

고응력장의 해석을 위한 대자율 비등방성 연구

Interpretation of Palaeostress Using Anisotropy of Magnetic Susceptibility

김성욱¹⁾, Sung-Wook Kim, 김인수²⁾, In-Soo Kim, 이동호³⁾, Dongho Lee, 윤운상⁴⁾, Woon-Sang Yoon, 정의진⁵⁾, Uijin Jeong, 양홍영⁶⁾, Hongyoung Yang, 전영길⁷⁾, Younggil Jeon

- ¹⁾ 지반정보연구소, Institute of Ground Information Co., Ltd.
^{2, 3)} 부산대학교 지질학과, Dept. of Geology, Busan National Univ.
^{4, 5)} 주식회사 넥스지오, NexGeo Inc.
^{6, 7)} (주) 유신코퍼레이션 응용지질부, Yooshin Eng. Corporation

SYNOPSIS : A study of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) have been carried out to understand the tectonic stress field of late Cretaceous-Tertiary strata in Yangsan area. A total of 119 independently oriented core samples were collected from 9 sites throughout the area. The study results show that 5 sites are characterized by load foliation, and 4 sites by tectonic foliation. Load foliations caused by the weight of the overlying strata occur in the central part of the study area. Tectonic foliations created by compressional tectonic force show a regional variation in direction: Direction of compression axes derived from tectonic foliation in the southern part of the study area is approximately WNW-ESE, while it changes into NE-SW northern part of the study area. Such compressional directions are compatible with the lineament directions in each area.

1. 서 론

이 연구는 암석의 자기적 특성중의 하나인 대자율 비등방성 (AMS: anisotropy of magnetic susceptibility)을 통하여 자기적 선구조나 자기적 엽리구조를 파악함으로써 응력의 작용방향과 시대를 판별할 수 있는 자료를 획득하고, 이를 토대로 연구지역 일원의 고응력장과 지구조적 발달의 과정을 밝히는데 그 목적이 있다. 한편 연구지역은 고속철도의 건설이 예정된 지역으로 대자율 비등방성에 의한 응력장의 해석은 터널과 같은 지하구조물의 시설에 관련된 정보를 제공할 수 있다.

연구지역은 한반도의 조구조 (tectonic province)에서 경상분지 밀양지괴의 동남단에 위치하며 한국지질도 (1/50000) 양산도폭에 해당한다. 이 지역은 북북동-남남서 방향으로 발달하는 양산 단층과 동래 단층이 인접하여 단열계는 직, 간접적으로 이들 단층대의 형성에 관련되어 있음을 알 수 있다. 암석의 노출 상태는 비교적 양호하며, 중생대말~제3기에 이르는 기간동안 양산단층의 운동과 관련하여 수 차례의 변형작용을 받은 것으로 보고되어 있으나, 변성 받지 않은 상태로 놓여 있다.

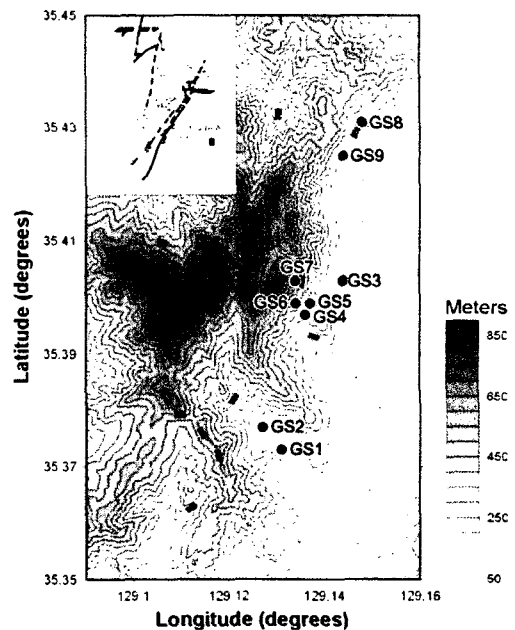


그림 1. 연구지역의 시료채취 위치

구성 암석의 지질시대와 층서는 중생대 백악기의 경상계의 유천층군 화산암류와 백악기 말에서 제3기 초에 걸쳐 관입된 불국사관입암류로 대별되며 사용된 지층명은 양산도폭 (1964)을 기본으로 하였다.

2. 연구방법

2.1 시료채취

연구를 위한 시료는 노출상태가 양호한 노두를 선별하여 채취하였다. 시료는 암석들의 분포지역과 지질시대에 따른 응력장 변화를 규명하기 위해 연구지역의 북부와 중부 및 남부지역의 9개 지점에서 119개의 시료가 채취되었다. 시료채취는 휴대용 착암기와 압축 냉각수 장치를 이용하여 노두 현장에서 코어시료로 착공 정향 (orientation)되었다. 야외에서 채취된 시료들은 직경 2.5Cm, 높이 2.3Cm의 원주형 시편 (specimen)으로 제작하였으며, 측정은 Molspin Minisep 대자율 측정기를 사용하여 외부자기장이 차폐된 시설에서 수행되었다 (그림 2).

표 1. 시료의 기재

Age	Site	No. of sample	Lithology	Loation	
				Long.	Lat.
백악기	GS-8	17	혼펠스	129.148	35.431
	GS-9	15	혼펠스	129.144	35.425
	GS-4	8	안산암	129.136	35.397
	GS-5	17	안산암	129.137	35.399
	GS-6	8	안산암	129.134	35.399
	GS-7	13	장석반암	129.134	35.403
제3기	GS-1	12	화강암	129.131	35.373
	GS-2	19	화강암	129.127	35.377
	GS-3	10	화강암	129.144	35.403
Total 9 sites 119samples					

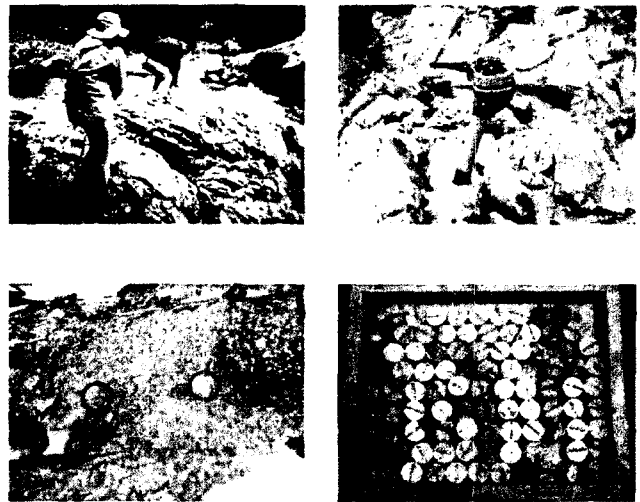


그림 2. 시료의 정향과 제작된 시편의 모습

2.2 대자율 비등방성의 결정

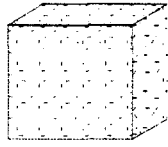
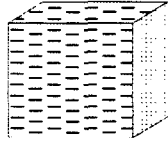
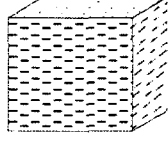
암석에 외부자기장 (H)를 가하면 암석은 유도자기 (J)를 가지게 되는데 이 유도자기의 크기는 외부자기장의 세기에 비례한다. 이 관계는 $J=kH$ 로 표시되는데 여기서 k를 그 암석의 대자율 (magnetic susceptibility)이라고 한다. 암석의 대자율이 외부자기장의 방향 (측정 방향)에 관계없이 동일한 크기일 때 ($k_1=k_2=k_3$) 그 암석은 자기적으로 등방성 (magnetic isotropy)이라고 하고, 그렇지 않은 경우에는 자기적으로 비등방성 (magnetic anisotropy)이라고 한다. 암석이 자기적으로 비등방성이면 자기적 선구조 (magnetic lineation, $k_1>k_2=k_3$)나 엽리구조 (magnetic foliation, $k_3<k_1=k_2$) 혹은 이들 모두를 가진다.

시편이 자기적으로 비등방성인 경우 대자율 (k)은 대칭형의 이차텐서가 된다. 수직하는 세개의 축으로부터 측정된 비등방텐서 (anisotropy tensor)는 3×3 대칭행렬의 구조로 표현되는데 이것은 구조지질학이나 지질공학에서의 변형력 텐서 (stress tensor)와 동일한 형태이다. 비등방텐서로부터 고유벡터 (Eigenvector)와 고유값 (Eigenvalue)을 계산하면 각 시편에 대한 주 대자율축의 방향과 크기가 결정된다. 이 세 주축은 크기에 따라 k_1, k_2, k_3 ($k_1>k_2>k_3$)로 표시된다. 주축의 상대적 크기는 대자율 비등방타원체의 모양을 결정하며 이것에 따라 자기적 엽리구조와 선구조가 판별된다. 이에 대한 보다 상세한 내용은 Woodcock (1977), Davis (1986), 김인수 (1990)를 참고하면 좋을 것이다.

대자율 비등방성의 크기 및 자기적 선구조와 엽리구조의 발달정도를 표현하는 여러 가지 공식이 제안되어 있으며 (Tarling, 1983; Tarling and Hrouda, 1993), 이 연구에서는 대자율 비등방타원체 (Ellipsoid of AMS)의 3주축 ($k_1 > k_2 > k_3$)을 결정한 후, 대자율 비등방성의 크기 정도는 Jelinek (1981)의 $P_j = \exp\sqrt{2[(\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2]}$ (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, 선구조와 엽리구조의 판단기준으로 대자율 타원체의 모양지수 (shape parameter; T)을 나타내는 Jelinek (1981)과 Hrouda (1982)의 $T = [2(\eta_2 - \eta_3)/(\eta_1 - \eta_3)] - 1$, ($-1 \leq T \leq 1$) 식을 이용하였다. 각 시편의 P_j , T를 계산한 후 각 지점별 우세한 자기적 구조를 판단하기 위하여 T- P_j 다이아그램 (Jelinek, 1981; Hrouda, 1982)을 작성하였다. 한편으로 대자율 비등방성의 정도 (A)를 나타내는 Nagata (1961)의 $A = k_1/k_3$ 식과, 선구조 (L) 및 엽리구조 (F)의 판단기준으로 Balsley and Buddington (1960)의 $L = k_1/k_2$ 식과 Stacey et al. (1960, 1961)의 $F = k_2/k_3$ 식을 이용한 Flinn류의 다이아그램 (Flinn, 1962)을 작성하여 검토의 자료로 이용하였다.

T- P_j 다이아그램에서 대자율타원체의 모양이 편장 (prolate)하면 흐름에 의한 선구조 (lineation)가 우세한 것으로 해석할 수 있으며 이 경우 흐름 방향은 k_1 방향이 된다. 마찬가지로 대자율타원체의 모양이 편원 (oblate)하면 지층 형성 당시 상부지층의 하중이나, 지구조적 응력에 의한 것으로 해석되며 이 경우 작용한 힘의 방향은 k_3 축의 방향이 된다. k_3 축의 방향이 수평면 (층리면)과 수직하면 지층 하중에 의해 작용한 힘 (load foliation)으로, 반면 층리면과 평행한 경우 지구조적 응력에 의한 것 (tectonic foliation)으로 해석된다. 마지막으로 이 결과에 고자기학에서 널리 쓰이는 습곡검사 (fold test)를 적용해보면 해당 응력이 지층경사의 이전에 형성된 것인지 이후에 형성된 것인지를 판별할 수 있다.

표 2. 대자율 타원체의 종류와 특징

자기적 구조의 종류	대자율 타원체의 모양	자기적 구조의 특징
등방체 Isotropy		<ul style="list-style-type: none"> Spherical $k_1 = k_2 = k_3$
선구조 Lineation		<ul style="list-style-type: none"> Prolate $k_1 > k_2 = k_3$
엽리구조 Foliation		<ul style="list-style-type: none"> Oblate $k_1 = k_2 > k_3$

3. 대자율 비등방성의 측정결과

3.1 자성광물

암석이 자기적 엽리구조나 선구조를 가지기 위해서는 우선 자성광물자체가 형태 비등방성 (shape anisotropy)을 가져야하는데, 이는 주로 대자율이 높은 티탄자철석 (titanomagnetite) 계열광물에서 현저하게 나타난다. 적철석이나 자류철석의 경우 무시될 정도에 불과하며 (Collinson, 1983), 다른 광물의 경우 그 형태가 결정축과 긴밀한 관계를 가지며 형성되어 있을 때 가능하다. 본 연구에서는 명확히 암석을 구성하는 주 자성광물을 판별할 수 없었으나 Molspin rock magnetometer와 ASC Model IM 10-30 Impulse Magnetizer를 이용한 등온잔류자기 획득실험 (acquisition of IRM)을 통해 시편들은 200mT이

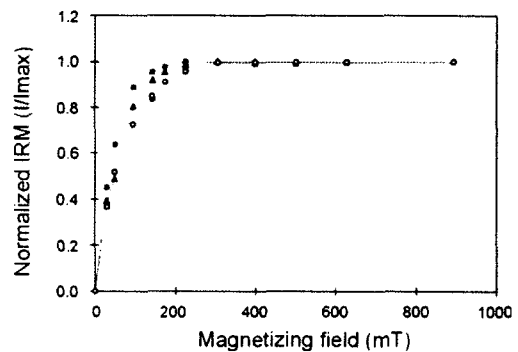


그림 3. 등온잔류자기 획득실험

하의 외부 자기장에서 완전히 포화되었으며 이것으로부터 주 자성광물은 티탄자철석 계열광물인 것을 알 수 있다 (그림. 3).

3.2 대자율 비등방성의 측정결과

흐름구조에 의한 자기적 선구조 : 암석들이 형성될 당시 공기나 물의 흐름으로 인하여 티탄자철석 (titanomagnetites) 계열의 광물들이 장축방향으로 일정하게 배열될 경우 자기적 선구조를 가지게 된다. 이 경우 k_1 의 방향은 지층의 형성 당시 생성된 1차 구조로서 흐름 방향을 지시한다. 연구지역에서 선구조가 우세한 지점은 없었으며, 1개 지점 (GS-2)에서 선구조와 엽리구조가 대등하게 판별되었다.

지층 하중에 의한 자기적 엽리구조 : 지층이 형성된 이후 지구구조적인 외력의 영향을 받지 않았다 하더라도 지층의 하중 ($p = \rho gh$)을 받게 되고, 이로 인해 성층면에 평행한 자기적 엽리구조가 발달하게 된다. 이 경우 k_3 의 방향은 성층면에 수직하며, k_1, k_2 의 방향은 낮은 복각을 가지고 산란되어 분포한다. 반면 지층의 형성 당시 흐름이나 하중을 압도하는 지구구조적인 응력이 작용했다면, 흐름의 방향과 평행한 자기적 선구조가 발달하거나 k_3 방향이 성층면에 수직으로 나타나는 않는다. 그림 6의 (a)는 지층 하중에 의한 자기적 엽리구조로 판별된 지점의 k_3 방향을 도시한 것으로 연구지점 중 5개 지점 (GS-3, GS-4, GS-5, GS-6, GS-7)에서 관찰된다. T-Pj 다이어그램에서 편원 (oblate)한 시편이 우세하며 등적면 투영도에서 k_3 방향이 고각을 가지는 것으로 보아 이 엽리구조는 지층의 하중에 의하여 형성된 것으로 해석된다 (그림 5).

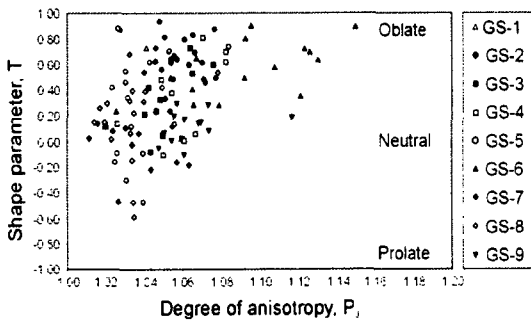
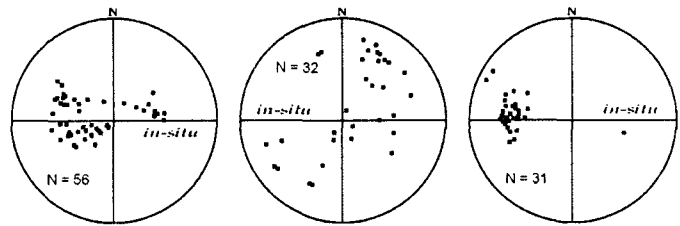


그림 5. 대자율 비등방성의 크기와 모양지수



GS-3, 4, 5, 6, 7

GS-8, 9

GS-1, 2

(a) load foliation

(b) tectonic foliation

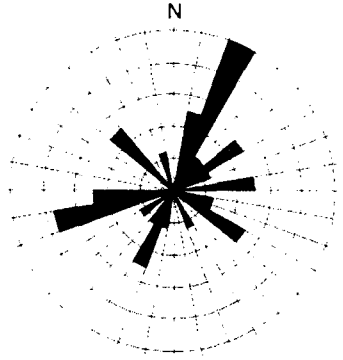
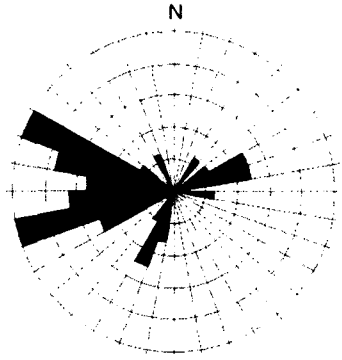
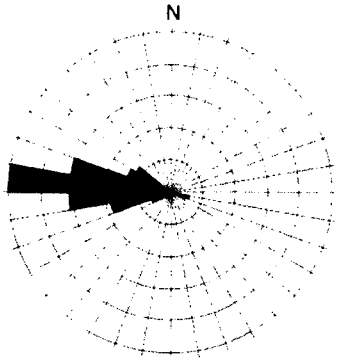
그림 6. 대자율 k_3 추축 방향의 하반구 투영도

지구구조적 응력에 의한 자기적 엽리구조 : 연구지역의 4개 지점 (GS-1, GS-2, GS-8, GS-9)에서 저각의 경사를 가지는 자기적 엽리구조가 관찰되었는데, 이러한 엽리구조는 지층의 형성 당시나 혹은 그 이후에 지층하중을 압도하는 지구구조적 응력이 작용한 결과로 해석된다. 이 경우 지구구조적 응력의 작용방향은 k_3 방향이 된다. 이 지점 시편들은 T-Pj 다이어그램 (그림 5)에서 대부분이 편원 (oblate)한 영역에 표시되고, 그림 6의 (b)와 같이 k_3 의 방향은 조사지역의 북부 (GS-8, GS-9)에서는 NE-SW 방향이 우세하며 남부지역 (GS-1, GS-2)에서는 E-W 방향이 우세하다.

4. 토의

연구지역의 대자율 비등방성 결과에서 시료 채취지점 중 자기적 선구조 (flow lineation)가 우세한 곳은 없었으며, 5개지점과 4개지점에서 하중에 의한 엽리구조 (load foliation)와 지구구조적 응력에 의한 엽리구조 (tectonic foliation)를 가지는 것으로 판별되었다. 표 3은 지역별로 구분되는 지구구조적인 응력장의 평균방향을 정리한 것으로 각 지역의 평균 방향은 Fisher (1953)의 구면 통계학적 계산법을 사용하였고 시편 중 낮은 대자율 값을 보이는 시편의 자료는 계산에서 제외하였다.

표 3. 주대자율축 k_3 의 방향 (area-mean Fisher statistics).

북부 지역		중부 지역		남부 지역	
					
지구조적 응력에 의한 엽리		하중에 의한 엽리		지구조적 응력에 의한 엽리	
No. of sample	29	No. of sample	56	No. of sample	31
Fisher mean(d/i)	19.4/61.8	Fisher mean(d/i)	258.9/75.2	Fisher mean(d/i)	274.8/36.5
$\alpha_{95}(\circ)$	36.1	$\alpha_{95}(\circ)$	12.8	$\alpha_{95}(\circ)$	5.4

자기적 엽리구조를 보이는 지점들은 지역별로 구분되어 분포한다. 하중에 의한 엽리구조를 지시하는 지점들은 연구지역의 중부에 집중되며, 시편들의 k_3 의 방향은 E-W 방향이 우세하다. 지구조적 응력에 의한 엽리구조는 연구지역의 북부와 남부에서 각각 NE-SW와 E-W 방향으로 집중되어 있다 (그림 7).

일반적으로 암석의 변형정도와 대자율 비등방성의 정도는 서로 부합되는 결과를 보여주는데 (김성욱 외, 1997), 연구 대상시료들의 대자율 비등방성 정도는 대부분 1.10 이하인 것으로 보아 암석의 생성 이후 작용한 응력에 의한 변형은 미약했던 것을 알 수 있다.

하중에 의한 엽리구조는 조사지역의 중부에 제한되어 나타나는데 이 부분은 동측으로 급경사를 이루며 함몰된 지형으로 엽리구조는 국지적인 지형과 연관되어 발달한 것으로 해석된다.

압축력 방향은 연구지역의 북부와 남부에서 서로 상이하다. 한편 음영도에서 관찰되는 선구조는 북부에서 동래단층과 나란한 NNE-SSW 방향이 우세한 반면 남부에서는 WNW-ESE 방향이 우세하다. 규모면에서 우세한 선구조의 방향은 응력에 의한 엽리구조를 지시하는 k_3 과 유사한 방향으로 배열하고 있는 것으로 볼 때 압축력의 방향은 지형적인 특성에 의한 선구조와 부합하는 결과를 보여준다.

선행 연구에서 동래단층은 경사이드단층 (손치무 외, 1986)과 우향주향이동 (류충렬과 김인수, 1997; 한국자원연구소, 1992)의 상이한 운동으로 해석한 견해가 있다. 조용찬 (1997)은 동래단층의 운동과정을 우수향이동, 정단층, 우수향이동의 순서로 추론하고, 고응력장을 시대순서에 따라 6개의 지구조적 사건 (우향이동운동: ENE 압축응력-NNW 인장응력, NNW 압축응력-ENE 인장응력, NNE-SSW 압

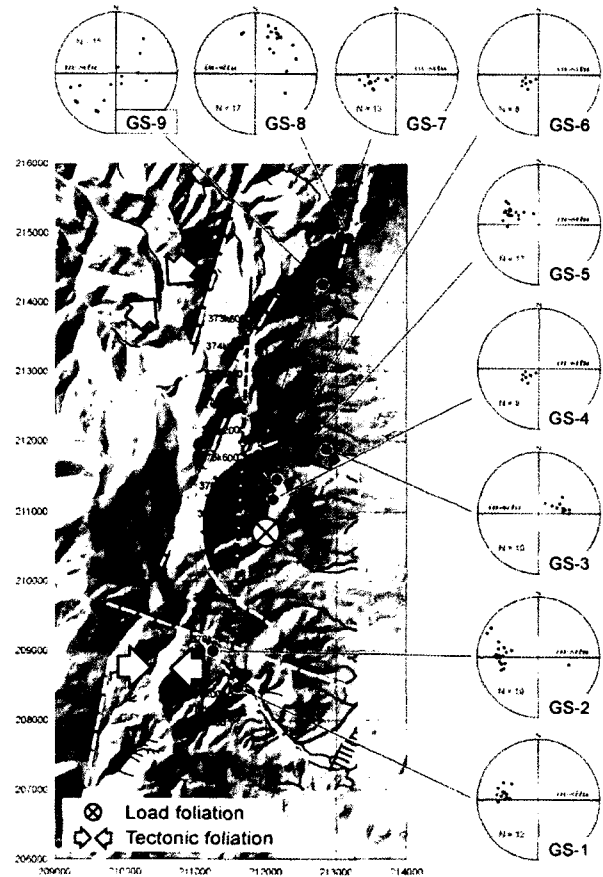


그림 7. 연구지역의 응력장

축응력-WNW-ESE 인장응력, 정단층운동: N-S 인장응력, E-W 인장응력, 우향이동운동: ENE 압축응력 -NNW 인장응력)으로 복원한 바 있다. 이와 같은 고응력장의 분포를 기초로하면 대자율 비등방성으로 파악한 자기적 엽리구조는 서로 다른 지구조적인 사건에 의해 형성된 자기적 구조가 된다. 이 연구는 동태단층 분포지 중 일부에 해당하며 단층운동과 연관된 고응력장의 변화를 심도있게 고찰하기 위해서는 다양한 시대의 암석과 여러 지역에 대한 대자율 비등방성 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 결론

양산 덕계리 일원의 9개 지점, 119개의 암석 시료에 대한 대자율 비등방성 (AMS) 연구를 실시하였다. 등온잔류자기 (IRM) 획득실험결과 주 자성광물은 티탄자철석계열인 것으로 판별되었다. 8개 지점에서 자기적 엽리구조가 우세하였으며, 1개 지점은 자기적 선구조와 엽리구조가 대등한 분포를 보였다. 5개 지점은 수평면과 저각으로 사교하는 엽리구조가 관찰된다. 이들은 지층의 하중에 의한 것으로 해석되며 함몰된 지형적인 특징을 보여주는 중앙부에 집중되어 있다. 4개 지점은 수평면과 수직에 가까운 엽리구조가 관찰되며 이들은 지층에 작용한 지구조적 응력에 의한 것으로 해석된다. 압축역의 작용 방향은 남부에서 WNW-ESE 방향이 우세하며 동태 단층과 인접한 북부 지역에서 NNE-SSW 방향이 우세하다. 낮은 비등방성의 정도와 지역별로 서로 다른 응력의 방향은 암석에 작용한 변형이 미약했으며 작용한 압축력의 방향이 일정하지 않았음을 지시한다.

참고문헌

1. 김성욱, 최은경, 정연규, 김인수(1997) 옥천대에 대한 고자기 연구: 태백지역에서의 대자율 비등방성과 지구조적 응력장. *자원환경지질*, 30권 6호, p. 613-624
2. 김성욱, 최은경, 김인수(1999) 하동-산청지역에 분포하는 회장암질암에 대한 대자율 비등방성 연구. *지구물리*, 2권 3호, p. 169-178
3. 김인수(1990) 포항이남 제3기 분지암석의 자기 비등방성과 지구조적 응력장. *광산지질*, 23권, p. 59-71.
7. 류충렬, 김인수(1997) 양산 통도사 일원의 파쇄구조: 양산단층대 우향이동의 증거. *대한자원환경지질학회 30차 학술발표회 요약집*, p18
5. 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식(1978) 동래·월래도폭 지질보고서(1:50000), 자원개발조사소
6. 이민성, 강필중(1964) 한국지질도-양산도폭(1:50,000). 국립지질조사소
7. 조용찬(1997) 동래-외동지역 동태단층의 고응력장 해석. *경북대학교 대학원 이학석사 논문*, 67p
8. 최은경, 김성욱, 김인수(1998) 옥천대에 대한 고자기 연구: 북동옥천대에서의 대자율 비등방성과 지구조적 응력장. *한국지구과학회지*, 19권, p. 9-12
9. Balseley, J. R. and Buddington, A. F. (1960) Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. *Amer. J. Sci.*, 258A, p. 6-20.
10. Davis, J. C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2nd ed., John Wiley & Sons, 646.
11. Fisher, R. A. (1953) Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. London*. A217, p. 295-305.
12. Flinn, D. (1962) On folding during three-dimensional progressive deformation. *Quart. J. Geol. Soc. London*, v.118, p. 385-433.
13. Hrouda, F. (1982) Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys. Surveys*, v. 5, p. 37-82.
14. Jelinek, V., 1981, Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79, T63-T67.
15. Nagata, T. (1961) *Rock Magnetism*, 2nd ed., Maruzen, Tokyo, 350 p.
16. Tarling, D. H. (1983) *Palaeomagnetism: Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archaeology*. Chapman & Hall, London, 379 p.
17. Tarling, D. H. and Hrouda, F. (1993) *The Magnetic Anisotropy of Rocks*, Chapman & Hall, London. 217p.
18. Woodcock, N. H. (1977) Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 88, p. 1231-1236.