas the ellipsoid is prolate (linear fabric or magnetic lineation) for  $q > 0.67$  and  $E < 1$ .

Janak, 1971; Ellwood, 1979) 암석의 AMS principal axes( $k_{max}$ ,  $k_{int}$ ,  $k_{min}$ )는 일반적으로 마그마의 관입 혹은 분출시나 그 이후의 유동과정, 퇴적물 입자의 퇴적과정이나 압축작용, 구조적 응력작용 등의 요인들에 의하여 일반적으로 다음과 같이 배열됨을 관찰하였다: 1)  $k_{min}$ 은 암석의 엽리면에 수직인 방향으로 배열, 2)  $k_{min}$ 축은 최대 압축방향(maximum compression, uniaxial or biaxial)과 평행하게 배열, 3)  $k_{max}$ 는 유동방향과 평행하게 배열, 4)  $k_{max}$ 는 엽리면 내에 발달한 선구조와 평행하게 배열, 5)  $k_{max}$  축은 주 압축 방향에 수직 방향으로 배열, 6)  $k_{max}$  축은 최대 연장(extension) 방향과 평행하게 배열, 7)  $k_{max}$ 는 습곡축의 방향과 평행하게 배열. 또한, 편린 형태의 타원체는 일반적으로 층리면에 평행하게 배열되어 압축효과(compaction effects)를 제시하거나, 벽개면(cleavage)에 평행하게 배열되어 구조적 압축(tectonic compression) 방향을 제시하고, 편장한 형태의 타원체는 마그마의 유동방향, 육상 및 해양환경에서 유수의 방향을 따라 배열되거나, 구조적 운동에서 연성 유동(plastic flow)이나 장력 방향과 평행하게 배열된다 (Fig. 2). 이러한 관찰에 근거를 두어 대자율 이방성을 여러 지질학 문제에 응용한 몇가지 예를 간략히 소개하면 다음과 같다.

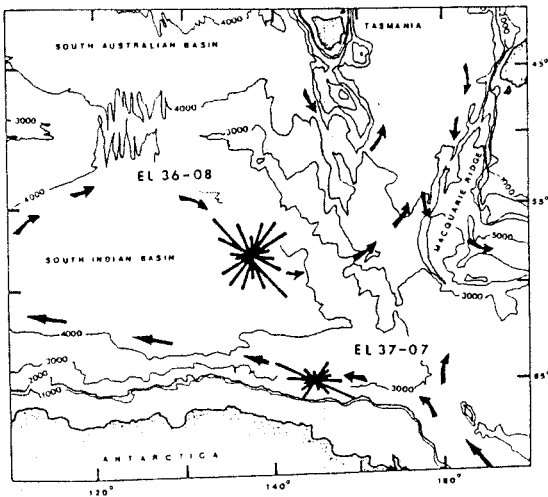


Fig. 3. Orientation of the maximum susceptibility ( $k_{max}$ ) axes for two sediment cores from southern Indian basin in relation to the Antarctic Bottom Water (AABW) (after deMenocal, 1986).  $k_{max}$  orientations are consistent with the deep circulation patterns of AABW (arrow).

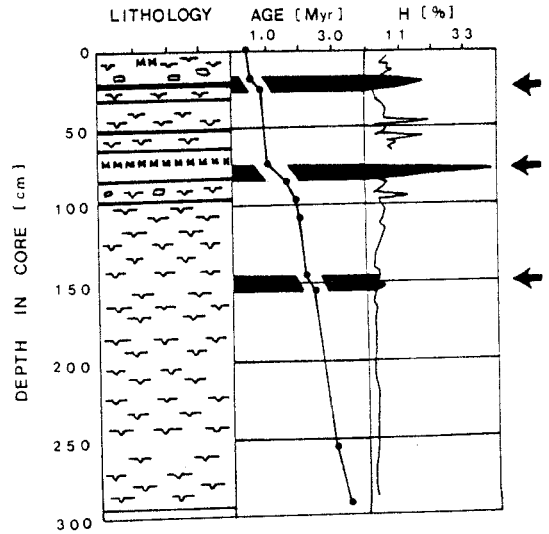


Fig. 4. Downcore age and AMS magnitude parameter(h) for a core from the southern Indian basin (after deMenocal, 1986). The solid arrows and band indicate the hiatus locations as identified from diatom and magnetic polarity stratigraphy.

퇴적물 및 퇴적암

퇴적작용이 일어나는 동안 퇴적 입자들은 일반적으로 두 가지 요인에 의하여 배열된다. 중력에 의하여 층리면 방향에 평행하거나 거의 평행하게 배열하여 층리구조를 보여주거나, 퇴적 당시 유수의 유동방향으로 입자들이 배열되어 선구조를 보여준다. 퇴적 당시 자성광물 입자들의 배열은 비자성 퇴적물 입자들의 배열과 동일하고, 자기 엽리구조는 대자율 이방성 중  $k_{max} - k_{int}$ 를 포함하는 면의 방향으로, 자기 선구조는  $k_{max}$  축의 방향으로 나타나므로, 자성광물 입자의 조직 연구를 통하여 고수류의 방향이나 퇴적환경의 특성을 추론할 수 있다. deMenocal(1986)은 남부 인도양에서 채취한 두 개의 퇴적물 코어를 대상으로 대자율 이방성을 측정된 결과  $k_{max}$ 축의 방향이 연구지역에 우세하게 흐르는 남극 심해류(Antarctic Bottom Water)의 방향과 일치함을 발견하였다 (Fig. 3). 또한, 수직방향으로 연속적인 대자율 이방성 측정 자료는 생층서 및 자기층서를 통하여 확인된 부정합면의 위치에서 높은 h값을 보여줌을 발견하고 (Fig. 4), 심해류의 강도가 강해짐에 따라 퇴적물의 침식 혹은 퇴적작용 중단과 동시에 퇴적물 입자들의 배열로 이방성이 발달한 것으로 해석하였다. 이밖에 대자율 이방성은

심해류에 의한 퇴적물 운반 방향 및 고심해류의 상대적인 강도 연구 (i.e., Ellwood and Ledbetter, 1977 and 1979; Ellwood, 1979 and 1980; Auffret et al., 1981; Rees et al., 1982; Flood et al., 1985), turbidites, contourites 및 deep-sea channel deposits 등과 같은 심해저 퇴적물의 운반기구 (transportation mechanism)와 퇴적과정 규명에 (Shor et al., 1984) 널리 이용되고 있다.

## 화성암

마그마가 관입하는 과정의 최종단계에서는 마그마가 연성 유체(plastic fluids)와 같은 특성을 보여주어 자성광물과 같은 단단한 입자들(rigid particles)이 연성 변형(plastic strain)에 의하여 최대의 변형 방향으로 입자들의 장축이 배열된다. 그러므로, 화성암이 고화되는 동안에 일어난 연성 유동이나 변형 방향과 평행하게 자성광물 입자들의 장축이 배열된다. 이러한 관점에 근거를 두어 용암, 혹은 관입암체의 유동과정이나 형성과정 혹은 이에 수반된 구조적 변형(tectonic strain)에 관한 정보를 얻기 위하여 대자율 이방성을 이용한 암석의 미세조직(microfabric) 연구가 성공적으로 수행되고 있다. Ellwood and Whitney(1980)는 미국

Georgia 주의 북동지역에 분포하는 화강암의 대자율 이방성 연구를 통하여 마그마의 근원지(source) 및 유동방향(flow direction)을 결정하였다. Fig. 5는 연구지역의  $k_{max}$ 의 평균방향을 도시한 것이다. 여기서 마그마의 유동방향을 나타내는  $k_{max}$  방향이 북동부(A 지점)와 남쪽의 중앙부분(B 지점)을 중심으로 방사상 형태로 나타내는 것을 관찰할 수 있다. 이 방향을 확실히 관찰하기 위하여는 보다 많은 자료가 필요하지만 Ellwood and Whitney는  $k_{max}$  방향이 연구 지역에서 마그마의 근원지로 부터 흐른 유동방향을 나타내는 것으로 해석하였고, 이 결과는 광물학 및 암석학적 연구 결과와 일치함을 보여주었다.

분출암의 분출위치 발견 및 용암의 유동방향 추정에도 대자율 이방성 연구가 유용하게 이용된다 (Ellwood, 1982; Knight et al., 1986). Ellwood(1982)는 미국 Colorado 주의 San Juan volcanic field에 분포하는 용결 응회암의 유동방향을  $k_{max}$  방향에 의하여 결정하고,  $k_{max}$ 가 서로 교차하는 지점을 이용하여 분출위치를 판별하였다 (Fig. 6). 이밖에 Birch(1979)는 미국 New Hampshire 주 남동부에 분포하고 있는 괴상(massive)의 Exeter pluton에서  $k_{max}$ 의 방향이 심성암체(pluton)의 장축 방향과 심성암체의 관입으로 발달한 향사의 축 방향에 평행하게 발달되어 있고 자기 엽리구조는 심성암체의 주변부가 가장 강하게 발달되어 있어, 심성암체의 주변부를 따라 마그마가 상승하는 과정에서 자기조직(magnetic fabric)이 발달하였음을 밝혔다. Heller(1973)는 대자율 이방성을 이용하여 측정한 자기조직과 화강암의 광역적인 구조와의 연관관계를 연구하여 자기조직을 암석 형성과정의 상대적 순서를 제시해 주는 증거로 이용할 수 있음을 제시하였다.

## 변성암

구조지질학자들은 암석에 발달한 조직을 이용하여 변성암의 변형을 측정하지만, 선구조, 엽리구조, 혹은 다른 변형구조(deformed structures)들과 같은 명확한 변성조직이 발달하지 않은 변성암의 경우는 변형을 측정하기가 쉽지 않다. 그러나, 변성작용이 일어나는 동안 고온·고압하에서 암석이 연성 변형(plastic deformation)에 의하여 영향을 받은 대자율 이방성 타원체를 이용하면 외관상으로 변형구조들이 발달하지 않은 변성암의 변형이나 응력방향 등을 측정할 수 있다.

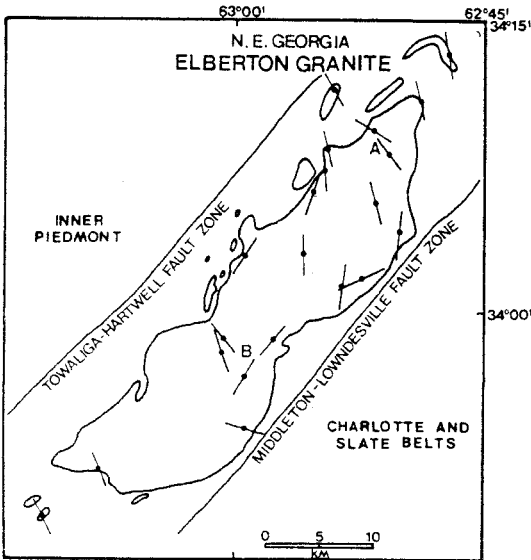


Fig. 5. Flow direction based on  $k_{max}$  AMS orientation (bars). A and B are inferred possible magma sources (after Ellwood and Whitney, 1980).

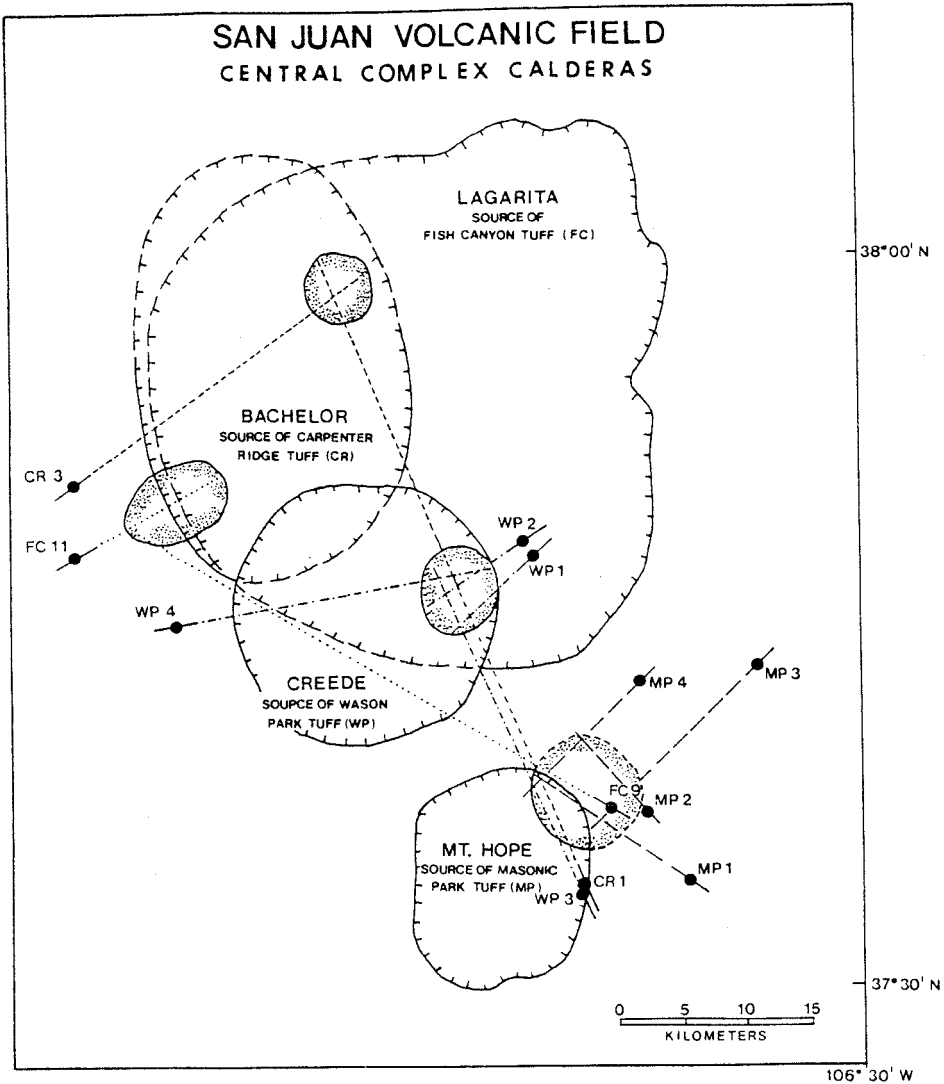


Fig. 6. Flow direction estimates for individual sites using the site mean  $k_{max}$  AMS data (bars). Eruptive source (stippled zone) for individual tuffs is identified as the point of intersection of several  $k_{max}$  AMS mean azimuths (after Ellwood, 1982).

Ellwood and Abrams(1982)는 미국 Georgia 주 북서부에 분포하는 변성 화강 편마암(metamorphosed granite gneiss)을 대상으로 대자율 이방성 연구를 통하여 광역적 응력(regional stress) 방향을 결정하였다. 이들은 대자율 이방성 연구를 통하여 변성과정에서 자철석의 재결정작용이 일어나 자기 조직과 광물조직이 서로 평행하게 발달하고 있음을 발견하였다. 편마암의  $k_{max}$ 와  $k_{int}$ 축이 놓여있는 최대 대자율면(maximum susceptibility plane)이 자기 엽리구조의 방향을

나타내고, 최대 대자율면에 수직인  $k_{min}$ 축이 최대 압축 응력(maximum compressive stress)의 방향과 평행하게 발달하므로,  $k_{min}$ 의 방향에 의하여 변성작용 직후  $S_1-S_2$  엽리구조(first and second generation schistosity)가 발달하는 동안에 작용한 광역적 압축 응력 방향이 NW-SE 방향의 약 50° SE로 경사진 방향임을 계산하였다 (Fig. 7). 이 응력이 작용하는 동안 발달한 습곡축은 자기 선구조를 나타내는  $k_{max}$ 의 방향(NE-SW)으로 습곡축의 방향을 계산하였다.

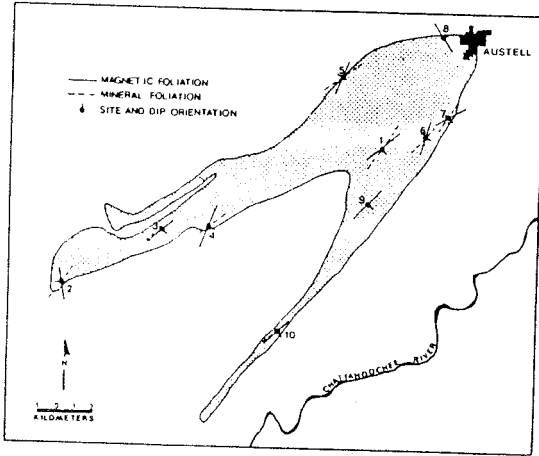


Fig. 7. Outcrop pattern of the Austell gneiss. Solid bars are the strike of the magnetic foliation planes. Dashed bars are the mineral foliation planes. Dip direction is illustrated by short bars (after Ellwood and Abrams, 1982).

Rathore(1980)는 영국의 English Lake District에 분포하는 Borrowdale volcanic group의 변성을 받은 안산암을 대상으로 대자율 이방성을 측정된 결과,  $k_{max}-k_{int}$  면이 Caledonian cleavages 방향으로 배열되어 있고  $k_{min}$  축은 이들 벽 개면의 극(poles) 방향으로 배열되어 있음을 관찰하였다. 또한 anisotropy factor, P는 본 지역의 구조적 변형의 정도를 나타내는 지시자로 변형정도가 Caledonian 변형방향에 수직으로 점차적인 감소를 하는 것을 관찰하였다.

## 결 언

기존의 암석조직 연구 방법들에 비하여 대자율 이방성을 이용한 방법은 측정이 신속하고 정량적인 자료를 제공할 뿐만 아니라 해석도 비교적 용이하여 전공자는 물론 비전공자들에 의한 관심이 점차 증가하고 있다. 대자율 이방성을 이용한 퇴적학 연구는 많은 연구가 수행되어서 현재에는 대자율 이방성 연구가 퇴적학 연구의 수단으로 확립되어 여러 문제들의 해결방법으로 이용되고 있으며, 특히 고수류의 방향 및 강도, 퇴적물의 운반기구, 퇴적과정 및 퇴적환경 등의 연구에 적용이 앞으로 더욱 증가할 것이다. 화성암 및 변성암 혹은 구조지질학 분야에 대자율 이방성의 응용은 퇴적학 분야에 비하여 비교적 적은 편이나, 대자율 이방성 연구가 마그마의 유동방향 및 분출지점, 구조

적 변형, 응력방향, 암체의 상호 대비 등에 관한 연구에 유용한 연구수단으로 이용되고 있다. 특히, 선구조 및 엇리 구조 등과 같은 변형 구조들을 육안으로 관찰할 수 없는 암석에 대한 구조적 연구에 대자율 이방성이 유용한 자료를 제공하여 준다. 고지자기 연구가 대자율 이방성 연구와 병행되면 암석의 잔류자화 해석에 많은 도움을 줄 뿐더러, 고지자기 연구를 통한 지구조 해석에 신빙성이 매우 높은 자료를 제공할 것이다. 또한, 대자율 이방성 측정기 자체 중의 하나인 torsion-fiber magnetometer는 정확도가 높고 조작이 손쉬울 뿐더러 타기자계에 비하여 가격이 저렴하고 유지비가 거의 소요되지 않는 장점이 있다. 그러므로, 대자율 이방성 연구는 누구나 쉽게 지질학 전반에 걸쳐 광범위하게 응용할 수 있어, 본 논문에서 소개한 응용분야 이외의 여러분야에서도 유용한 연구 방법이 될 것이다.

## 사 사

본 논문에 대하여 조언을 해 주신 익명의 심사위원 및 도면 작성에 도움을 준 고려대학교 박찬호, 김태홍군에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김인수 (1990) 포항이남 제3기 분지 암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장, 광산지질, 23권, p. 59-71.
- Auffret, G. A., Sicher, B. and Coleno, B. (1981) Deep-sea sediment texture and magnetic fabrics, indicators of bottom current regimes. *Oceanol. Acta*, v. 4, p. 475-488.
- Balsley, J. R. and Buddington, A. F. (1960) Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. *Am. J. Sci.*, v. 258A, p. 6-20.
- Birch, F. S. (1979) Magnetic fabric of the Exeter pluton, New Hampshire. *J. Geophys. Res.*, v. 84, p. 1129-1137.
- deMenocal, P. (1986) A magnetic signature of bottom-current erosion. MS thesis, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, 198p.
- Ellwood, B. B. (1979) Sample shape and magnetic grain sizes: two possible controls on the anisotropy of magnetic susceptibility variability in deep-sea sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 43, p. 309-314.
- Ellwood, B. B. (1979) Magnetic susceptibility anisotropy measurements of coal from the South Wales coal field: a coalification process indicator, *Geophys. J. R. Astro. Soc.*, v. 57, p. 431-443.



- Ellwood, B. B. (1980) Application of the anisotropy of magnetic susceptibility method as an indicator of bottom-water flow direction. *Mar. Geol.*, v. 34, p. 83-90.
- Ellwood, B. B. (1982) Estimates of flow direction for calc-alkaline welded tuffs and paleomagnetic data reliability from anisotropy of magnetic susceptibility measurements: central San Juan Mountains, Southwest Colorado. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 59, p. 303-314.
- Ellwood, B. B. and Abrams, C. (1982) Magnetization of the Austell Gneiss, Northwest Georgia Piedmont. *J. Geophys. Res.*, v. 87, p. 3033-3043.
- Ellwood, B. B. and Ledbetter, M. T. (1977) Antarctic bottom water fluctuations in the Vema Channel: evidence of velocity variations from measurements of anisotropy of magnetic susceptibility and mean silt sizes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 35, p. 189-198.
- Ellwood, B. B. and Ledbetter, M. L. (1979) Paleocurrent indicators in deep-sea sediment. *Science*, v. 203, p. 1335-1337.
- Ellwood, B. B. and Whitney, J. A. (1980) Magnetic fabric of the Elberton granite, Northeast Georgia. *J. Geophys. Res.*, v. 85, p. 1481-1486.
- Flood, R. D., Kent, D. V., Shor, A. N., and Hall, F. R. (1985) The magnetic fabric of surficial deep-sea sediments in the HEBBLE area (Nova Scotian continental rise). *Mar. Geol.*, v. 66, p. 149-167.
- Graham, J. W. (1954) Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element. *Bull. Geol. Soc. Am.*, v. 65, p. 1257-1258.
- Graham, J. W. (1966) Significance of magnetic anisotropy in Appalachian sedimentary rocks. In: Steinhart, J. S. and Smith, T. J. (eds.) *The Earth Beneath the Continents*, Geophys. Monogr. Ser., v. 10, AGU, Washington, D. C., p. 627-648.
- Hamilton, N. D. (1967) The effect of magnetic and hydrodynamic control on the susceptibility anisotropy of redeposited silt. *J. Geol.*, v. 75, p. 738-743.
- Hamilton, N. D. and Rees, A. L. (1970) The use of magnetic fabric in paleocurrent estimation. In: Runcorn S. K. (ed.) *Paleogeophysics*, Academic Press, p. 445-464.
- Harstra, R. L. (1982) Grain-size dependence of initial susceptibility and saturation magnetization-related parameters of four natural magnetites in the PSD-MD range. *Geophys. J. R. Astro. Soc.*, v. 71, p. 477-495.
- Heller, F. (1973) Magnetic anisotropy of granitic rocks of the Bergell Massif (Switzerland). *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 20, p. 180-188.
- Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surv.*, v. 5, p. 38-82.
- Hrouda, F. and Janak, F. (1971) A study of the hematite fabric of some red sediments on the basis of their magnetic susceptibility anisotropy. *Sed. Geol.*, v. 6, p. 187-199.
- Ising, G. (1942) On the magnetic properties of varved clay. *Arkiv Matematik. Astron. Fys.*, v. 29A, p.1-37.
- Kent, D. V. and Lowrie, W. (1975) On the magnetic susceptibility anisotropy of deep-sea sediment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 28, p. 1-12.
- Khan, M. A. (1962) The anisotropy of magnetic susceptibility of some igneous and metamorphic rocks. *J. Geophys. Res.*, v. 67, p. 2873-2885.
- King, R. F. and Rees, A. I. (1962) The measurement of the anisotropy of magnetic susceptibility of rocks by the torque method. *J. Geophys. Res.*, v. 67, p. 1565-1572.
- Knight, M. D., Walker, G. P. L., Ellwood, B. B. and Diehl, J. F. (1986) Stratigraphy, paleomagnetism, and magnetic fabric of the Toba tuffs: constraints on the sources eruptive styles. *J. Geophys. Res.*, v. 91, p. 10355-10382.
- Rathore, J. S. (1980) The magnetic fabrics of some slates from the Borrowdale volcanic group in the English Lake district and their correlations with strains. *Tectonophysics*, v. 67, p. 207-220.
- Rees, A. I., Brown, C. M., Hailwood, E. A., and Riddy, P. J. (1982) Magnetic fabric of bioturbated sediment from the northern Rockall Trough: comparison with modern currents. *Mar. Geol.*, v. 46, p. 161-173.
- Shor, A. N., Kent, D. V., and Flood, R. D. (1984) Contourite or turbidite?: magnetic fabric of fine-grained Quaternary sediments, Nova Scotia Continental Rise. In: Stow, D. A. V. and Piper, D. J. W. (eds.) *Fine-Grained Sediments: Deep-water processes and facies*, Special publication 15, Geol. Soc., London, p. 257-273.
- Stacey, F. D. and Banerjee, S. K. (1974) *The physical principles of rock magnetism*, Elsevier, Amsterdam, 195p.
- Stone, D. B. (1967) Anisotropic magnetic susceptibility measurements on a phonolite and on a folded metamorphic rock. *Geophys. J.*, v. 7, p. 375-390.