

## 하동-산청지역에 분포하는 회장암질암에 대한 대자율 비등방성 연구

김성욱\* · 최은경\* · 김인수\*\*

\*부산대학교 지질학과 · \*\*부산대학교 지구환경시스템학부

### 요 약

하동-산청지역의 회장암질암에 대한 대자율 비등방성(AMS: anisotropy of magnetic susceptibility) 연구를 실시한 결과 5개 지점에서 지구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조가, 6개 지점에서 흐름에 의한 자기적 선구조가 판별되었다. 자기적 엽리구조는 NW-SE방향의 압축력을 지시하며, 이는 회장암이 형성된 후, 후차적으로 작용되었던 것으로 판단된다. 이는 회장암질암 주변의 편마암류에서도 NE-SW방향의 엽리가 나타나는 사실로도 설명된다. 즉, 이들 변성암에 작용하였던 압축력은 회장암질암에도 함께 작용하였던 것이다. 등온잔류자기(IRM) 획득실험 결과, 이들 자기적 구조가 관찰되는 지점들에서의 주자성광물은 티탄자철석계열 광물이며, 일부 시료에는 소량의 적철석이 포함되어 있는 것으로 판단된다.

**주요어:** 하동-산청지역, 회장암, 대자율 비등방성, 엽리구조, 지구조적 압축력

**Kim, Sung-Wook, Choi, Eun-Kyeong, and Kim, In-Soo, 1999, Anisotropy of Magnetic Susceptibility (AMS) of Anorthositic Rocks in the Hadong-Sanchong Area. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 3, p. 169-178.**

**ABSTRACT:** Low-field anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) was measured with 247 samples from 17 sites of Pre-Cambrian anorthositic rocks in the Hadong-Sanchong area, southwestern part of the Ryongnam Block. Tectonic stress-direction is defined by the minimum susceptibility ( $k_3$ ) direction, and flow-direction by the maximum susceptibility ( $k_1$ ) direction. Five sites rendered self-consistent NW-SE site-mean tectonic stress-direction. Even though a general fold test for every site was not possible due to the homoclinal nature of the bedding attitudes, a site with various bedding attitudes shows far better clustering of the  $k_3$ -direction before the bedding-tilt correction. The in-situ NW-SE tectonic stress-direction is consistent over the study area and compatible with petrographic foliation observed in metamorphic rocks in and around the study area, suggesting a regional compressive force acted after the emplacement of the anorthositic rocks. On the other hand, flow-directions obtained from six sites varies from site to site. Strong-field IRM experiments show predominance of titanomagnetites over a small amount of hematite in some samples.

**Key words:** Hadong-Sanchong area, anorthositic rocks, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), foliation, tectonic stress-direction

(Kim, Sung-Wook and Choi, Eun-Kyeong, Department of Geology, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea; Kim, In-Soo, Division of Earth Environmental System, College of Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea. email: suwokim@hyowon.pusan.ac.kr)

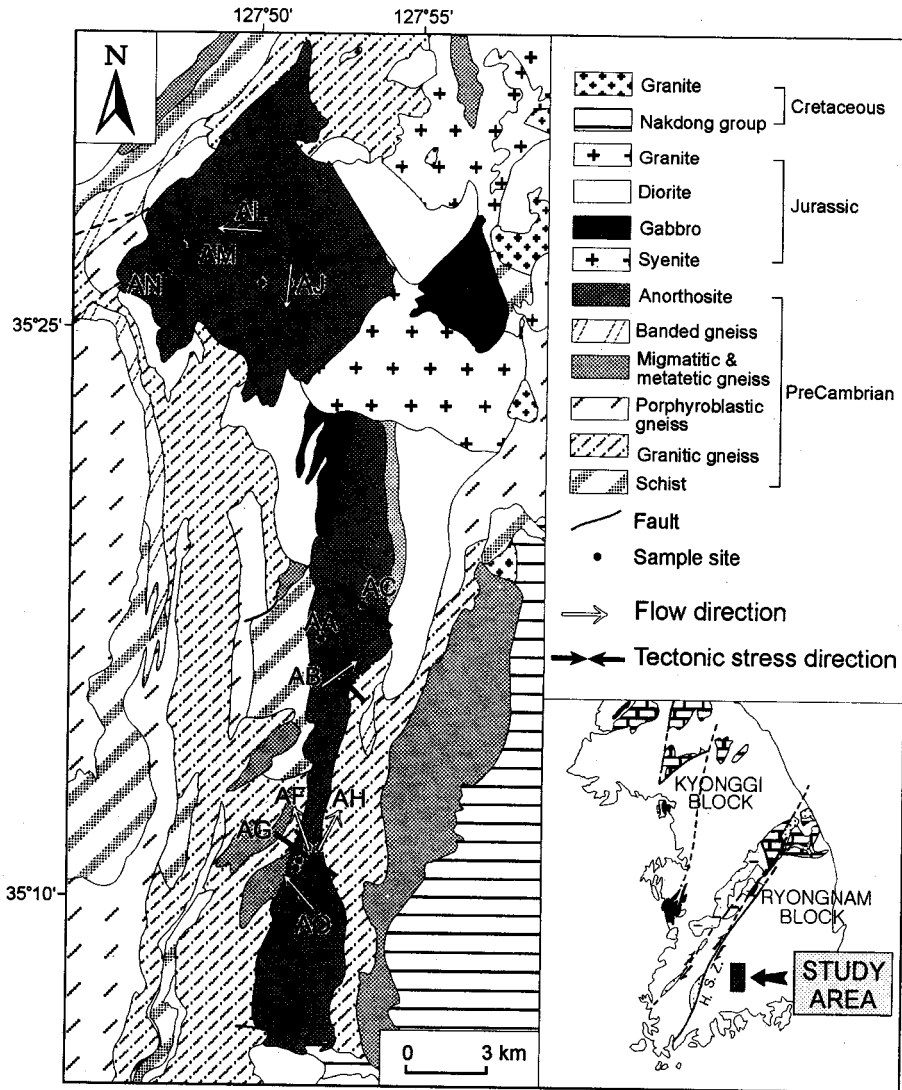
### 1. 서 론

회장암은 그 기원이 명확하게 알려져 있지 않으나, 현대적인 의미로 90% 또는 그 이상이 사장석

으로 구성된 화성암류를 일컫는다(Ashwal, 1993). 하동-산청지역은 한반도에서 유일한 회장암질암의 분포지로서 여러 연구자들에 의하여 암석학적, 암석화학적, 지구물리학적 연구 등이 수행되어 왔다.

회장암질암은 지리산 편마암 복합체의 화성 및 퇴적 기원의 변성암류를 관입하고 있으며 암체의 관입-정지시기가 Sm-Nd 법에 의해서 원생대인  $1678 \pm 90$  Ma(권성택 · 정지곤, 1990)로 알려져 있다. 이상만(1980), 이상만 외(1981)에 의하면 연구 지역에는 3회 이상의 광역변성작용이 있었는데, 회장암질암은 그 중에서 마지막 1회의 변성작용을

받았으며, 녹색편암이나 녹색편암-녹렴석 · 각섬암 상에 해당된다고 한다. 하동-산청지역의 회장암질암은 각섬석이 대부분을 차지하는 유색광물의 층상구조(엽리)가 나타난다. 정지곤 · 김원사(1989)는 유색광물의 함량과 석리의 차이에 따라 엽상형(foliation type), 간극누적형(intercumulate type), 층상형(layered type), 괴상형(massive type)으로 분대하였으며, 권순



**Fig. 1.** Geologic map of the Hadong-Sanchong area. Tectonic stress field and sample sites are superimposed on the map. Tectonic stress directions (solid arrows) are defined by the minimum susceptibility axes, and coincide with the perpendicular lines to the petrographic foliations. All sites show the tectonic stress field in the NW-SE direction and better clustering before the bedding-tilt correction. Sample-sites without any designation render no self-consistent anisotropic data. H.S.Z.: Honam Shear Zone.

진(1991)은 회장암과 반려암질회장암으로 구분하였다. 그러나 지금까지 이 층상구조의 성인에 대해서는 명확히 밝혀지지 않고 있다. 제기된 엽리구조의 성인 중 하나는 회장암질암이 정치될 당시에 결정들의 비중차에 의해서 형성되었다는 것인데, 그렇다면 회장암질암의 엽리는 초생엽리가 되며 고수평면을 의미한다. 다른 견해는 회장암질암의 관입 이후에 구조운동에 의해서 형성되었다는 것인데, 그렇다면 회장암질암의 엽리는 압축력에 수직인 방향으로 형성된 2차 엽리가 될 것이다. 한편, 김광호·정재일(1994)의 고지자기 연구에 따르면 연구지역의 고위도는 서부 호주와 유사하지만 고지자극은 다르며, 기준 좌표를 서부 호주로 이동하면 원생대 고지자극 이동곡선의 1,750 Ma 구간에 근접하여 한반도가 원생대 당시 호주의 서쪽에 붙어 있었을 것임을 제안했다.

이 연구의 목적은 암석의 자기적 특성중의 하나인 대자율 비등방성(AMS: anisotropy of magnetic susceptibility) 고찰을 통하여 자기적 선구조나 엽리구조를 파악하고 유체의 이동이나 지구조적 응력의 작용방향을 판별하는 자료를 획득하는 데에 있다. 이는 연구지역의 지구조적 발달의 역사를 밝히고 회장암질암의 층상구조의 원인을 규명하는 자료로 활용될 것이다.

## 2. 일반 지질

연구지역인 하동-산청지역은 영남육괴와 경상분지의 경계부에 해당하며, 선캠브리아기의 화성 및 퇴적 기원의 편마암복합체가 이 지역의 기저를 이루고 있다. 회장암질암은 이들을 관입하고 있으며, 다시 중생대의 화성암류가 상기 변성암류와 회장암질암을 모두 관입하고 있다(Fig. 1). 편마암복합체와 회장암질암은 수 차례의 화성활동과 구조운동에 의해 변형 및 변성되어있다.

편마암복합체는 입자의 크기와 그것을 구성하고 있는 유색광물, 편리나 엽리구조가 특징적인 양상을 보이고 있어 이에 따라 반상변정편마암, 세립질편마암, 흑운모편마암, 각섬석편마암, 호상편마암, 메타텍틱편마암, 안구상편마암으로 구분된다(김옥준 외, 1964; 최유구 외, 1964).

회장암질암은 여러 연구자들(손치무·정지곤, 1972; 정지곤, 1982, 1987)에 의해서 광물, 암석학적 연구가 수행되었다. 이들은 연구지역의 중앙에 위치한 중생대 섬장암질 심성암체의 북부에 분포하는

마름모꼴의 돔상구조를 가진 회장암질암을 산청암체라 하였으며, 심성암체의 이남지역에서 남북방향의 대상으로 분포하는 회장암질암을 하동암체라 하고, 유색광물의 함량에 따라 회장암, 우백질 반려암, 반려암으로 구분하였다. 이후 정지곤·김원사(1989), 권성택·정지곤(1990), 권순진(1991)등에 의해서 회장암질암에 대한 분대와 성인에 대한 연구가 이루어 졌다. 이러한 분대는 회장암질암이 마그마로부터 분화된 산물로 해석된다. 한편 권순진(1991)은 회장암질암에 작용한 변성작용은 녹색편암상-녹렴석·각섬석상으로, 정치 당시의 사장석 성분을 크게 변화시키지 못하였으므로, 하동-산청지역의 회장암질암은 괴상형 회장암에 해당할 것으로 해석하였다. 회장암질암에서 관찰되는 우백질 반려암질암의 층상구조(엽리)는 NE방향이 우세하며, 지역에 따라 NW방향의 층상구조도 관찰된다.

## 3. 연구 방법

### 3.1. 시료채취 및 시편제작

연구를 위해서 하동-산청지역의 회장암질암체를 동-서로 횡단하며 총 17개 지점(site)에서 247개의 시료를 채취하였다(Table 1). 이들 지점 중 AM지점은 하천을 따라 2Km에 걸쳐 있는 노두로서, 시료채취점 분포의 연속성을 고려하여 AMa에서 AMd까지로 다시 나누었다. 시료들은 직경 1인치의 코어시료(core sample)로 노두현장에서 착공, 정향되었다. 경사보정(tilt correction)의 자료로서는 회장암질암의 노두현장에서 관찰되는 유색광물의 층상구조를 이용하였다. 층상구조의 주향과 경사는 지질조사용 주향경사계를 사용하여 착공점의 최근접 노두면에서 측정되었다. 일부 노두에서는 유색광물의 층상구조가 식별되지 않았는데, 이 경우에는 인접 지역에서의 자세를 이용하였다.

야외에서 채취된 시료들은 실험실에서 직경 2.5 cm, 높이 2.3 cm의 원주형 시편(specimen)으로 제작하였으며, 대자율 비등방성의 측정작업은 철근 건물로부터 격리된 목조건물에서 Molspin Minisep 대자율 측정기를 사용하여 실시하였다.

### 3.2. 대자율 비등방성 종류의 결정

암석에 외부자기장  $H$ 를 가하면 유도자기  $M$ 이 생성되는데 그 관계는  $M = kH$ 로 표시된다. 여기서  $k$ 를 그 암석의 대자율(AMS: magnetic suscep-

**Table 1.** Sample and sample sites designations of Anorthosites.

Site	No. of Samples	Longitude (oE)	Latitude (oN)	Bulk susceptibility (min / max) SI
AA	3	127.865	35.265	130.7 / 219.9
AB	39	127.875	35.266	12.6 / 529.0
AC	19	127.887	35.292	106.8 / 405.9
AD	3	127.857	35.192	36.4 / 144.5
AE	3	127.863	35.196	119.4 / 552.9
AF	12	127.861	35.195	71.6 / 733.9
AG	19	127.864	35.196	11.3 / 186.0
AH	23	127.870	35.195	135.7 / 2182.8
AJ	7	127.843	35.435	104.3 / 175.9
AK	4	127.834	35.437	6.3 / 110.6
AL	15	127.819	35.448	41.4 / 561.7
AMa	24	127.793	35.444	2.5 / 551.7
AMb	25	127.793	35.444	12.6 / 304.1
AMc	12	127.794	35.444	25.1 / 596.9
AMd	16	127.794	35.444	7.5 / 1291.8
AN	10	127.779	35.435	8.8 / 461.2
AO	12	127.860	35.174	111.8 / 246.3

tibility) 이라고 한다. 암석의 대자율이 H의 모든 방향에 대해서 동일한 크기일 때(즉,  $k_1=k_2=k_3$ ) 그 암석은 자기적으로 등방성(magnetic isotropy)이라고 하고, 방향에 따라 다른 경우에는 자기적으로 비등방성(magnetic anisotropy)이라고 한다.

자기적으로 비등방성의 경우 대자율(k)은 대칭형 이차텐서(tensor of second order)가 되어 구조지질학이나 지질공학에서의 응력텐서(stress tensor)와 같이 3×3 대칭행렬로써 표현된다. 이 비등방텐서로부터 고유벡터(Eigenvector)와 고유값(Eigenvalue)을 계산하면 각 시편에 대한 주 대자율축( $k_1, k_2, k_3$ ) ( $k_1>k_2>k_3$ )의 방향과 크기가 결정된다. 이 서로 수직인 세 주축의 상대적 크기는 대자율 비등방타원체의 모양을 결정하며 이로부터 자기적 엽리구조와 선구조가 판별된다(Woodcock, 1977; Boas, 1983; Davis, 1986; 김인수, 1990). 즉,  $k_1>k_2=k_3$ 인 경우에는 자기적 선구조(magnetic lineation)를,  $k_3<k_1=k_2$ 인 경우에는 자기적 엽리구조(magnetic foliation)를 가지는 것으로 판별한다.

대자율 비등방성의 크기 및 자기적 선구조와 엽

리구조의 발달정도를 기음하는 수단으로써는 여러 공식들이 알려져 왔는데(Tarling, 1983; Tarling · Hrouda, 1993) 본 연구에서는 대자율 비등방성의 크기 정도를 판별하는 기준으로써 Jelinek (1981)의

$$P_T = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]}$$

(여기서,  $\eta_1 = \ln k_1$ ;  $\eta_2 = \ln k_2$ ;  $\eta_3 = \ln k_3$ ;  $\eta_m = \sqrt[3]{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$ ) 식을, 자기적 선구조와 자기적 엽리구조를 구분하는 수단으로는 Jelinek (1981)과 Hrouda (1982)의 대자율 타원체의 모양지수(shape parameter)식  $T = [2(\eta_2 - \eta_3) / (\eta_1 - \eta_3)] - 1$ , ( $-1 \leq T \leq 1$ )을 이용하였다. 각 시료채취 지점별로 우세한 자기적 구조를 판단하기 위하여서는 각 시편들에 대해서 이  $P_T$ 와  $T$ 를 계산한 후에  $P_T$ - $T$ 다이아그램(Jelinek, 1981; Hrouda, 1982; Tarling · Hrouda, 1993)상에 도시하였다.

시편별의 계산치 대다수가  $P_T$ - $T$ 다이아그램의 편장(prolate)영역에 도시되면 그 노두에서는 흐름에 의한 선구조(flow lineation)가 우세한 것으로 해석하였으며,  $k_1$ 방향을 그 흐름의 방향으로 하였다.

반면 계산치의 대다수가 편원(oblite)영역에 도시되면 그 노두에서는 지층의 하중이나 지구조적 응력에 의해서 엽리구조(foliation)가 초래된 것으로 해석하였는데, 이때 작용된 힘의 방향은 엽리구조에 수직인  $k_3$ 축 방향으로 하였다. 한편, 이  $k_3$ 축 방향이 층리면에 수직인 경우는 엽리구조가 지층의 하중에 의한 것(load foliation)으로, 그렇지 않은 경우는 지구조적 응력작용에 의한 것(tectonic foliation)으로 해석하였다.

#### 4. 측정 결과와 해석

##### 4.1. 자성광물

총대자율은 시료채취 지점별로 그 최대값과 최소 값에서 큰 차이를 나타내었다(Fig. 2a). 이는 회장암질암의 노두 사이에는 물론, 동일 노두에서도 시편에 포함된 자성광물의 종류와 함량에 상당한 차이가 있음을 보여준다.

암석에 작용하는 외부자기장을 증가시키면서 획득되는 등온잔류자기의 변화의 곡선을 관찰하면 암석에 포함된 자성광물의 종류와 함량에 대한 정보를 알 수 있다(Dunlop, 1972). 자기적 구조가 잘 나타나는 지점의 시편들을 선별하여 등온잔류자기 획득실험을 실시하였다. Fig. 2b는 그 결과를 나타낸 것으로 모든 시편들의 등온잔류자기가 200 mT까지는 급하게 상승되다가 300 mT이상에서 부터는 그 증가율이 급격히 감소됨을 보이고 있다. 한편 일부 시편에서는 점진적으로 증가되는 경향을 보인다. 이것으로부터 시편들에 포함된 주 자성광물은 티탄자철석(titanomagnetites)이며, 또한 소량의 적철석도 포함되어 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 등온잔류자기 획득 실험의 결과만을 다루고 있으나, 세척습성에 따른 자성광물의 판별이나 온도에 따른 대자율의 변화 및 현미경적인 연구는 이후 투고될 회장암질암에 대한 잔류자기 연구에서 보다 자세히 거론될 것이다.

##### 4.2. 지구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조

지층이 생성된 이후 별다른 지구조적 외력을 받지 않은 경우에는 형성당시의 상부 지층의 하중에 의한 자기적 엽리구조가 보존되어 있을 수 있다. 이 하중에 의한 자기적 엽리구조(load foliation)는 지층면에 평행할 것이 당연하다. 연구지역에서는 지층면에 평행한 자기적 엽리구조가 나타나는 노두는 없었다. 반면에 여러 노두에서 지층면과 거

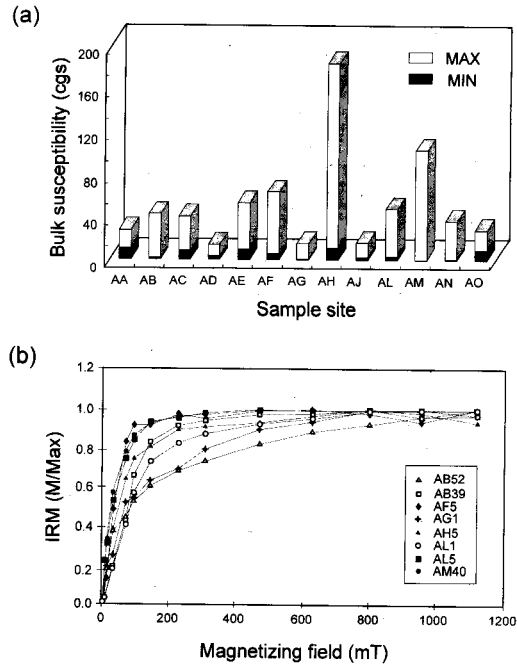
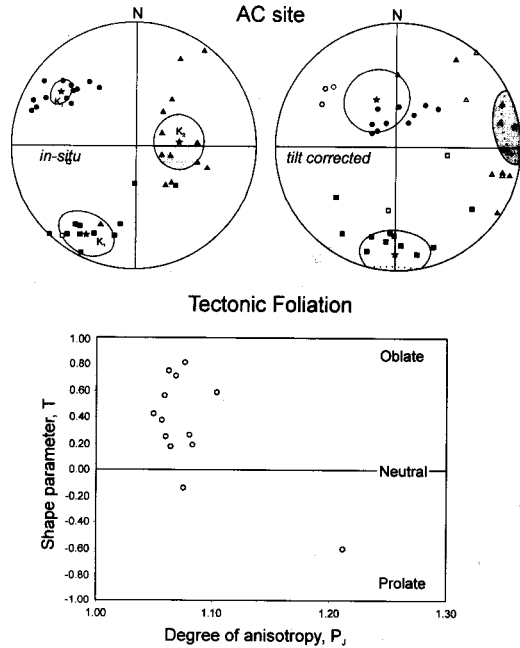


Fig. 2. (a) Distribution of low-field magnetic susceptibility for each site. (b) Acquisition curve for strong-field isothermal remanence magnetization (IRM) to identify magnetic minerals in anorthositic rocks. Note the saturation of IRM at about 300 mT in most samples, suggesting titanomagnetites as magnetic carrier. Other samples to contain a small amount of hematite.

의 수직인 자기적 엽리구조가 관찰되었다. 이러한 엽리구조는 지층의 형성 당시나 그 이후에 작용한 지구조적 응력의 결과(tectonic foliation)로 풀이되며, 이 경우  $k_3$ 축 방향이 지구조적 응력의 작용방향이 된다. 연구지역의 5개 지점에서 지구조적 응력에 의한 엽리구조가 다른 구조보다 우세한 것으로 나타났다.

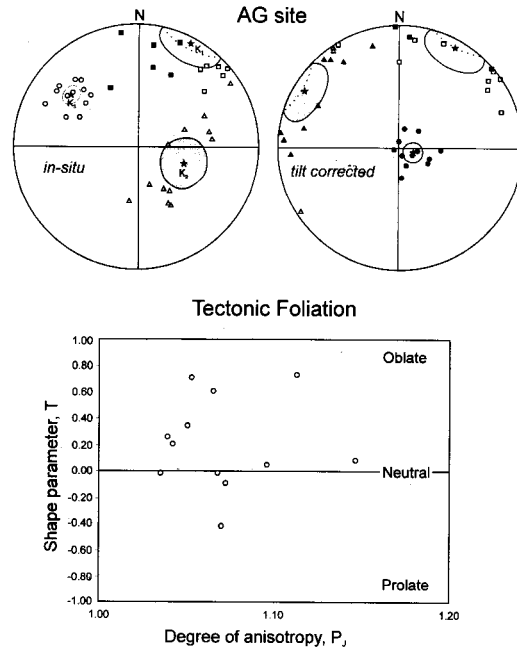
Fig. 3은 하동지역 회장암질암의 중심부에 해당하는 AC지점의 예로써 지구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조를 표시한 것이다. P<sub>1</sub>-T 다이어그램에서 대부분의 시료들이 편원(oblite) 영역에 도시되어 자기적 엽리구조가 우세함을 알 수 있고, 등적투영도(equal-area net, Schmidt net)상에서의 대자율 타원체의 주축인  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 축 방향은 지층경사 보정후보다 보정전인 현상상태에서 잘 군집되고 있다. 지층경사 보정전의  $k_3$ 축 방향은 대체로 지층면에 평행하여, 압축력의 작용방향은 거의 수평의 NW-SE방향으로 판별된다.



**Fig. 3.** An example of magnetic tectonic foliation at the central part of Hadong area. The upper left (upper right) part of equal-area projection represents orientation of principal susceptibility directions before (after) the bedding-tilt correction. Black (White) dots represent positive (negative) inclination. The directions show better clustering before bedding-tilt correction. The lower diagram shows relationship between the magnitude of shape parameter T (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982) and the degree of anisotropy PJ (Jelinek, 1981). Note the domination of oblate fabrics.

Fig. 4는 하동지역 회장암질암의 남단에 해당하는 AG지점의 결과로  $P_j$ -T 다이어그램에서 편원 (oblate) 영역에 도시되는 시료의 수가 편장 (prolate) 한 영역에 도시되는 것들보다 많은 것으로 보아, 자기적 엽리구조가 우세함을 알 수 있다. 지층경사 보정전의  $k_3$  축 방향은 지층면과 거의 평행하게 NW-SE 방향을 지시하고 있는데, 이 방향이 압축력의 작용방향인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 돌상으로 분포하는 산청지역 회장암질암에 해당하는 AN지점의 결과를 나타낸 것이다.  $P_j$ -T 다이어그램에서 편원 (oblate) 영역에 표시되는 시료의 수가 많은 것으로부터, 자기적 엽리구조가 우세한 것으로 판별하였다. 지층경사 보정전의  $k_3$  축 방향은 지층면과 거의 평행하게 NW-SE 방향을 지시하고 있다. 연구지역의 대부분 노두에서 층상



**Fig. 4.** An example of magnetic tectonic foliation at the southern part of Hadong area. The upper left (upper right) part of equal-area projection represents orientation of principal susceptibility directions before (after) the bedding-tilt correction. Black (White) dots represent positive (negative) inclination. The lower diagram shows relationship between the magnitude of shape parameter T (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982) and the degree of anisotropy PJ (Jelinek, 1981). Note the domination of oblate fabrics.

구조의 자세가 일정하여 노두마다의 습곡시형을 실시하기가 곤란하였다. 따라서 정확한 압축력의 작용시기를 알 수는 없으나 하동지역 회장암질암에 해당하는 AC지점의 예에서 볼 때 지층경사 보정전 주축들의 방향이 잘 군집되는 것으로 보아( $k_1/k_2 = 8.12$ ) 압축력은 회장암질암의 경동 (tilting) 이후에 작용하였던 것으로 해석할 수 있다. 한편 연구를 통해서 획득된 압축력의 방향은 하동지역과 산청지역 모두에서 NW-SE 방향을 나타내고 있다.

### 4.3. 흐름구조에 의한 자기적 선구조

지층의 형성당시 흐름에 의해서 티탄자철석 계열의 광물들 (titanomagnetites)의 장축이 일정한 방향으로 우세하게 배열될 경우 자기적 선구조 (magnetic lineation)가 형성되고 대자율 타원체의

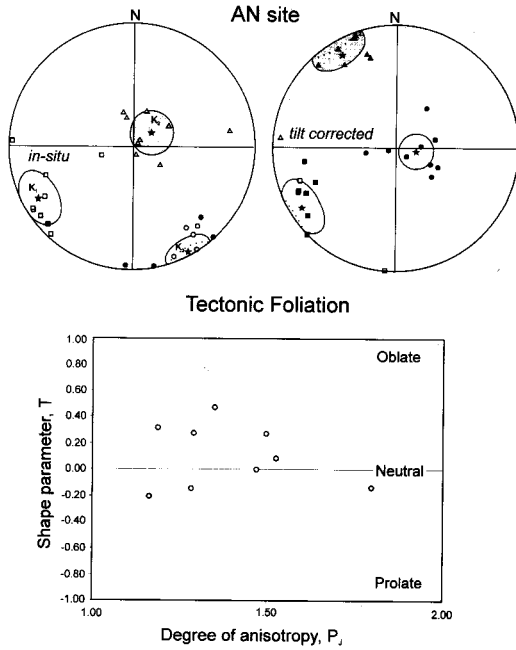


Fig. 5. An example of magnetic tectonic foliation at Sanchong area. The upper left (upper right) part of equal-area projection represents orientation of principal susceptibility directions before (after) the bedding-tilt correction. Black (White) dots represent positive (negative) inclination. The lower diagram shows relationship between the magnitude of shape parameter T (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982) and the degree of anisotropy PJ (Jelinek, 1981). Note the domination of oblate fabrics.

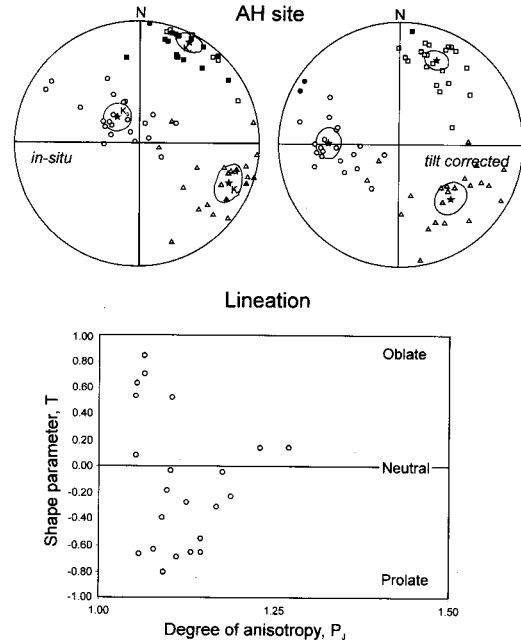


Fig. 6. An example of magnetic flow lineation. The upper left (upper right) part of equal-area projection represents orientation of principal susceptibility directions before (after) the bedding-tilt correction. Black (White) dots represent positive (negative) inclination. The lower diagram is a plot for the magnitude of shape parameter T versus the degree of anisotropy PJ. Note the domination of prolate fabrics.

주축 중에서 k1 방향은 흐름의 방향을 지시하게 된다. Fig. 6은 하동지역 회장암질암의 남단에 위치하는 AH지점의 결과로 PJ-T 다이어그램에서 많은 수의 시료들이 편장(prolate) 영역에 도사되어 자기적 선구조가 우세한 것으로 판별된다. 흐름의 방향을 지시하는 대자율 타원체의 장축(k1) 방향은 등적투영도상에서 거의 수평의 NNE-SSW 방향으로 나타났다. 같은 암체에 위치한 AO지점의 경우에서도 자기적 선구조가 우세한 것으로 판명되었는데, 그 방향은 AH지점과는 아주 다른 수평의 NW-SE 방향을 보였다(Fig. 7). 즉, 자기적 선구조의 방향은 엽리구조의 경우와는 달리 같은 암체의 노두에서라 할지라도 전혀 다른 방향을 보이고 있는 것이 있다.

## 5. 토 의

지질작용에 의하여 암석에 자기적 선구조와 엽리구조가 발달하려면 암석을 구성하는 자성광물체가 형태비등방성(shape anisotropy)을 가져야 한다. 형태비등방성에 의한 대자율 비등방성은 대자율이 높은 티탄자철석계열광물의 경우에 현저하며 적철석이나 자류철석의 경우에는 무시될 정도로 불과하다(Collinson, 1983). 본 연구에서 나타난 바에 의하면 시편에 따라 총대자율의 차이가 현저하거나, 극히 미미한 대자율을 가진 시편들이 주를 이루는 노두의 경우는 대자율 타원체의 주축들이 일정한 방향성을 가지지 못하였다. 이렇게 대자율이 낮으며 대자율 주축의 방향이 시편별로 상이한 노두들은 해석에서 제외하였다.

연구지역의 대자율 비등방성 결과를 살펴보면 5개 지점에서 지구적 응력에 의한 엽리구조가 나타났으며, 6개 지점에서 자기적 선구조가 판별되었

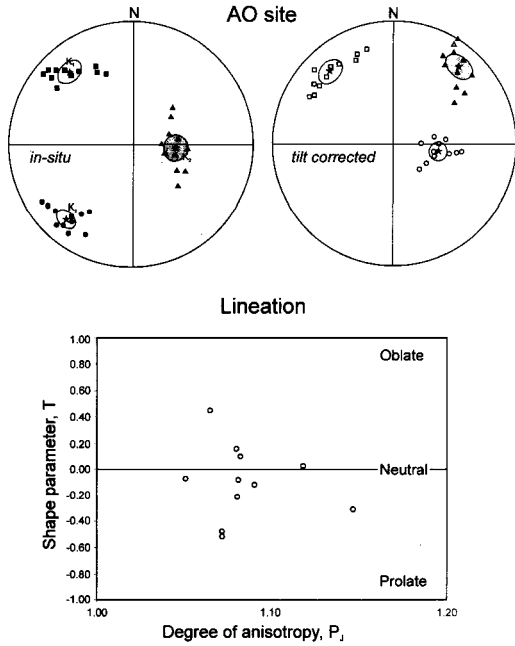


Fig. 7. An example of magnetic flow lineation. The upper left (upper right) part of equal-area projection represents orientation of principal susceptibility directions before (after) the bedding-tilt correction. Black (White) dots represent positive (negative) inclination. The lower diagram is a plot for the magnitude of shape parameter T versus the degree of anisotropy  $P_j$ . Note the domination of prolate fabrics.

다. 나머지 지점들에서는 뚜렷한 엽리구조나 선구조를 판별해낼 수 없었으며, 일정한 방향성도 나타나지 않았다. 자기적 구조가 판별된 지점별의 대자율 주축의 평균방향은 Table 2와 Fig. 1에 종합되어 있다. 각 지점별 평균방향의 계산은 Fisher (1953)의 구면통계학적 방법(Fisher statistics)에 의한 것이다. 자기적 구조가 판별된 지점들 중에서 AB지점에서는 자기적 엽리구조와 선구조가 대등하였으며, 시료 전체를 포함하여 보면 방향이 산재되어 나타났다. 그러나 엽리구조를 나타내는 시료들과 선구조를 나타내는 시료들을 분리하면 각각은 일정한 방향으로 군집되었다. 따라서 AB지점의 결과는 자기적 엽리구조와 선구조로 분리하여 양쪽에 나누어 실었다(Table 2).

하동지역과 산청지역 회장암질암에서 계산된 압축력의 평균방향은 Fig. 1과 Table 2에 나타난 바와 같이 모든 노두에서 NW-SE방향으로 일정하다. 이는 지질시대에 작용하였던 지구구조적 응력의 방

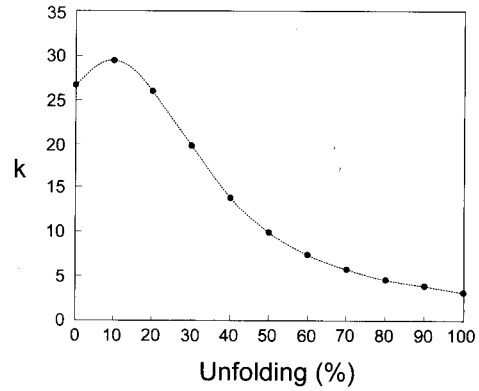


Fig. 8. Incremental fold test with Fisher's precision parameter ( $k$ ) versus percent of unfolding for the AC site.

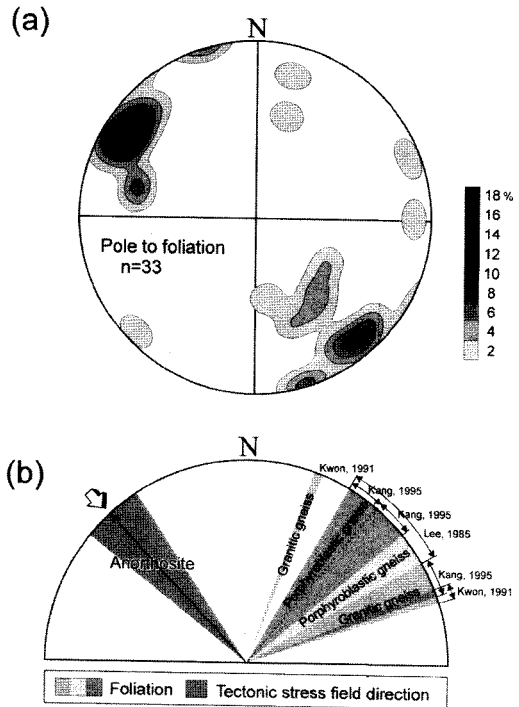


Fig. 9. (a) Contoured equal-area  $\pi$ -diagram of petrographic foliations of anorthositic rocks. (b) Diagram showing tectonic stress-field direction (white arrow) of anorthositic rocks and petrographic foliations of gneiss complex in the study area. Tectonic stress direction is perpendicular to the petrographic foliation.

향이 광역적으로 일정하였음을 의미한다. 대부분의 노두에서는 층상구조의 자세가 일정하여 노두



**Table 2.** Summary of study results (site-mean Fisher statistics).

1) Tectonic foliation (site-mean k3-axis direction).

Site	n	Before bedding-tilt correction				After bedding-tilt correction			
		d(°)	i(°)	$\alpha$ 95(°)	k	d(°)	i(°)	$\alpha$ 95(°)	k
AB	12	134.9	7.8	14.5	7.7	331.6	65.6	14.5	7.7
AC	13	305.8	26.4	7.5	26.8	335.0	54.7	21.5	3.3
AG	12	308.0	-32.8	6.1	43.8	287.8	-81.3	6.6	38.0
AMa	22	324.9	-10.4	8.3	12.8	129.4	23.0	17.9	2.8
AN	9	151.4	-3.9	11.8	15.5	99.4	76.5	11.8	15.5

2) Flow lineation (site-mean k1-axis direction).

Site	n	Before bedding-tilt correction				After bedding-tilt correction			
		d(°)	i(°)	$\alpha$ 95(°)	k	d(°)	i(°)	$\alpha$ 95(°)	k
AB	12	52.6	51.7	15.1	7.2	87.8	-0.4	15.1	7.2
AF	9	340.4	34.1	12.4	14.3	345.6	-10.4	12.4	14.3
AH	22	26.7	8.4	7.3	16.5	22.6	-26.0	7.3	16.5
AJ	7	185.9	69.7	22.0	5.8	204.3	2.8	22.0	5.8
AL	14	273.1	45.3	18.3	4.2	282.6	46.9	18.6	4.1
AO	11	318.8	22.7	7.6	31.1	318.8	-22.9	7.6	31.1

별의 습곡검사(McElhinny, 1964)를 실시할 수 없었으나 AC지점의 경우에는 단계별 습곡검사에서의 현장(in-situ)상태의 k<sub>3</sub>방향들이 층상구조를 수평으로 완전히 복원한 경우보다 더 잘 일치된다(Fig. 8). 따라서 회장암질암의 자기적 엽리구조는 지층의 경동직후나 그 이후의 압축력에 의거한 것으로 해석할 수 있다.

연구지역 회장암질암에서 나타나는 자기적 선구조의 방향은 일관성을 찾을 수 없는데, 산청지역의 경우 E-W와 N-S방향으로 나타나며, 하동지역 내에서는 인접 노두라 할지라도 서로 상이한 방향을 보인다. 한편, AB지점에서는 자기적 엽리구조와 선구조가 서로 수직하는 방향으로 동시에 나타나는데(Fig. 1), 이는 아마도 선구조가 압축력에 수반된 산물일 것이라는 추측을 갖게 한다.

자기적 엽리구조가 우세한 노두에서의 유색광물에 의한 층상구조를 살펴보면 NE-SW 주향이 압도적이다(Fig. 9a, 9b). 이것은 회장암질암에서 획득한 NW-SE방향의 압축력과 수직이 되는 방향이다(Fig. 9b). 연구지역 회장암질암에서 지구조적 응

력에 의한 엽리구조가 판별된 지점은 5개에 불과하나 이들에서의 자기적 구조와 그 자세를 고려하면 유색광물에 의한 회장암질암에서의 층상구조(엽리구조)는 지층의 생성당시에 형성된 초생 엽리가 아니라 회장암질암의 관입 이후의 작용에 의한 2차적 엽리일 것으로 판단된다. 한편 이상만(1980), 정지곤(1982), 이상원(1985), 권순진(1991), 강상원(1995)등에 의하면 회장암체 주변의 변성암류에서 관찰되는 엽리방향도 NE주향에 고각의 경사를 가진 것으로 알려져 있다(Fig. 9b). 이와 같이 회장암질암 주변의 변성암에서 나타나는 엽리방향도 회장암질암내에서의 방향과 일관성을 보여준다. 따라서 엽리구조를 생성시킨 지구조적 압축력은 회장암질암의 정치이후에 이 지역에 광역적으로 작용하였음을 알 수 있다.

## 6. 결론

하동-산청지역의 회장암질암에 대한 대자율 비등방성(AMS: anisotropy of magnetic susceptibility)

연구를 실시한 결과 5개 지점에서 지구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조가 관찰되었으며, 6개 지점에서 흐름에 의한 자기적 선구조가 판별되었다. 등온잔류자기(IRM) 획득실험에 의하면 시료들에 포함된 주 자성광물은 티탄자철석계열이며, 일부 시편에는 소량의 적철석이 포함되어 있는 것으로 나타난다. 하동지역과 산청지역의 회장암질암 노두에서 관찰되는 자기적 엽리구조는 NW-SE방향의 수평압축력을 지시하며, 이 압축력은 회장암질암의 관입 이후에 2차적으로 작용된 것으로 판단된다. 한편, 회장암질암 주변의 편마암류에서 나타내는 엽리도 NE-SW방향의 주향과 고각도의 주향을 갖는 것으로 보아 이 압축력은 이 지역에 광역적으로 작용하였던 중요한 지구조운동의 표현인 것으로 판단된다.

## 사 사

“이 논문은 1998년도 학술진흥재단 자유공모과제의 연구지원에 의하여 수행되었음(과제번호: 1998-001-D00868)”을 밝히며 이에 대하여 감사한다.

## 참 고 문 헌

강상원, 1995, 경남 함양 산청지역에 분포하는 심성 화성암류의 암석화학과 성인. 전남대학교 이학박사학위논문.  
 권성택, 정지곤, 1990, 하동-산청 회장암질암의 Sm-Nd 동위원소 연구 - 그 성인과 선캠브리아기 지체 구조에 대한 고찰, 지질학회지, 26, 341-349.  
 권순진, 1991, 경남 산청군 덕천강 일대에 분포하는 하동-산청 회장암질암에 관한 암석학적 연구. 연세대학교 이학석사학위논문.  
 김광호, 정재일, 1994, 하동-산청지역에 분포된 회장암질암 및 염기성 심성암의 고지자기 연구, 지질학회지, 30, 81-92.  
 김옥준, 홍만섭, 박희인, 박양대, 김기태, 윤 선, 1964, 한국지질도 (1:50,000), 산청도폭 및 설명서, 국립지질조사소.  
 김인수, 1990, 포항이남 제3기 분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장, 광산지질학회지, 23, 59-71.  
 손치무, 정지곤, 1972, 하동-산청지역의 아노르도사이트의 성인에 관하여, 광산지질학회지, 5, 1-20.  
 이상만, 1980, 지리산(하동-산청)지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구, 지질학회지, 16, 1-15.  
 이상만, 나기창, 이상현, 박배영, 이상원, 1981, 소백산 육괴(동남부)의 변성암복합체에 대한 변성작

용에 대한 연구, 지질학회지, 17, 169-188.  
 이상원, 1985, 소백산육괴 서남부의 편마암복합체의 변성작용에 관한 연구, 부산대학교 사대논문집, 10, 229-255.  
 정지곤, 1982, 한국의 하동-산청지역에 분포한 아노르도사이트에 관한 암석학적 연구, 지질학회지, 18, 83-108.  
 정지곤, 1987, 하동-산청지역에 분포한 회장암질암의 분화, 지질학회지, 23, 216-228.  
 정지곤, 김원사, 1989, 하동지역에 분포한 회장암질암의 구조와 티타늄 광체의 산출상태, 지질학회지, 25, 98-111.  
 최유구, 정창희, 이대성, 김서운, 김수진, 1964, 한국 지질도 (1:50000), 단성도폭 및 설명서, 국립지질조사소.

Ashwal, L.D., 1993, Anorthosites, Springer Verlag.  
 Boas, M. L., 1983, Mathematical Methods in the Physical Sciences, 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., New York.  
 Collinson, D.W., 1983, Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation. Chapman & Hall, London.  
 Davis, J.C., 1986, Statistics and Data Analysis in Geology. 2nd ed., John Wiley & Sons Inc., New York.  
 Dunlop, D.J., 1972, Magnetic mineralogy of unheated and heated red sediments by coercivity spectrum analysis, Royal Astronomical Society Geophysical Journal, 27, 37-55.  
 Fisher, R.A., 1953, Dispersion on a sphere, Royal Society of London Proceedings, A217, 295-305.  
 Hrouda, F., 1982, Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics, Geophysical Surveys, 5, 37-82.  
 Jelinek, V., 1981, Characterization of the magnetic fabric of rocks, Tectonophysics, 79, 63-67.  
 McElhinny, M. W., 1964, Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism, Royal Astronomical Society Geophysical Journal, 8, 338-340.  
 Tarling, D.H., 1983, Palaeomagnetism: Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology, Chapman & Hall, London.  
 Tarling, D.H. and Hrouda, F., 1993, The Magnetic Anisotropy of Rocks, Chapman & Hall, London.  
 Woodcock, N.H., 1977, Specification of fabric shapes using an eigenvalue method, Geological Society of American Bulletin, 88, 1231-1236.

1999년 5월 10일 원고접수

1999년 8월 27일 원고채택