

## 의성지역에 분포하는 백악기 화산암류에 대한 대자율 이방성연구

석동우\* · 도성재\*\*

### Anisotropy of Magnetic Susceptibility of Cretaceous Volcanic Rocks in Euseong Area

Dongwoo Suk\* and Seong-Jae Doh\*\*

**ABSTRACT:** Euseong sub-basin, one of three sub-basins in Kyungsang basin, consists of various sedimentary and igneous rocks of Cretaceous age. Kusandong tuff and Yucheon volcanic rocks from the sub-basin were collected for the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) study. Maximum directions of the AMS for Kusandong tuff and Yucheon volcanic rocks are used to detect possible source areas. Although the dispersion of the maximum directions of the AMS, mainly due to low susceptibility and/or low percent anisotropy of individual specimens, is rather large, it is possible to reveal several source areas for the volcanic rocks. Areas near the Keumseongsan and Hwasan, calderas in the study area, are identified as source areas for Yucheon volcanic rocks, while the western part of Sunamsan, another collapsed caldera in Euseong sub-basin, is inferred to be the source area for Kusandong tuff. However, it is not possible to determine detailed source areas for groups of Yucheon volcanic rocks of different lithologies, because of poor degree of convergence of the maximum directions of the AMS results from the volcanic rocks. It is also concluded that several episodic volcanic activities centered at Keumseongsan and Hwasan calderas were responsible for the formation of Yucheon volcanic rocks in Euseong area.

## 서 언

지질학 연구의 기본 대상인 암석은 균질하지 않고 구조적 방향성과 물성적 이방성을 가지며, 이들의 성인과 상태의 체계적인 이해는 지질학 연구의 커다란 주제가 되어 왔다. 퇴적암에서 퇴적 당시의 유수의 방향과 퇴적물 입자의 배열상태와의 연관성 연구, 변성암에서의 열리구조 및 선구조의 형성과 변성작용을 일으킨 응력과의 관계, 그리고 화성암 형성시 마그마의 움직임과 그로 인한 화성암의 유동구조에 대한 연구는 암석내의 방향성과 이방성 연구의 좋은 예이다. 이러한 연구는 주로 많은 시간과 노력이 요구되는 방법을 통해 수행되어 왔으나, Graham (1954)의 선구조적인 연구는 암석의 자기적 특성 중 대자율 (Magnetic Susceptibility)을 이용하여 보다 신속하고 간단한 방법으로 동일한 결과를 얻을 수 있음을 보여 주었다. 대자율은 암석내 자성광물의 외부자기장에 대한 자화강도의 비로 정의되며, 이는 보통 측정되는 방향에 따라 다른 값을 갖는 이방성을 나타낸다. 이러한 이방성을 대자율 이방성 (Anisotropy of Magnetic Susceptibility, AMS)이라 하며, 이는 암석의 구조적 방향성과 물성적

이방성을 민감하게 반영하는 변수로 입증되었고 (e.g., Seaman, 1992), 이러한 특성은 연구 목적에 따라 널리 이용되고 있다. 대자율 이방성은 퇴적암 (e.g., Rees, 1965), 변성암 (e.g., Ellwood and Abrams, 1982) 및 화성암 (e.g., Balsley and Buddington, 1960)에 대하여 과거 수 십년간 지질학연구에 널리 이용되어 왔으나, 국내에서는 김인수 (1990)와 도성재 (1991)의 논문이 전 부로서 대자율 이방성을 이용한 암석의 방향성과 이방성에 대한 연구가 많이 기대되고 있다.

의성 소분지는 밀양 소분지, 영양 소분지와 함께 경상분지 내의 소분지의 하나로 흥미있는 지질구조, 층서-퇴적 및 화성활동과 광화작용을 수반하는 지역으로 많은 연구가 이루어져 왔다. 의성 소분지에 대한 연구로는 장기홍 (1977, 1978, 1987), 장기홍 외 (1977, 1981), 손진담 (1989), 최현일 외 (1982)의 층서-퇴적 및 지구조연구, 박기화 (1986), 지세정 외 (1989, 1991), 이현구 외 (1991, 1993)의 광화 작용에 대한 연구와 김상옥 (1986), 윤성효 (1987, 1988)의 화성활동에 대한 연구, 도성재 외 (1990), 박찬호 외 (1991), 김인수 외 (1993)의 고지자기 및 자기층서연구가 있으며, 최근의 엄우용 (1993)과 우익 (1993)의 중력 및 자력 탐사 연구가 있다. 의성 소분지는 백악기의 퇴적암과 화산암으로 이루어져 있으며, 북서에서부터 남동 방향으로 금성산 칼데라, 선암산 칼데라, 그리고 화산 (華山) 칼데라가 발달되어 있다. 본

\* 전략광물자원연구센터 (Center for Mineral Resources Research, Korea University, Seoul 136-701, Korea)

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

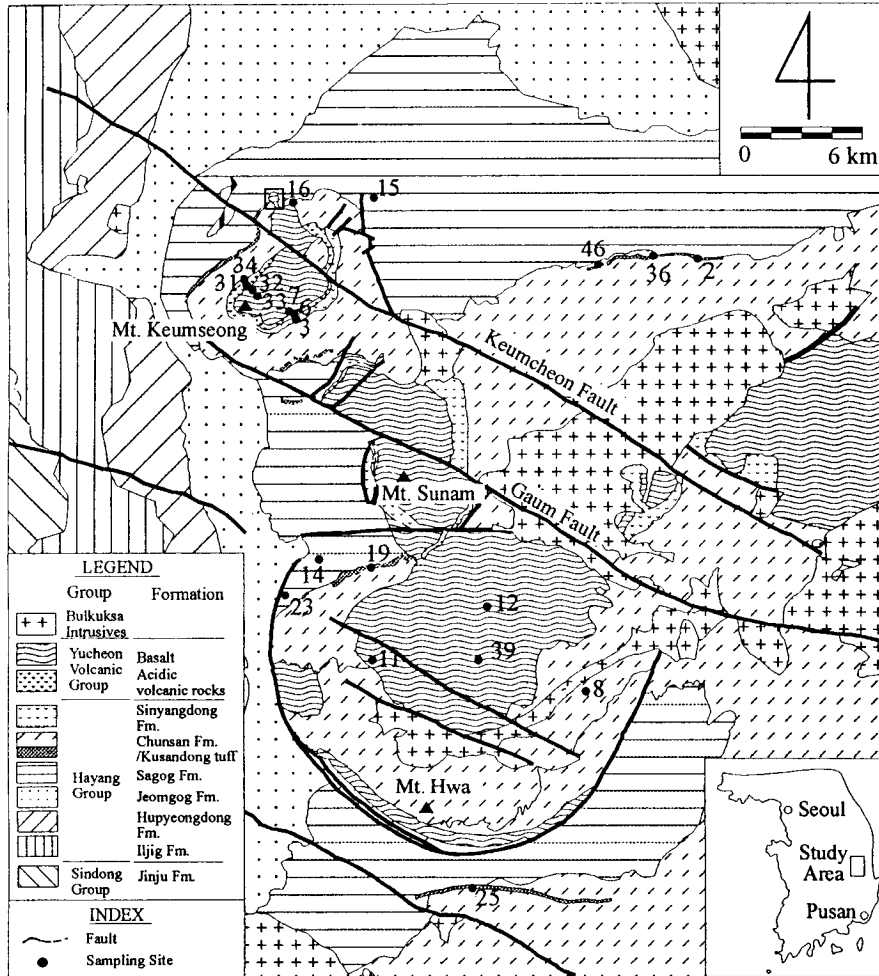


Fig. 1. Geologic map of Euisong area showing sampling sites. Rectangle area enlarged in Fig. 4.

연구는 의성 소분지 내의 화산암과 본 연구 지역 내에 발달한 3개의 칼데라와의 성인적 관계 규명을 위한 자료제공을 위하여, 대자율 이방성을 이용하여 하양층군 내의 춘산층의 기저를 이루는 구산동 응회암과 유천층군 내의 현무암과 응회암류에 대해 화산암 형성시 암석내에 기록되는 유동구조를 측정하여 화산암의 분출지를 확인하는데 목적이 있다.

**연구 원리**

대자율 이방성을 이용한 연구의 원리에 대하여는 김인수 (1990)와 도성재 (1991)의 논문에서 자세히 설명되어 있으므로 본 논문에서는 실제로 사용된 점에 대해서만 간단히 설명하기로 한다. 암석내에 존재하는 자성광물은 실험실에서 가해주는 약한 외부자장에 의해 자화된다. 자화되는 정도는 가해진 외부자장에

대한 자화강도의 비로 표시되며 이를 대자율이라 한다 (Cullity, 1972; Stacey and Banerjee, 1974; Collinson, 1983). 자성광물 중 대자율이 모든 방향에서 같은 값을 갖는 것을 등방성 (Isotropy)이 있다 하며, 방향에 따라 대자율의 값이 다른 것을 이방성 (Anisotropy)이 있다 한다. 자성광물의 대자율 이방성은 자성광물의 결정구조 (Crystal Structure), 형태 (Shape), 그리고 자성광물 내의 응력 (Stress) 상태에 영향을 받으나, 그 중 제일 중요한 요소는 자성광물의 형태이며 이로 인한 이방성을 형태이방성 (Shape Anisotropy)이라 한다. 서로 직교하는 3개의 길이 모두가 다른 반지름을 축으로하는 타원형의 형태이방성을 갖는 자성광물은 최장축의 방향으로 최대의 대자율을, 최단축의 방향으로 최소의 대자율을 갖는다. 모든 암석들은 종류와 함량의 차이는 있으나 자성광물을 포함하며, 대자율 이방성을 갖는 자성광물이 암석내에서 규칙적인 배열을 할때 암석은 대자율 이방성을 나

타낸다. 암석이 대자율 이방성을 갖는 자성광물을 많이 포함하더라도 그들의 분포가 모든 방향으로 균일하면 (Random Distribution) 그 암석은 대자율 이방성을 보이지 않는다. 암석 내의 대자율 이방성은 대자율의 크기에 따라 세계의 수직되는 방향으로 정의되며, 이들을 각각 최대방향, 중간방향, 최소방향이라고 하고, 각 방향에 해당되는 값을 축으로 하는 대자율 이방타원체 (AMS Ellipsoid)가 결정된다. 대자율 이방타원체는 암석내의 형태이방성을 갖는 자성광물의 규칙적인 배열의 결과이며, 각 방향은 고지자기학에서 암석의 특성 잔류자화 방향의 표시와 같이 편각 (Declination)과 복각 (Inclination)으로 나타낸다.

대자율 이방타원체는 암석내의 자성광물에 의한 자기선구조 (Magnetic Lineation)와 자기엽리구조 (Magnetic Foliation)를 나타내며, 이것은 구조지질학에서 암석내의 변형타원체 (Strain Ellipsoid)에 따른 선구조 (Lineation)와 엽리구조 (Foliation)의 관계와 동일한 방법으로 해석된다. 화성암에서 자기선구조는 화성암 형성시 용암의 유동에 따른 자성광물의 배열에 의한 것으로, 이는 화성암 내에 포함된 타원형 자성광물의 장축, 즉 대자율 이방타원체의 최대축 방향이 유동방향과 평행한 방향으로 배열함으로써 형성되므로 암석내의 유동구조를 나타내는 선구조를 나타낸다. 이러한 관계에 의해, 특정지역에서 분출되어 넓은 지역에 분포하는 화산암에서 측정된 대자율 이방타원체의 최대축 방향은 그 분출지를 향해 수렴하므로 화산암의 분출지를 밝히는데 대자율 이방성이 유용하게 사용되고 있다 (Ellwood, 1982). 암석의 대자율 이방성 연구는 유동성이 큰, 따라서 유동구조가 명확한 응회암 (e.g., Wolff *et al.*, 1989)이나 현무암 (e.g., Ellwood, 1978)에서 뿐만 아니라, 괴상의 화강암 (e.g., Bouchez *et al.*, 1990)에도 적용되고 있다.

### 지질개요

경상분지 내의 경상누층군은 퇴적암류와 화산암류로 구성되며, 암상에 따라 하부로부터 신동층군, 하양층군, 유천층군으로 구분된다. 경상분지는 WNW 방향의 팔공산단층과 청송단층으로 인하여 밀양 소분지, 영양 소분지 및 의성 소분지로 분리된다. 의성 소분지에 분포하는 암석들은 층서적으로 하부로부터 퇴적암인 하양층군, 화산암류인 유천층군 및 이들을 관입한 불국사 관입암군들로 구성된다 (Fig. 1). 하양층군은 하부로부터 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층, 춘산층, 신앙동층으로 세분되며, 이들 퇴적암층을 부정합으로 피복하는 유천층군은 현무암과 중성 및 산성 화산암들로 이루어져 있다. 의성 소분지에는 NW 방향의 주향이동단층인 금천단층과 가음단층이 중심부를 지나고 있으며, 화산활동시 형성된 3개의 칼데라 구조가 북서에서 남동 방향으로 발달되어 있다.

하양층군의 하나인 춘산층은 사암, 셰일 및 역암으로 구성되고, 하부로 갈수록 암회색이, 상부는 적색층이 우세하며 층후는 약 1000 m이다. 본층 기저부에는 구산동 응회암이 나타나며, 지층의 대체적인 주향과 경사는 약 40~50°/10~20°E를 갖는다. 유천층군은 하양층군을 부정합으로 피복하고 있으며, 현무암, 안산암, 유문암 및 응회암으로 구성된다. 금성산 칼데라 지역의 최하부 층인 현무암은 신앙동층을 약 200 m의 두께로 피복하고 있으며, 주로 유문암과 규장암 역으로 이루어진 응회암은 상부로 갈수록 세립화하며 유상구조를 보여 준다. 지역에 따라 응회암 상부에 유문암이 피복하고 있으며, 응회암질 사암과 교호하기도 한다. 연구지역의 유천층군은 대부분 3개의 칼데라를 중심으로 분포되는데, 그 성분이 연구지역 북서부의 금성산으로부터 선암산을 거쳐 남동부의 화산(華山)으로 감에 따라 염기성암에서 산성암이 우세하게 나타난다. 금성산 칼데라 구조를 이루고 있는 암석들 중 염기성인 현무암이 먼저 형성되고 산성인 유문암은 후기에 생성되었다 (박기화, 1986).

불국사 관입암류는 경상누층군을 관입하며, 연구지역에서는 주로 섬록암이 소규모 암주상으로 산출된다. 암체의 주변부에서는 중심부에 비하여 입도가 다소 세립화되는 경향을 보여 준다. 본 관입암과 주변 퇴적암류나 화산암류의 접촉부에서는 암석들이 호온펠스화 되어 나타난다. 관입 섬록암체 주변의 퇴적암에는 335~350°와 300~310°의 주향을 갖는 암맥들이 도처에 관입하고 있다. 이들 암맥들은 주로 산성이나, 가끔 중성 암맥도 산출된다.

### 시료 채취 및 실험

대자율 이방성 및 고지자기 연구를 위하여 의성 소분지 내에 분포하는 구산동 응회암에서 7 Sites, 유천층군 응회암에서 14 Sites, 그리고 유천층군 현무암에서 5 Sites의 총 26 Sites에서 Portable, Gasoline-Powered Rock Drill을 이용하여 암석 시료가 채취되었다 (Fig. 1). 각 Site에서는 수 m의 간격으로 4~12개의 코아들을 착공을 한후, Orienting Device에 Brunton Compass 혹은 Sun Compass를 부착하여 정향시료를 채취하였다. 시료 채취시 일정한 방향의 착공으로 인하여 발생하는 체계적인 오차 (Systematic Sampling Errors)를 피하기 위하여, 각 Site에서 코아 채취시 여러방향의 착공을 하였다. 채취된 각 코아를 1~4개로 절단하여 직경 및 길이가 각각 2.5 cm인 원통형 시편 총 335개를 얻었다. 모든 암석시료는 고려대학교 고지자기 실험실에 설치된 Bartington MS-2B Susceptibility Bridge와 여기에 연결된 컴퓨터에 내장된 Morris Magnetics Inc. 에서 개발한 AMS-BAR Program을 이용하여 대자율이 측정 계산되었다. 대자율 측정은 각 시편의 12 방향에서 측정하였으며, 대자율이 극히 낮은 시편에 대해서는 24 방향에서 측정하였다. 본 논문에서는 대자율 이방타원체의 최대, 중간, 최소방향의 대자율값을 각각

Table 1. Directions of maximum susceptibility anisotropy ( $K_{max}$ ) for Kusandong tuff and Yucheon volcanics.

Site #	Lithology	N/No	Before Bedding Correction			After Bedding Correction			Avg. K ( $10^{-6}$ Gcm <sup>3</sup> /gOe)	% Aniso
			D(°)	I(°)	$\alpha_{95}$	D(°)	I(°)	$\alpha_{95}$		
Yucheon Group										
Group 3	8 andesitic tuff	11/18	206.2	3.6	9.4				176	4.24
	11 andesitic tuff	8/8	152.3	20.7	19.7				322	9.69
	12 crystal tuff	4/6	14.4	16.6	11.3				532	2.05
Group 2	39 crystal tuff	4/9	145.6	17.9	15.7				9	3.95
	26 welded tuff	17/17	359.0	23.8	24.7				1	70.84
	27 welded tuff	20/20	317.3	81.7	23.8				27	2.15
	28 welded tuff	8/11	167.0	42.6	8.9				26	2.86
	29 welded tuff	16/16	248.1	42.0	22.7				25	2.79
	30 welded tuff	7/20	276.8	47.7	10.0				18	4.00
	17 tuff	7/7	227.1	7.6	27.0	25.2	66.0	27.0	6	13.71
Group 1	32 welded tuff	10/20	47.9	1.5	12.3				81	1.76
	33 welded tuff	3/4	219.5	23.3	17.1				51	2.26
Basalt	7 ignimbrite	11/11	265.9	78.5	10.7	137.2	43.4	24.6	220	2.45
	6 tuff	4/7	84.3	59.6	22.1	25.5	48.2	25.0	64	5.63
	3 basalt	6/8	124.5	8.2	13.4	299.1	27.7	13.4	884	2.60
	15 basalt	17/17	64.8	26.8	15.9	64.5	39.0	15.9	2666	3.56
	16 basalt	14/14	50.9	65.7	21.8				235	2.19
	31 basalt	12/12	244.7	0.9	21.5	239.3	20.3	21.5	1578	2.27
	34 basalt	12/12	124.0	35.7	22.8	124.8	3.8	22.8	75	4.16
Kusabdong Tuff										
	2 tuff	6/6	1.1	14.3	21.1	2.2	41.3	21.1	130	3.33
	36 tuff	10/20	48.1	23.2	9.3	62.5	39.5	9.3	357	3.27
	46 tuff	8/16	76.9	7.6	10.2	*81.9	12.8	10.2	657	3.66
	14 tuff	5/5	173.2	4.7	8.8	172.3	3.4	8.9	15	6.90
	19 tuff	16/16	83.3	60.4	26.3	119.7	22.9	26.3	10	5.91
	23 tuff	18/20	195.6	2.4	17.8	18.8	17.3	17.8	15	4.50
	25 tuff	10/15	32.6	11.7	8.2	35.2	24.6	8.2	695	4.52

N/No; number of specimens used for mean values/measured, D; declination, I; inclination,  $\alpha_{95}$ ; radius of cone of 95% confidence interval, Avg. K; average susceptibility  $((K_{max} + K_{int} + K_{min})/3)$ , % Aniso; percent anisotropy  $((K_{max} - K_{min})/Avg. K)$ , \*; corrected using strike/dip of site 36.

$K_{max}$ ,  $K_{int}$ ,  $K_{min}$ 로 정의하여 사용하였으며, 각 Site 의 평균 최대, 중간, 최소 방향은 각 시편의 최대, 중간, 최소방향으로부터 Mark (1973)의 Axial Vector Technique에 의해 구해졌다. 각 평균 방향에 대한 신뢰도 (Confidence Limit)는 Fisher의 구면통계학 (Fisher, 1953)에서의 편차값인  $\alpha_{95}$ 로 표시하였다.

각 암석시편의 자기선구조 (L)는  $L = K_{max}/K_{int}$  (Balsley and Buddington, 1960), 자기염리구조 (F)는  $F = K_{int}/K_{min}$  (Stacey et al., 1961)의 관계를 이용하여 계산하였다. 평균 대자율값 (Average Susceptibility, Avg K)은 각 시편의 최대, 중간, 최소 대자율값의 평균  $((K_{max} + K_{int} + K_{min})/3)$ 이 사용되었으며, 이방성 정도 (% Anisotropy)는 최대 대자율값과 최소 대자율값의 차이와 평균 대자율값의 비율  $((K_{max} - K_{min})/Avg. K) \times 100$ 로 표시되었다. 각 Site의 평균 대자율값과 평균 이방성 정도는 시편들의 평균값이 이용되었다.

결 과

본연구에서 측정 계산된 구산동 응회암, 유천층군 응회암 및 현무암의 각 Site별 대자율 이방타원체의 평균 최대 방향, 신뢰도, 평균 이방성 정도 및 평균 대자율을 경사보정 전과 후로 구분하여 Table 1에 정리하였다. 각 Site의 평균 최대방향 계산시 시편의 작은 대자율값과 낮은 이방성정도에 기인하여 평균방향으로 부터 이례적으로 벗어나는 시편의 측정값은 최종평균 최대방향 계산에 사용하지 않았다. 유천층군 응회암은 암질과 시료채취 장소 및 대자율 이방타원체의 최대 방향에 따라 3개의 Group으로 분류 된다 (Table 1). 첫번째 Group 1은 금성산 칼데라 주변부의 응회암, Ignimbrite 와 용결응회암 (Welded Tuff)인 Site 번호 6, 7, 32 및 33이며, 두번째 Group 2는 금성산 칼데라 북부의 오토산 남서 지봉 주변을따라 채취된 응회암과 용결응회암인 Site 17, 26, 27, 28, 29, 30으로 구성된다. 마지막 Group 3은 연구 지역 남단부의 화산 (華山) 칼데라 부근에 분포하는 안산암질 응회암 (Andesitic Tuff)과 결정질 응회암 (Crystal Tuff)인 Site 번호 8, 11, 12 및 39 이다. 유천층군 응회암류의 평균 이방성

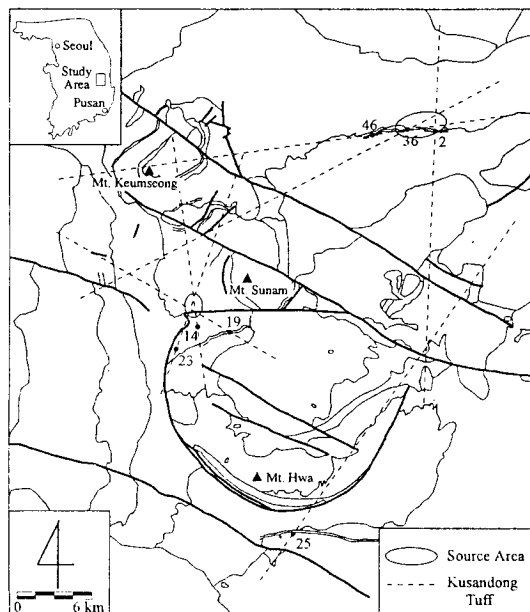


Fig. 2. Possible source area for Kusandong tuff determined by intersections of maximum directions of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS).

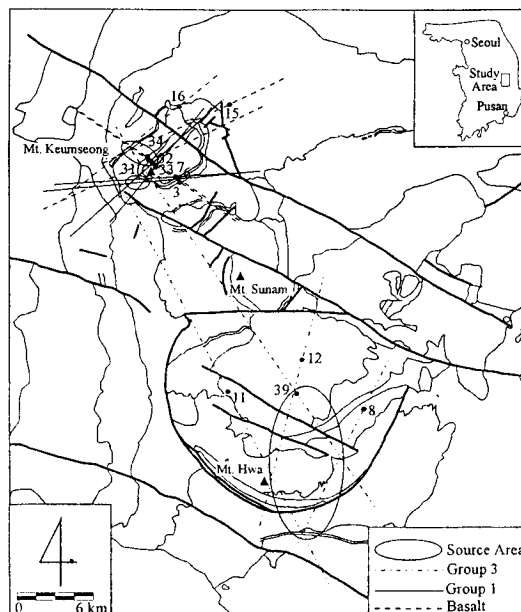


Fig. 3. Possible source areas for Yucheon volcanic rock Group 1, 3 and Basalt determined by intersections of maximum directions of AMS.

정도는 1.76~13.71%를 보이나 대부분의 Site (14 Site 중 10 Site)는 5% 미만의 작은 값을 갖는다. Site 26의 경우는 평균 이방성 정도가 70.84%로서 극히 큰값을 보이나, 이는 이 Site내의 각 시편들의 대자율값이  $1 \times 10^{-6} \text{G} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{Oe}$  또는 그 이하로서 측정값 자체의 신뢰도가 결여됨으로 이후의 결과 해석에서는 이 Site의 모든 측정값을 사용하지 않았다. 5개 Sites (Site 번호 3, 15, 16, 31 및 34)에서 채취된 유천층군 현무암의 평균 이방성 정도는 2.19~4.16%의 작은 값을 보이며, 7개 Sites (Site 번호 2, 36, 46, 14, 19, 23 및 25)에서 측정된 구산동 응회암의 평균 이방성 정도는 3.27~6.90%의 값을 갖는다 (Table 1).

유천층군 응회암류와 현무암 그리고 구산동 응회암에 대해 각 암체 하부지층의 주향과 경사가 측정 가능한 Site에서는 측정 계산된 대자율 이방타원체의 최대방향에 대해 경사보정 (Bedding Correction)을 하였다 (Table 1). 유천층군의 화산암류는 하부의 신앙동층을 부정합으로 피복하고 있으므로 경사보정 이후의 방향이 의미를 갖지 못한다. 이러한 추론은 Site 6 및 7과 같이 한 Site에서 2개 이상의 주향과 경사의 값이 경사보정에 사용되었을 경우 분산도가 경사보정후 커짐으로서 입증되며, 또한 Site 6과 7은 매우 가까운 곳에서 채취된 것으로 경사보정 전에는 대자율 이방타원체의 최대 방향이 매우 유사하나 보정 후에는 최대방향이 많은 차이를 보이고 있는 점도 유천층군 화산암류의 형성이 하부층의 주향과 경사의 영향을 받지 않았음을

지시하고 있다. 이러한 이유로 유천층군 화산암류의 대자율 이방타원체의 최대방향은 경사보정 이전의 값들이 해석에 사용되었다. 단 Site 17의 경우는 화산암내의 층리면이 관찰되었고, 이 층리면의 주향과 경사가 경사 보정에 사용되었으므로 경사보정 이후의 대자율 이방타원체의 최대 방향을 해석에 사용하였다 (Table 1). 이와는 반대로 구산동 응회암은 출산층의 기저를 이루며 출산층 및 하부의 사곡층과 조화적인 (Concordant) 관계를 보이므로 경사보정 이후의 대자율 이방타원체의 최대방향을 해석에 사용하였다. Site 46의 경우는 암석 시료 채취지점 부근에서의 상하부의 퇴적층과의 접촉부가 발견되지 않아서 이 Site로부터 가장 가까운 Site 36에서 측정된 주향과 경사의 값이 경사보정에 사용되었다.

유천층군 화산암류와 구산동 응회암에 대한 대자율 이방타원체의 최대 방향의 수렴성은 Fig. 2~4에 도시하였다. 구산동 응회암의 Site 2, 36 및 46은 시료채취지점 북동부 약 1 km 지점으로 수렴하며, Site 14, 19 및 23은 연구지역 중앙부의 선암산 칼데라 서부 약 4 km로 수렴하고, Site 25는 상기 6개의 Sites에서 얻어진 최대방향과는 상당히 다른 방향을 나타내며 수렴점을 갖지 못하고 있다 (Fig. 2). 유천층군의 경우 응회암, Ignimbrite 및 용결응회암 등으로 구성된 Group 1은 금성산 칼데라 남서부를 향하여 (Fig. 3), 금성산 칼데라 북부의 오토산 남서 지봉 주변부의 응회암과 용결응회암인 Group 2는 오토산 남서 지봉의 중심을

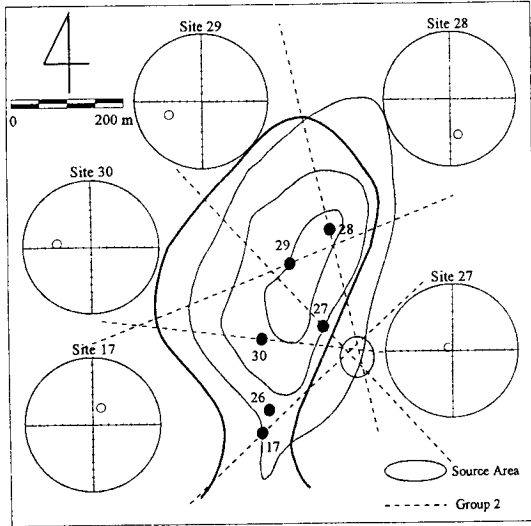


Fig. 4. Area enlarged from the rectangle in Fig. 1 showing possible source area for Yucheon volcanic rock Group 2 determined by intersections of maximum directions of AMS and equal-angle projections of the maximum AMS axes for sites in Group 2.

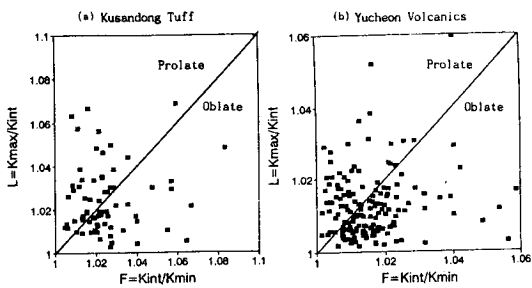


Fig. 5. Flinn-type diagrams showing the shape of the AMS ellipsoid for (a) Kusandong tuff and (b) Yucheon volcanic rocks.

향하여 (Fig. 4), 그리고 안산암질 및 결정질 응회암인 Group 3은 연구지역 남동부에 위치하는 화산 (華山) 칼데라를 향하여 (Fig. 3) 수렴한다. 유천층군 현무암은 유천층군 응회암 Group 1과 유사하게 금성산 칼데라의 북서부에서 대자율 이방타원체의 최대 방향의 수렴점이 위치함을 보이고 있다 (Fig. 3).

토 의

본연구에서 사용된 화산암류에서 부터 측정 계산된 대자율 이방타원체의 최대 방향은 분산도가 비교적 크며, 각 Group별로 보이는 대자율 이방타원체의 최대 방향의 수렴점이 일반적으로 상당히 넓은지역에 걸쳐 나타나고 있다 (Table 1, Fig. 2~4). 이는

첫째 모든 시편들의 평균 이방성 정도가 전반적으로 낮음과, 상당히 작은 대자율값 ( $5 \times 10^{-5} \text{ G} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{Oe}$  이하)을 보이는 시편들에 기인한 것이다. 구조지질학에서 사용되는 Flinn diagram (Flinn, 1962)과 같이 대자율 이방타원체로 부터 얻어지는 자기 열리구조 (F)와 자기선구조 (L)를 각각 횡축과 종축으로 모든 시편들의 값을 도시하면, 구산동 응회암은 편원 (Oblate)한 것과 편장 (Prolate)한 시편들이 거의 같은 수 만큼 있음을 보이고 (Fig. 5a), 유천층군 화산암류는 보다 편원한 분포를 보이고 있다 (Fig. 5b). 대자율 이방타원체가 보다 편원하다는 것은 최대 방향과 중간 방향으로의 대자율의 값이 점점 유사해지는 것을 의미하며, 이에 따라 최대 방향으로 정의되는 자기선구조 보다는 최대방향과 중간방향을 포함하는 면으로서 정의되는 자기열리구조가 우세하며, 최대방향의 분산도가 증가하게 된다. 또한, 본 연구 지역에 분포하는 구산동 응회암과 유천층군 화산암류에서는 육안으로 식별될 수 있는 선구조와 열리구조가 결합된 계상의 산출상이 야외조사시 관찰되었다. 따라서, 본 연구 결과에서의 대자율 이방성의 최대방향의 분산도가 큰 이유는 시료 측정시 야기될 수 있는 실험상의 오차에 의한 결과가 아니라, 암석 시료들이 갖는 특성이다. 즉, 이러한 암석의 특징적인 방향성이 대자율 이방성 연구에 의해 잘 나타내어 졌다고 사료된다.

구산동 응회암류에 대한 대자율 이방성타원체의 최대 방향은 2곳으로 수렴함을 나타내고 있으며, 채취 위치에 따라 Site 2, 36, 46은 시료 채취지점 북동부 1 km 지점으로 수렴하며, Site 14, 19, 23은 연구지역 중앙부의 선암산 칼데라 서부로 수렴하고 있다 (Fig. 2). 먼저 Site 14, 19, 23에 의한 선암산 칼데라 서부의 수렴점은 선암산 칼데라로부터 약 4 km 떨어진곳에 위치한다. 이 지역은 1 : 50,000 군위 도폭 (장기홍 외, 1981)과 구산동 도폭 (장기홍 외, 1977)의 경계부인 곳으로 군위 도폭에서는 사곡층으로, 구산동 도폭에서는 춘산층으로 표시되는 경계가 되는 곳이나 그 경계면은 명확하게 표시되어 있지 않으며 춘산층의 존재부에 대한 의구심마저 들게하는 곳이다. 이 지역의 춘산층의 부재 또는 미약한 발달은 과거 이지역이 춘산층의 기저를 이루는 구산동 응회암의 공급지 또는 공급지에 매우 근접한 지역으로서 춘산층의 퇴적이 타지역에 비해 활발하지 않았음을 그 원인으로 볼수 있으며, 이는 대자율 이방타원체의 최대방향의 수렴으로 결정되는 이 지역이 과거 구산동 응회암의 분출지이었을 가능성을 뒷받침하고 있다. Site 2, 36, 46에 의한 수렴점은 시료 채취지점 북부 1 km 지점으로 과거 분출지로 볼 수 있는 지질학적 증거가 발견되고 있지 않다. 또 Site 25의 최대 방향의 편각은 위의 6 Sites의 방향과는 수렴점을 갖지 못한다. 그러나, 이들 4 Sites의 암석 시편들은 대자율값이  $130 \sim 695 \times 10^{-6} \text{ G} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{Oe}$ 로 측정된 응회암류 중에서는 가장 큰값을 갖고며, 또한 Site 25, 36 및 46의 평균 대자율 이방성의 최대 방향의 신뢰도를 나타내는 95 값은  $8.2 \sim 10.2^\circ$ 로서 다른 Site에 비하여 값이 작다

(Table 1). 이러한 점으로 미루어 볼때, 위의 Site들이 의미있는 수렴점을 갖지 못하는 이유는 암석 시편 자체의 문제 (낮은 대자율과 이에따른 대자율 이방성 최대방향의 분산)보다는 이들 Site를 포함하는 지역의 암석 형성 이후 국지적인 위치변화에 의한 것으로 사료되나, 이의 증명은 암체의 위치변화가 확인되어야만 가능할 것이다.

연구지역에 분포하는 유천층군 화산암류의 전반적인 분포는 하부에서 상부로, 북서부에서 남동부로 갈수록 염기성암에서 산성암이 우세하게 나타난다. 또한, 한 지점에서의 암상의 변화는 현무암층이 최하부에, 응회암과 Ignimbrite를 포함하는 응회암이 그 상부에, 그리고 최상부에는 용결응회암이 분포되고 있다 (박기화, 1986). 금성산 부근에 분포하는 유천층군 응회암 Group 1과 유천층군 현무암의 대자율 이방성의 최대 방향은 금성산 칼데라 근처지역으로 수렴함을 보인다 (Fig. 3). Group 1의 암상과 현무암류를 비교해 볼때 현무암이 가장 기저를 이루며, 그 상부에 Group 1의 응회암 (Site 6)과 Ignimbrite (Site 7)가, 맨 마지막으로 Group 1의 Site 32와 33을 이루는 용결응회암이 형성되었음을 야외 조사시 이들 암체들의 분포 관계와 위치로 쉽게 인지 가능하며, 이러한 형성 순서는 박기화 (1986)의 관찰과 일치하고 있다. 이러한 암상의 변화는 각 암체의 형성이 시간적 또는 공간적인 요소의 영향을 받았음을 의미한다. 즉, 이들 서로 다른 암상의 형성은 같은 분출지에서 시간적 차이만을 두고 성인적으로 같은 용암의 성분이 변함으로서 이루어졌을 가능성과 (시간적 요소), 분출지의 위치 변화로 인한 용암 성분의 변화, 또는 전혀 다른 성인과 성분을 갖는 용암의 생성과 이 용암이 다른 분출지를 통해 화산암을 형성함으로써 나타나는 암상의 변화의 가능성 (공간적 요소)을 내포한다. 일련의 형성순서를 갖는 화산암류의 Table 1에서와 같은 Group 1과 현무암류로의 분류는 암상의 변화에 근거를 둔 것이며, 이러한 분류는 서로 다른 암상의 형성에 영향을 준 공간적 요소 (분출지의 차이)를 밝히기 위하여 행하여 졌다. 대자율 이방성의 최대 방향의 수렴지는 그 차이가 크지는 않지만 금성산 칼데라 주변의 서로 다른 곳으로 나타나고 있다 (Fig. 3). 직관적으로 이러한 결과는 유천층군 현무암과 Group 1의 암석들이 서로 다른 분출지로 부터 형성되었음을 지지하나, 이들 암석들의 낮은 대자율 이방성 정도와 각 시편들의 편원적인 경향, 그리고 이로인한 대자율 이방타원체의 최대방향의 비교적 큰 분산도를 감안하면 이들 Group 1과 현무암류의 정확한 분출지의 차이는 밝히기 어렵다. 또한, 금성산과 비봉산을 포함하는 금성산 칼데라는 그 존재 시기가 본역의 화산활동의 시초로 보여지는 구산동 응회암의 형성 이전으로 추정되므로 (장기홍 외, 1977) 시기적으로는 본 연구의 대상암석인 유천층군 화산암류는 물론 구산동 응회암의 분출지였을 가능성을 가지고 있다. 따라서, 대자율 이방성 연구 결과에 의해서는 유천층군 현무암과 Group 1의 암석들에 의해 결정되어지는 두

개의 수렴지를 포함하는 금성산 칼데라를 이들 서로 다른 암상을 갖는 화산암들의 공통된 분출지로만 추정하였고, 이 공통의 분출지로부터 시간적 차이를 두고 이들 암류가 형성되었다고 해석할 수 있다. Group 1의 Site 6과 7, 그리고 유천층군 현무암의 Site 16에서는  $60^{\circ}\sim 79^{\circ}$ 에 이르는 대자율 이방성의 최대 방향의 복각이 측정 계산되었다 (Table 1). Site 6과 7의 경우에는 이 두 Site의 바로 하부에 위치하는 Site 3의 현무암에서 (Fig. 1) 측정 계산된 대자율 이방성 최대 방향의 복각이 거의 수평 ( $8.2^{\circ}$ )에 가까우므로 (Table 1), Site 6과 7만을 포함하는 국소적인 함락보다는 이들 암석이 형성될 당시 기저부를 이루는 유천층군 현무암의 침식작용에 의해 형성된 불규칙한 지형의 영향으로 인한 Rheomorphism (Wolff and Wright, 1981; Ellwood, 1982)에 기인하여 높은 복각값을 보여주는 것으로 사료된다. 현무암인 Site 16의 경우에는 하양층군의 불규칙한 침식면에 의한 Rheomorphism, 또는 현무암 형성 후 화산의 함몰로 인하여 화도를 향한 암체의 경사 (Tilting)의 영향으로 복각값이 높은 것으로 사료된다. Rheomorphism과 국부적인 지반의 함락은 암석내의 원래 방향성을 변화시키므로, 일반적으로 이들의 영향을 받은 것으로 사료되는 결과는 해석에서는 제외시켰다. 그러나, 위의 3 Site들에서 구해진 대자율 이방성의 최대 방향의 편각은 이들을 제외한 나머지 Site들의 결과에 의해 결정되는 수렴지를 향해 수렴하므로, 이들 Site들의 대자율 이방성의 복각에 영향을 미친 Rheomorphism이나 함몰에 의한 경사는 편각에는 변화를 유발하지 않은 것으로 생각된다. 따라서, Fig. 3에 도시된 분출지의 결정에는 이들의 결과를 포함시켰다.

유천층군 응회암류 Group 2의 암석 시료 채취 장소는 금성산 북부 4.2 km에 위치하는 용결응회암으로 구성된 타원형의 산으로, 금성산 칼데라 주변부의 화도 (Volcanic Vent)의 하나로 추정되는 곳이다 (Branney, Personal Communication). 유천층군 응회암류 Group 2를 구성하는 Site 27, 28, 29 및 30은 계상의 용결응회암으로서 원래의 산출 상태를 지시하는 방향성이 야외 조사시 관찰된바가 없으므로, 지금 현재의 노두 상태를 형성시의 노두상태로 가정하였다. 오토산 남서 지봉의 남부에있는 도로의 단면 (Road Cut)에서는 용결응회암의 하부에 해당하는 응회암이 관찰되었고 여기로 부터 Site 17의 암석 시료들이 채취되었다. 이 응회암층 내에서는 층리면이 확인 측정되었고, 이 층리면을 기준으로한 경사보정 후의 대자율 이방타원체의 최대 방향이 해석에 사용되었다 (Table 1). Group 2의 5 Sites (17, 27, 28, 29 및 30)의 유천층군 응회암의 대자율 이방성타원체의 최대 방향은 시료 채취 장소내에 그 수렴점을 가지고 있으며 (Fig. 4), 대자율 이방타원체의 최대 방향의 복각은  $42^{\circ}\sim 82^{\circ}$ 로서 다른 Group의 유천층군 화산암류의 복각과 비교해볼때 상당히 큰 값을 갖는다. 화산암이 화도를 중심으로 방사상으로 분출 형성되었을 경우, 화도나 화도로부터 가까운 거리에서는 용암의 흐름

구조의 경사가 급하게, 그리고 화도로부터 멀어짐에 따라 용암의 경사가 완만해짐을 추측할 수 있다. 이러한 화산암의 흐름구조의 방향성은 대자울 이방성의 측정으로 인지 가능하며, 대자울 이방타원체 최대 방향의 복각이 화산암의 흐름구조의 경사를 나타낸다. 본 연구지역에 분포하는 유천층군 화산암류의 암상에 따른 생성순서를 볼 때 Group 2의 구성암석인 용결응회암은 최상부에 놓이며, 시간적으로는 유천층군 화산암류 형성의 최후기에 형성되었다 (박기화, 1986). Wolff (1986)의 용결응회암맥 (Welded Tuff Dyke)의 형성 모델에서 화도의 단협 (Conduit Closure)은 용암의 폭발 (Explosion)과 분출 (Effusion)에 따른 마지막 단계로서 화도내의 용결응회암맥과 그 상부의 용결응회암 돔 (Dome)의 형성의 원인이 되고 있다. 이 모델에 의한 용결응회암맥과 용결응회암 돔은 화도의 단협으로 인한 횡압력의 영향으로 또는 이 횡압력으로 인한 분출 (Squeeze)에 의해 수직에 가까운 흐름구조의 방향성을 나타내게 된다. 산출 상태로 볼 때 용결응회암 돔에 상당하는 연구지역의 용결응회암에서의 흐름구조는 화도를 향해 급한 경사를 보일 것이며, 육안으로 확인되지 않은 용결응회암 흐름구조의 방향성은 본 연구에서 대자울 이방성 연구로 측정되었다. 즉, Group 2에서 암석 시료의 최대 방향의 편각으로 부터 지정된 연구지역내의 수렴점과 이 수렴점을 향하는 최대 방향의 급한 복각 (Fig. 4)은 연구지역이 주변부의 응회암을 형성한 화도라는 사실을 입증하는 결과이다.

안산암질 응회암과 결정질 응회암인 유천층군 응회암 Group 3의 대자울 이방성의 최대 방향은 화산 (華山) 칼데라를 포함하는 다소 넓은 지역으로 수렴하고 있다 (Fig. 3). 이 중 Site 11과 39의 대자울 이방성의 최대방향은 응회암, Ignimbrite와 용결응회암으로 구성되는 유천층군 응회암 Group 1에 의해 정의되어진 금성산 칼데라를 향하여 수렴하는 것으로도 해석할 수 있다. 그러나 Site 11과 39의 암상과 분포위치를 볼 때 Group 3의 동일 안산암질 응회암과 결정질 응회암인 나머지 두 Site와 함께 해석되는 것이 연구지역에서의 일반적인 암상의 변화와 일치하므로, 비록 수렴하는 지역의 분산 정도가 크더라도 이들 4 Sites에 의해 결정되는 화산 (華山) 칼데라 지역을 이들 Group 3 암체의 분출지로 결정하는 것이 타당하다. 도성재와 김광호 (1994)의 의성지역에 대한 고지자기 연구에서는 유천층군 화산암류를 잔류자화의 방향에 근거하여 서로 다른 암상의 4개의 소그룹으로 분류하였으며, 그중 총서적으로 최상부인 소그룹 D는 역자화를 하부인 소그룹 A, B 및 C는 정자화를 기록하고 있어 이들 상부와 하부가 시간적 차이를 두고 형성되었음을 밝히고있다. 상부의 소그룹 D는 암상과 분포에 있어 유천층군 응회암류 Group 3에 대비되고 하부의 소그룹 A, B 및 C는 유천층군 현무암, Group 1 및 Group 2에 대비되며, 이는 화산 (華山) 칼데라를 중심으로한 Group 3의 분출지가 금성산 칼데라 주위의 유천층군 현무암, Group 1 및 Group 2의 분출지와 구분되어지는 본 대자울 이방성 연구의 결

과와도 잘 일치하고있다.

이상에서와 같이 대자울 이방타원체의 최대 방향의 수렴지로 결정된 금성산 칼데라는 유천층군 응회암류 Group 1과 현무암의 분출지로, 유천층군 응회암의 최상부에 해당하는 용결응회암 (Group 2)으로 이루어진 지역은 이 용결응회암을 형성한 화도로, 그리고 화산 (華山) 칼데라는 유천층군 응회암류 Group 3의 분출지로 해석된다. 유천층군 응회암류 Group 1과 Group 2의 대자울 이방성 결과는 이들이 서로 다른 독립된 분출지로 부터 형성되었음을 지시하나 (Fig. 3), 이들 두 Group에서 모두 나타나는 하부의 응회암 및 Ignimbrite와 상부에 용결응회암이 산출되는 구성 암상의 유사성과 두 분출지의 매우 근접한 (약 4.2 km의 거리) 위치는 이 두 분출지가 동일 화산에 의해 시간적 차이를 두고 이루어진 결과일 가능성을 지시한다. 특히 Group 2의 하부를 이루는 응회암 (Site 17)내에서 발견되는 층리면의 경사는 이 암체의 구조적인 변화가 시간적으로 응회암의 생성 후 용결응회암의 생성 이전에 이루어졌음을 의미한다. 따라서 Group 1과 Group 2를 구성하는 유천층군 암석은 금성산 칼데라를 중심으로 먼저 하부의 응회암과 Ignimbrite의 생성과 그 후 상부의 용결응회암의 생성 등 두번의 화산활동에 의해 형성되었음을 추정할 수 있다. 이와 같은 해석을 종합해 보면, 금성산 칼데라를 중심으로한 유천층군은 초기의 암석인 현무암류의 형성, Group 1과 Group 2의 하부를 이루는 응회암과 Ignimbrite의 형성 및 Group 1과 Group 2의 상부에 분포하는 유천층군 말기의 용결응회암의 형성 등 동일화산으로부터 시간적 차이를 둔 수차례의 화산 활동에 의한 것임을 결론지을 수 있다.

## 결론

의성 소분지 내의 구산동 응회암과 유천층군 화산암류에 대한 대자울 이방성 연구에서는 화산암의 생성시 형성될 수 있으나 육안으로는 관찰되지않는 암체내의 방향성이 대자울 이방성의 측정으로 인지 표시될 수 있음을 보여 주고 있다. 상당히 낮은 대자울값 ( $5 \times 10^{-5} \text{G} \cdot \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{Oe}$  이하)을 보이는 시편들의 존재와 대부분 시편들의 비교적 낮은 평균 이방성 정도는 대자울 이방타원체의 최대 방향의 분산의 원인이 되며, 이러한 분산은 본 연구의 대상 암석인 하양층군의 구산동 응회암과 유천층군 화산암류의 미약한 방향성의 정량적인 측정으로 해석된다. 따라서, 본 연구 결과에서의 대자울 이방성의 최대 방향의 분산도가 큰 이유는 시료 측정시 야기될 수 있는 실험상의 오차에 의한 결과가 아니라, 육안으로 식별될 수 있는 선구조와 엮리구조가 결여된 कै상 산출상을 갖는 암석의 특징적인 방향성이 대자울 이방성 연구에 의해 잘 나타나어 졌다고 사료된다. 또한, 대자울 이방타원체의 최대 편각 방향의 수렴지는 각 암체의 분출지를 적절히 지정하고 있음이 밝혀졌다. 즉, 금성산 칼데라는 유천층군



현무암과 응회암류의 분출지로, 화산 칼데라는 유천층군의 안산암질 및 결정질 응회암류의 분출지로, 선암산 서부지역은 구산동 응회암의 분출지로 해석되었다. 또한, 금성산 칼데라 북부에 위치하는 유천층군 응회암의 최상부에 해당하는 용결응회암의 대자율 이방타원체의 최대 방향의 복각은 42°~82°로서 상당히 큰 값을 가지므로 이 지역은 이 용결응회암을 형성한 화도로 해석하였다. 연구지역에 분포하는 유천층군 화산암류는 금성산 칼데라를 중심으로한 유천층군 초기의 암석인 현무암류의 형성, Group 1과 Group 2의 하부를 이루는 응회암과 Ignimbrite의 형성, Group 1과 Group 2의 상부에 분포하는 유천층군 말기의 용결응회암의 형성 및 연구지역의 남부에 위치한 화산(華山)을 중심으로한 유천층군 응회암류 Group 3의 형성등 수 차례의 화산 활동에 의한 것임을 결론지을 수 있었다.

사 사

본 연구는 전략광물자원 연구센터의 지원으로 수행되었음을 밝히고 이에 감사드린다. 야외작업을 도와준 황창수 군, 대자율 이방성 측정을 도와준 이영주, 김방연 양, 그리고 도면 작성과 원고 교정에 수고한 박용희 군에게도 감사드린다.

참고문헌

김인수 (1990) 포항이남 제 3기 분지 암석의 자기 비등방성과 지구조직  
 응력장. 광산지질, v. 23, p. 59-71.  
 김인수, 이현구, 윤혜수, 강희철 (1993) 의성지역 백악기 암석에 대한  
 고지자기 연구. 광산지질, v. 26, p. 403-420.  
 김상욱 (1986) 경상분지에서 후기 백악기 화산활동에 관한연구. 이  
 상만 교수 송수기념 논문집, p. 167-194.  
 도성재 (1991) 대자율 이방성과 이의 지질학적 응용. 광산지질, v. 24,  
 p. 71-79.  
 도성재, 박찬호, 지세정, 최선규 (1990) 경상북도 의성일대에 분포하는  
 백악기 지층의 자기층서. 지질학회지, v. 26, p. 594-595.  
 도성재, 김광호 (1994) 의성지역에 분포하는 백악기 지층에 대한 고  
 지자기연구. 자원환경지질, v. 27, p. 263-279.  
 박기화 (1986) 의성지역 금성산 칼데라에 관련된 광화작용, 금속광상  
 조사연구. 한국동력자원연구소, KR-86-10, p. 319-337.  
 박찬호, 도성재, 민경덕 (1991) 의성지역에 분포하는 백악기 지층에  
 대한 고지자기연구. 지질학회지, v. 27, 549p.  
 손진담 (1989) 경상북도 군위지역 경상누층군 진주층과 일직층의 퇴  
 적상과 고수류. 지질학회지, v. 25, 505p.  
 엄우용 (1993) 경북 의성지역 선암산 칼데라에 대한 중력 및 자력 탐사  
 연구. 연세대학교 대학원 석사학위논문, 39p.  
 우익 (1993) 경북 의성지역 금성산 칼데라에 대한 중력 및 자력 탐사  
 연구. 연세대학교 대학원 석사학위논문, 39p.  
 윤성효 (1987) 경상분지북부의 화산암물구조. 부산대학교 대학원, 이  
 학박사학위논문.  
 윤성효 (1988) 화산 환상화성암 복합체의 발달사 및 콜드루구조. 지  
 질학회지, v. 24, p. 267-288.  
 이현구, 김상중, 윤혜수, 송영수, 오민수, 최위찬, 정승환 (1991) 경북  
 의성군 오토산 부근의 동-연-이연 광화작용에 관한 연구. 지질학

회지, 27권, 제46차 정기학술발표회 발표논문 요약, p. 527-528.  
 이현구, 김상중, 윤혜수, 송영수, 김인수 (1993) 경북 의성 동남부 오토산  
 주변의 동광화작용. 광산지질, v. 26, p. 311-325.  
 장기홍 (1977) 경상분지 상부 중생세의 층서, 퇴적 및 지구조. 지질학  
 회지, v. 13, p. 76-90.  
 장기홍 (1978) 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조 (II). 지질학회지, v.  
 14, p. 120-135.  
 장기홍 (1987) Cretaceous strata. in Geology of Korea, edited by Lee,  
 D. S., 교학사, p. 175-201.  
 장기홍, 고인석, 이재영, 김상욱, (1977) 한국지질도 (1:50,000) 구산  
 동도폭 및 설명서. 자원개발연구소, 25p.  
 장기홍, 이윤중, 박병권 (1981) 한국지질도 (1:50,000) 군위도폭 및  
 설명서. 한국동력자원연구소, 20p.  
 지세정, 도성재, 최선규, 이재호 (1989) 의성 광화대 동-연-이연은 광  
 상의 지화학적 연구. 광산지질, v. 22, p. 253-266.  
 지세정, 최선규, 도성재, 고홍권 (1991) 의성지역의 금-은 광화작용.  
 광산지질, v. 24, p. 151-165.  
 최현일, 손진담, 오재호, 최영진, 윤현수, 신성천, 양문열, 김상길, 조  
 동행, 문창배, 민성식, 박영수, (1982) 의성지역 경상누층군에 대한  
 연구. 연구특보 28호, 한국동력자원연구소, p. 1-50.  
 Balsley, J.R. and Buddinton, A.F. (1960) Magnetic susceptibility  
 anisotropy and fabric of some Adirondack granite and ortho-  
 gneisses. Am. J. Sci., v. 258-A, p. 6-20.  
 Bouchez, J.L., Gleizes, G, Djouadi, T., and Rochette, P. (1990) Mi-  
 crostructure and magnetic susceptibility applied to emplacement  
 kinematics of granites: the example of Foix pluton (French Py-  
 reness). Tectonophysics, v. 184, p. 157-171.  
 Collinson, D.W. (1983) Methods in rock magnetism and palaeoma-  
 gnetism, techniques and instrumentation. Chapman and Hall,  
 New York, 503p.  
 Cullity, B.D. (1972) Introduction to magnetic materials. Addison-  
 Wesley Publishing Co., Menlo Park, 666p.  
 Ellwood, B.B. (1978) Flow and emplacement direction determined  
 for selected basaltic bodies using magnetic susceptibility aniso-  
 tropy measurements. Earth Planet. Sci. Lett, v. 41, p. 254-264.  
 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.  
 Fisher, R.A. (1953) Dispersion on a sphere. Royal Soc. (London)  
 Proc. Ser. A, v. 217, p. 295-305.  
 Flinn, D. (1962) On folding during three-dimensional progressive  
 deformation. Quart. J. Geol. Soc. London, v. 118, p. 385-433.  
 Graham, J.W. (1954) Magnetic susceptibility anisotropy, an un-  
 exploited petrofabric element. Geol. Soc. America Bull., v. 65 abs.  
 p. 1257-1258.  
 Mark, D.M., (1973) Analysis of axial orientation data, including till  
 fabrics. Geol. Soc. America Bull., v. 84, p. 1369-1374.  
 Rees, A.I. (1965) The use of anisotropy of magnetic susceptibility  
 in the estimation of sedimentary fabric. Sedimentology, v. 4, p.  
 257-271.  
 Seaman, S.J. and Williams, M.L. (1992) Center-to-center analysis  
 and flow fabric characterization in ash-flow tuffs. Bull. Volca-  
 nology, v. 54, p. 319-328.  
 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. 1523-1534.
- Stacey, F.D. and Banerjee, S.K. (1974) *The physical principles of rock magnetism*. Elsevier, Amsterdam, 195p.
- Wolff, J.A. (1986) Welded tuff dykes, conduit closure, and lava dome growth at the end of explosive eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 28, p. 379-384.
- Wolff, J.A., Ellwood, B.B., and Sachs, S.D. (1989) Anisotropy of magnetic susceptibility in welded tuffs : Application to a welded-tuff dyke in the Tertiary Trans-Pecos Texas volcanic province, USA. *Bull. Volcanology*, v. 51, p. 299-310.
- Wolff, J.A. and Wright, J.V. (1981) Rheomorphism of welded tuffs. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v. 10, p. 13-34.

---

1994년 6월 16일 원고접수