

경북·의성 동남부에 분포하는 금성산 화산암류의 K-Ar연대와 그주변의 광화시기

이현구* · 김상중* · 윤혜수* · 최위찬** · 송영수*** · 板谷 徹丸****

K-Ar Age of the Keumseongsan Volcanic Rocks and Mineralization in the Southeastern Part of Euseong, Gyeongsangbuk-Do, Republic of Korea

Hyun Koo Lee*, Sang Jung Kim*, Hyesu Yun*, Wyi Chan Choi**,
Young Su Song*** and Tetsumaru Itaya****

ABSTRACT: The Keumseongsan caldera is composed of the Cretaceous sedimentary rocks of the Gyeongsang Super-group, volcanic rocks of the Yucheon Group and basic dykes. The Keumseongsan caldera is formed by subsidence of volcanic rocks, and arc fault developed late. Also, synistral strike-slip fault (N60°W) developed. Volcanic rocks belong to subalkaline rocks and calalkaline magma series.

First tuffaceous breccia erupted before 71.4 Ma and cavity of magma chamber caused subsidence, which formed arc fault. Basaltic lava erupted at 71.4 Ma and residual fluids containing Fe, As, Pb, Zn and Cu metal elements built the Ohto deposits, which are dated to be 70.5 Ma based on K-Ar age for sericite.

Tuffaceous breccia and tuff erupted between 70.5 and 67 Ma. When volcanic eruption became weakened, cavity in site of magma chamber brought subsidence. Rhyolite intruded and erupted at 67 Ma, and intrusive rhyolite intruded according to arc faults, also. Hydrothermal fluids containing Fe, As, Pb, Zn, Cu, Sb, Bi, Au and Ag formed the Tohyeon deposits. K-Ar age for sericite from the Tohyeon mine gives 66.0 Ma.

Results of field exploration, geochemical analyses of volcanic rocks support mineralization possibility by volcanism. Especially, age of volcanism and mineralization are well in coincidence with results of K-Ar age dating.

By these results, Ohto Cu mineralization is regarded to be associated with basaltic rocks, while Tohyeon Cu mineralization with rhyolitic rocks.

서 언

한반도의 남부에는 백악기말에 분화된 화산암체의 함몰에 의해 형성된 크고 작은 칼데라가 많이 분포하고 있다. 특히, 한반도 동남부에 분포하는 금속광상들은 대부분이 경상계의 퇴적암류를 모암으로 하고 있으며, 이들광상의 주변에는 백악기 말의 화성암류가 분포되고 있어, 대부분

의 금속광상들은 이들과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되어 있다 (이상만, 1972; 민경덕 외, 1982 등). 최근, 외국에서는 화산성합몰과 관련된 광상에 대하여 많은 연구결과 (Lipman and Hagstrum, 1992; Kubota, 1991; Kouda and Ni, 1986; Kouda and Koide, 1978)가 발표되고 있고, 새로운 광상탐사에 성공하는 예가 늘어가고 있다. 이는 암석의 고결화 과정에서 잔류열수용액이 화산암체의 분출과 함몰에 의해 생긴 구조대를 따라 관입하므로써 광상이 형성되고 있어, 칼데라 주변의 지질구조와 암석에 대한 연구는 잠두 광상에 대한 탐사의 기초자료가 되기 때문이다. 그러나, 국내에서는 화산성합몰과 관련된 칼데라가 많이 분포되어 있음에도 불구하고 광화작용과의 연관성에 대한 연구는 많지 않다 (김중환 외, 1990).

따라서, 금번 연구는 경북 의성에서 남동쪽에 위치하는 금성산 칼데라의 진화와 그 주변에 배태되는 동광상 생

* 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Daejeon 301-764, Korea)

** 한국자원연구소 도록연구실 (Korea Institute of Geology, Daejeon 305-350, Korea)

*** 전북대학교 자원공학과 (Department of Mining and Mineral Resources Eng., Jeonbuk National University, Jeonju 560-756, Korea)

**** 오가야마 이과대학 히루젠연구소 (Hiruzen Research Institute, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-Cho, Okayama 700, Japan)

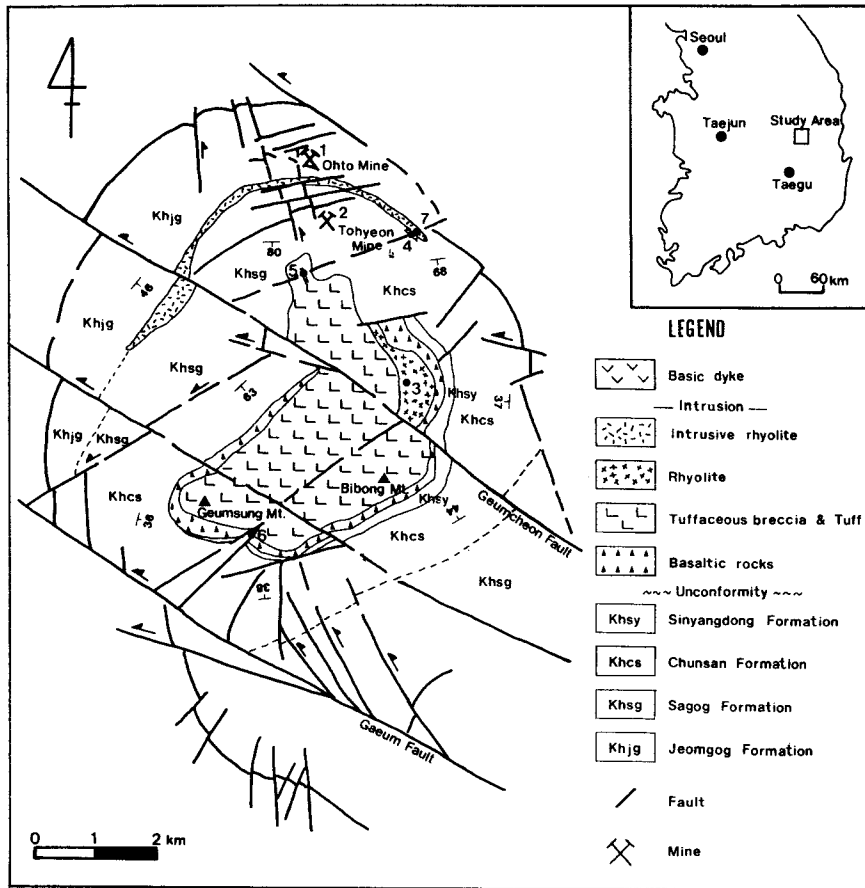


Fig. 1. Geologic and sample site map of the study area.

성과의 관계를 규명하고자 하였다. 이지역에 대한 층서학적, 암석학적 및 구조지질학적인 연구로는 원종관 (1968), 장기홍 (1977, 1978), Kim, (1977), 원종관 외 (1978), 이광춘 (1985), 손짐담 (1990), 윤혜수 외 (1993) 등이 있고, 금성산 칼데라에 대한 지질학적, 암석화학적 및 구조학적인 연구로는 박기화 (1986), 윤성효, 차문성 (1986) 및 윤성효 (1987, 1993) 등이 있으며 광상학적인 연구로는 지세정 외 (1989, 1991), 김상중, 이현구 (1992), 송영수 외 (1993), 이현구 외 (1991, 1993a, 1993b) 등이 발표되어 있으나, 이들 광상의 생성이 화산활동과 어떠한 관계에 있는가는 명백하게 밝혀져 있지 않다. 이현구 외 (1993b)는 금성산칼데라북단의 오토산주변에 배태되는 오토광산, 토현광산의 동광화작용은 동일방향의 구조대 (NS대)에 규제되어 생성된 광상임에도 불구하고 광물의 산출상태, 공생관계, 화학조성등에 있어서 매우 상이한 성질을 가지고 있음을 보고하고 있다. 따라서, 금번의 연구에서는 금성

산칼데라의 생성기구와 생성시기, 그리고 그 주변에 배태되어 있는 토현광산과 오토광산의 동광화시기를 밝힘으로서 금성산칼데라의 형성과 동광화작용과의 관계를 규명하는데 중점을 두었다. 이를 위하여 금성산 화산암 복합체의 구조운동과 분출 및 관입시기를 K-Ar법에 의해 결정하고, 상기의 두 광상에서 열수변질물을 채취하여 K-Ar연령을 측정하여 화산활동과 광화작용과의 시공간적 관계를 고찰하고자 하였다.

지질개요

금성산 칼데라주변의 지질은 중부 백악기의 하양층군에 속하는 퇴적암류와 이를 부정합으로 덮고 있는 백악기 말에 관입분출한 유천층군의 화산암류로 구성된다 (Fig. 1). 금성산칼데라는 직경이 8×10 km의 환상단층에 의해 둘러싸이며, 기반암인 퇴적암층과 화산암층은 칼데라의 중심을

향하여 경사져 있다 (장기홍 외, 1981). 화산합물체 (Cauldron)는 기반암인 퇴적암층, 탐리현무암, 금성산 유문암질 쇄설성퇴적층, 관입유문암 및 중성암맥으로 구성된다. 탐리현무암은 용암과 화성쇄설암으로 구성된 스트롬볼리 (strombolian) 분출상을 나타낸다. 금성산 유문암질 쇄설성 퇴적층은 주로 용결응회암으로 구성되며, 하부에는 응회 각력암, 화산력응회암 및 응회암으로 구성된다 (윤성효, 차문성, 1986). 본 연구지역의 경상누층군을 구성하는 퇴적암류와 화산암류에 대한 암석학적, 지사학적, 층서학적, 지질구조학적 연구는 상술한 바와 같이 많은 연구결과가 발표되어 있으므로 여기서는 그 개요만을 요약하기로 한다.

금성산 칼데라주변에 분포하는 퇴적층은 하부로 부터 점곡층, 사곡층, 춘산층 및 신동양층으로 나누어진다. 이들 퇴적암류는 금성산 남쪽과 서쪽에서는 일반적인 층리의 주향과 경사가 N10~20°E, ~15°SE이나 금성산 동쪽에서는 주향이 EW로 바뀌고 있다. 특히, 금성산칼데라 주변에서는 화산암체의 함몰에 의해 생성된 환상단층의 영향으로 금성산을 중심으로 급경사를 이루는 synclorium구조를 보이고 있다.

점곡층은 주로 암회색 내지 흑색세일로 구성되나 하부 점곡층에는 수조의 자색세일의 박층이 협재되어 있다. 사곡층은 자색세일이 우세하게 나타나고 사암 및 사질세일이 박층으로 분포된다. 춘산층은 흑색 내지 암회색의 사질세일 및 세일로 구성되어 있다. 신양동층은 금성산칼데라 주변에 50~100 m 정도의 두께로 분포되며 주 구성암은 암회색 내지 흑색세일, 자색세일의 호층대를 이룬다.

금성산 칼데라를 구성하는 화산암류는 현무암과 현무암질 응회암으로 구성되는 현무암질암류와, 이를 피복하는 응회질각력암, 응회암 및 유문암으로 구성되는 산성화산암류, 그리고 화산암체의 함몰에 의해 생성된 환상단층대를 관입한 유문암과 최후기에 관입한 중성암맥으로 구성된다. 금성산 칼데라 최하부의 현무암질로부터 상부의 유문암까지는 bimodal volcanic suite를 형성하고, 현무암질암에서 유문암질암까지의 연속적인 동원마그마에서 분화 단계를 보여주는 안산암질암이 관찰되지 않음이 특징이다.

현무암질암류는 주로 현무암과 현무암질 응회암으로 구성되어 있다. 이 화산암은 퇴적암류를 부정합으로 덮고 있고, 그 층후는 약 150 m에서 200 m 정도이다. 주로 짙은 회색을 띠고 있으며 방해석과 규산질 광물이 행인상구조를 보이고 있다. 현미경하에서 주 구성광물은 사장석과 휘석으로 구성되고 부성분광물로는 녹니석, 방해석 및 불투명 광물 등이다.

산성화산암류는 응회질각력암, 응회암 및 유문암으로

구성된다. 응회질 각력암은 현무암의 상부에 놓이고, 본 칼데라 지역의 주된 화산암체를 구성한다. 즉, 현무암 및 세일의 암편과 이들 사이를 충전하는 화산회로 구성되고 암편의 크기는 수 mm에서 약 20 cm에 달하는 것도 있다. 암편중에는 1 내지 5 mm 정도의 암편이 smectite화 되기도 한다. 응회암은 화산암복합체의 중앙부에 분포되며, 현무암의 상단에 놓여 있고 녹회색을 띤다. 또한, 본 암 내에는 Smectite암편이 수 mm에서 1 m에 달하는 암편이 함유되어 있다. 이 응회암은 중성암맥에 의해 관입되어 있다. 유문암은 금성산 북단에 소규모로 분포되어 있으며 현무암을 피복하고 있다. 반정조직과 유상구조를 갖으며 담홍색을 띤다. 반정은 석영, 사장석 및 흑운모로 구성되고, 기질은 석영, 장석류, 견운모 및 불투명광물로 구성되어 있다.

관입유문암은 금성산칼데라의 북서쪽에 분포되며, 환상 단층을 따라 약 7 km 연장 발달되어 있다. 본 암과 접하는 퇴적암류는 열수변질을 받고 있고, 미약하지만 황화광물이 광염되어 있다. 본암의 주구성광물은 석영과 사장석이고 미량으로 흑운모, 견운모 및 형석으로 구성되어 있다.

중성암맥은 환상단층이나 방상상단층대를 따라 관입하였다. 암색은 회색을 띠고 있으며, 반정으로 사장석 및 흑운모를 포함하는 반상조직을 보이고 있다. 기질은 주로 사장석, 휘석, 석영 및 흑운모로 구성되고 소량의 방해석과 견운모가 관찰된다.

화산암류의 지화학

본 연구지역에 분포되는 염기성 및 산성 화산암류의 주성분 원소와 미량원소에 대한 화학 분석치는 Table 1, 2와 같다.

하커도 (Haker's diagram)에서 TiO₂, Fe₂O₃*, MgO, CaO, P₂O₅의 함량은 증가하는 경향을 보여주고 K₂O는 감소하는 경향을 보여주고 있다 (Fig. 2). 현무암질암류와 산성화산암류는 SiO₂, CaO, Na₂O 와 K₂O/CaO 함량비가 분화 중앙부에서 주변부로 갈수록 증가하나 다른 산화염 들은 감소하는 경향을 보인다. Table 2에서 보는 바와 같이 산성화산암류의 경우 CaO와 MgO가 낮은 함량을 보인다. 이는 현미경관찰에서 휘석 또는 감람석과 같은 유색광물의 산출이 적게 나타나는 것과 일치하고 있다. 전반적으로 SiO₂가 증가함에 따라서 Cr, Sc, Zr, Y과 Sr는 감소하는 경향을 보여주고 있으나, Rb과 As는 증가하는 경향을 보여준다. 그러나 계통적으로 변화를 보여주지 않는 것으로는 Cu, Ni 및 V 등이다 (Fig. 3). 현무암중의 미량원소 함량은 대개 현무암의 평균치보다 낮은 값을 갖고 있으나,

Table 1. Major element analyses and CIPW norms for the volcanic rocks in the Keumseongsan caldera.

	30-30	30-33	30-36	30-38	501-2	5	*501-21	*ES4	30-39	30-40	*30-46	2	*ES1	*ES2
SiO ₂	73.54	71.87	74.42	71.62	73.85	75.74	75.39	76.12	52.12	53.87	48.47	47.06	47.42	45.02
TiO ₂	0.30	0.32	0.10	0.34	0.21	0.09	0.09	0.08	1.30	1.05	1.14	1.15	0.88	0.86
Al ₂ O ₃	13.45	13.92	12.97	14.00	13.52	13.37	13.05	12.76	19.09	15.65	16.70	19.10	18.04	17.60
Fe ₂ O ₃ *	2.18	2.90	1.54	1.53	1.81	1.17	1.65	0.42	8.64	9.32	7.37	10.31	7.32	8.64
MnO	0.04	0.06	0.08	0.09	0.04	0.04	0.02	<0.02	0.12	0.16	0.15	0.14	0.16	0.28
MgO	0.78	0.98	0.13	0.27	0.40	0.07	0.13	0.10	3.99	3.45	5.35	6.92	3.40	2.46
CaO	0.83	0.84	0.18	3.16	0.93	0.25	0.37	0.04	6.37	7.18	8.01	4.08	8.70	6.12
Na ₂ O	3.03	3.82	4.03	2.94	0.79	3.62	3.39	2.20	4.23	3.02	2.41	4.18	3.32	2.78
K ₂ O	4.58	4.06	3.72	4.02	5.00	5.28	5.16	5.24	1.92	1.14	1.06	1.18	2.56	4.44
P ₂ O ₅	0.14	0.14	0.08	0.12	0.03	0.03	0.06	<0.04	0.52	0.46	0.46	0.40	0.56	0.28
H ₂ O ⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.72	-	-
H ₂ O ⁻	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.82	-	-
CO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.90	-	-
LOI	1.74	1.86	0.99	1.63	2.90	0.34	0.91	0.74	2.22	3.94	9.09	-	8.30	10.26
Total	100.65	100.77	98.24	99.72	99.48	100.00	100.12	97.70	100.52	99.24	100.21	99.96	100.66	98.72
CIPW norm														
q	34.68	29.63	35.44	31.91	46.61	35.59	34.13	42.84	-	0.69	3.80	-	-	-
or	27.06	23.99	21.98	23.75	29.55	31.23	30.49	30.96	11.35	6.74	6.26	6.96	15.13	26.24
ab	25.64	32.32	34.10	24.88	6.68	30.63	28.68	18.61	35.79	25.55	20.39	35.35	23.89	14.52
an	3.20	3.25	0.37	13.13	4.42	1.06	1.44	0.20	27.43	25.78	31.62	17.67	26.76	22.43
ap	0.33	0.33	0.19	0.28	0.07	0.07	0.14	-	1.23	1.09	1.09	0.94	1.33	0.66
il	0.57	0.61	0.19	0.65	0.40	0.59	0.17	0.15	2.47	1.99	2.17	2.19	1.67	1.63
ac	2.33	2.05	2.18	-	-	1.75	-	3.40	-	-	-	2.48	-	-
mt	0.38	0.50	0.27	0.27	0.31	1.72	0.29	0.07	1.50	1.62	1.28	6.30	1.27	1.50
di-di	-	-	-	0.47	-	-	-	-	0.34	3.05	2.68	-	5.52	2.01
hd	-	-	-	1.03	-	-	-	-	0.30	2.60	1.49	-	5.04	3.13
hy-en	1.94	2.44	0.32	0.46	1.00	0.17	0.32	0.25	5.40	16.47	12.08	14.81	-	-
fs	2.57	3.56	2.09	1.15	2.21	-	2.15	0.44	5.39	16.07	7.70	-	-	-
ol-fo	-	-	-	-	-	-	-	-	3.07	-	-	5.86	4.14	3.64
fa	-	-	-	-	-	-	-	-	3.37	-	-	-	4.78	7.16
D. I.	87.38	85.94	91.52	80.54	82.31	98.51	93.31	92.41	47.83	41.32	30.45	59.98	41.29	45.63

30-30, 30-33, 30-36, and 30-38; Tuffaceous breccia, 501-2 and 5; Tuff, 501-21; Rhyolite, ES4; Intrusive rhyolite, 30-39, 30-40, and 30-46, 2; Basalt, ES1 and ES2; Basic dyke. *; samples for K-Ar dating, and sample number 2 and 5 are analysed by Yun (1987).

Zn는 높은 함량을 보이고 있다. 또한 산성화산암류중 응회암은 Zn, Ni, Cu, As, Sb 및 Pb (501-2)가 화산암류의 미량성분 평균치보다 매우 높은 함량을 보이고 있다. 이들 화산암류에 대하여 Irvine and Barager (1971)가 제시한 Na₂O+K₂O대 SiO₂에 투영하면 화산암류들은 대체로 비알카리계열에 속하나, 현무암중 일부가 알카리현무암계열에 속하는 것도 있다 (Fig. 4). 또한 Irvine and Barager (1971)가 제시한 normative plagioclase대 Al₂O₃의 성분변화도에 투영하면 일부 화산암류는 tholeiitic 계열에 속하고 있으나 대체로 calcalkaline 마그마 계열에서 유래되었음을 시사해준다 (Fig. 5).

염기성화산암류에서 ΣREE량은 130.4~177.3 ppm의 범위를 보이고 산성화산암류 ΣREE량은 68.4~153.3 ppm의

범위를 보이고 있다. 염기성화산암류가 산성화산암류보다 ΣREE량에 있어서 높은 값을 보이고 있다. 또한 chondrite normalized REE pattern에서 보여주듯이 유문암은 현무암보다 높은 부의 Eu를 보여준다 (Fig. 6).

지질구조

본 연구지역 남쪽의 퇴적층들은 일반적으로 남북방향과 10° 정도의 동쪽경사를 나타내고 있다. 그러나 금성산과 비봉산일대에는 화산분출 및 분화구함몰로 인한 Cauldron subsidence가 관찰되고 이들은 원형함몰 단층을 야기시켰다. 금성산 원형함몰단층은 금성산과 비봉산 사이를 지나는 N40°E 방향의 단층을 중심으로 양측이 서로 기울

Table 2. Trace and rare earth elements of the volcanic rocks in the Keumseongsan caldera (in ppm).

	30-30	30-33	30-36	30-38	501-2	5	*501-21	*ES4	30-39	30-40	*30-46	2	*ES1	*ES2
Sc	3.9	8.6	4.5	5.1	3.1	6	2.2	5.1	18	14	17	18	13	17
V	20	68	—	16	22	5	—	2.0	120	90	100	143	120	120
Cr	9	31	5	7	14	12	3	5	180	140	150	174	37	180
Co	2	5	1	3	7	3	2	—	23	22	22	29	18	15
Ni	30	30	30	20	140	9	—	4	80	70	60	85	29	89
Cu	25	30	5	10	95	15	20	2	40	25	20	58	21	33
Zn	20	15	45	15	785	2728	45	18	120	80	110	656	70	72
As	5	6	5	6	73	—	8	2	2	2	2	—	3	—
Rb	140	130	100	81	150	—	110	130	22	27	24	—	64	87
Sr	123	151	45	204	70	18	43	8	609	575	251	544	264	356
Y	24	26	20	22	16	30	14	32	34	26	26	25	16	20
Zr	156	147	127	136	116	93	93	100	225	195	192	108	120	112
Ag	0.1	0.1	0.1	—	1.4	—	0.1	0.4	—	—	—	—	0.6	0.5
Sb	0.4	0.4	1.3	1.8	1.8	—	0.3	0.5	0.1	0.2	0.2	—	0.9	0.4
Ba	495	552	498	856	845	358	953	216	1532	612	388	694	382	9098
La	30.5	37.0	13.1	28.4	31.7	14.73	29.6	35.3	39.3	31.1	28.1	3.4	30.2	13.8
Ce	60	75	42	39	57	70.42	52	68	85	67	62	75.16	62	28
Nd	23	31	8	17	18	15.00	17	29	40	32	30	38.16	33	15
Sm	4.2	5.3	1.7	3.0	3.0	3.33	3.0	4.8	7.1	5.5	5.5	6.32	5.0	3.3
Eu	0.6	0.7	0.2	0.7	0.6	0.28	0.4	0.3	1.7	1.4	1.5	1.66	1.6	1.2
Tb	0.7	1.0	0.7	0.6	0.5	—	0.5	0.8	1.0	0.8	0.7	—	<0.5	<0.5
Yb	2.45	2.88	2.36	1.79	1.55	2.75	1.7	2.7	7 2.80	2.20	2.26	2.21	1.32	1.43
Lu	0.37	0.44	0.34	0.28	0.27	0.42	0.29	0.43	0.40	0.32	0.34	0.33	0.07	0.22
Hf	4.0	4.5	3.9	3.4	3.1	—	3.3	4.0	5.3	4.3	4.0	—	3.3	3.4
Pb	—	—	—	—	650	—	10	—	—	—	—	—	—	—
Th	14	11	10	7.6	8.8	—	8.6	9.6	3.6	2.9	2.5	—	3.9	1.9
U	2.9	2.2	2.5	2.4	7.7	—	2.1	2.4	1.0	0.6	0.5	—	0.6	—

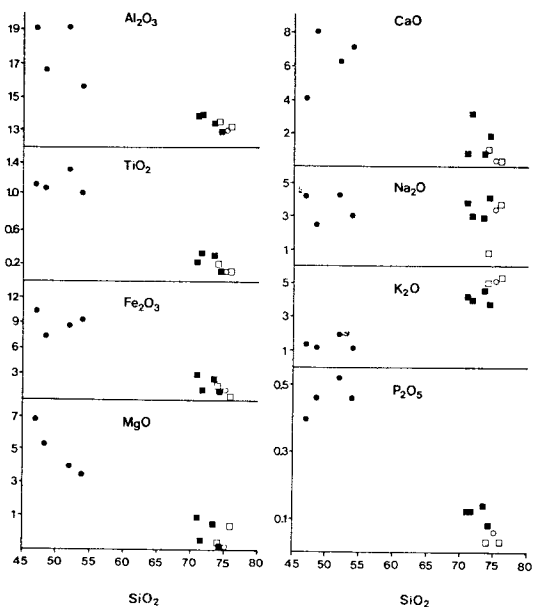


Fig. 2. SiO₂-major oxide chemical variation diagrams. Symbols: circle; basalt, open square; tuff, solid square; tuffaceous breccia, and open circle; rhyolite.

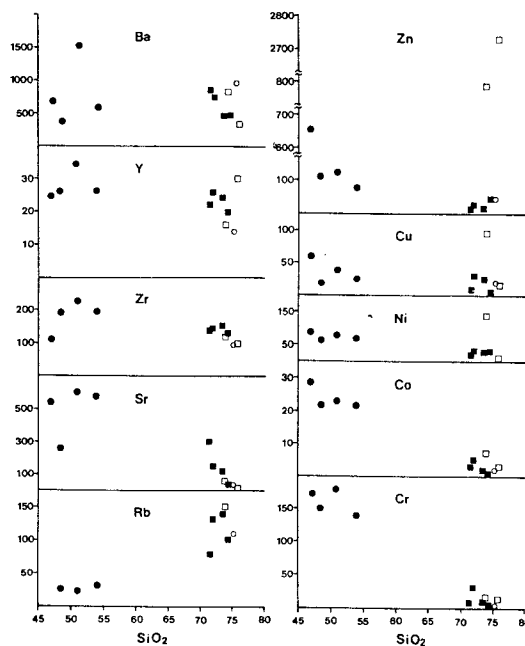


Fig. 3. SiO₂-trace elements chemical variation diagrams. Symbols are the same as in Fig. 2.

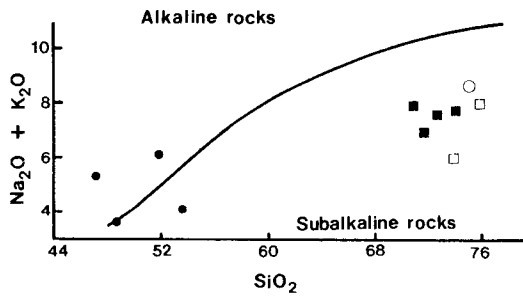


Fig. 4. Plots on $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 in weight percent for the volcanic rocks in the study area (Irvine and Baragar, 1971). Symbols are the same as in Fig. 2.

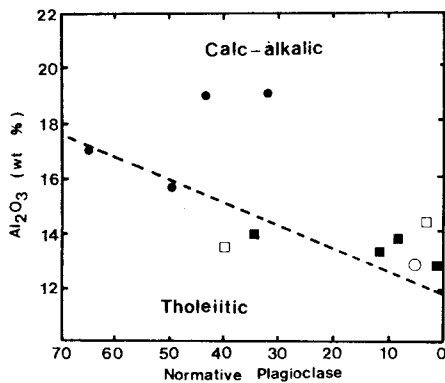


Fig. 5. Plots on Al_2O_3 (wt.%) versus normative plagioclase ($\text{Anx}100/(\text{An} + \text{Ab})$) of the volcanic rocks (Irvine and Baragar, 1971). Symbols are the same as in Fig. 2.

형을 달리한다. 이 단층 북서쪽은 대체로 남동쪽을 향해서 일괄적으로 평면회전운동을 하였으며 남서쪽은 화산활동의 중심지로 보이는 원형의 중심지를 향해서 수렴되는 곡면회전운동 및 함몰운동을 수반하였다. 따라서 $\text{N}40^\circ\text{E}$ 단층을 경계로 하여 층서적인 차이가 나타나며, 함몰운동량은 남동측이 가장 많았고 원형단층과 원형의 중심을 지나는 $\text{N}40^\circ\text{E}$ 단층이 만나는 지역은 함몰량이 적었으며 북서측은 함몰량이 별로 없었던 것으로 해석된다. 금성산 원형단층의 형태는 타원형인데 $\text{N}20^\circ\text{E}$ 방향의 장축과 $\text{N}70^\circ\text{W}$ 방향인 단축의 비율은 4:3.0으로서 각각 10 km와 7.5 km에 달한다.

이들단층은 후기 동남-북서방향의 좌수향이동단층 (synistral strike-slip fault)에 의해 잘려져 offset되었다. 금성산 원형단층대는 $\text{N}60^\circ\text{W}$ 의 주향을 갖는 3조의 좌수향이동단층들에 의해 그 본래의 타원형이 파괴되었다. 그변형량은 북단의 것이 500 m 중간의 것이 250 m 그리고 남단의 것이 약 2,250 m 정도이다 (Fig. 1).

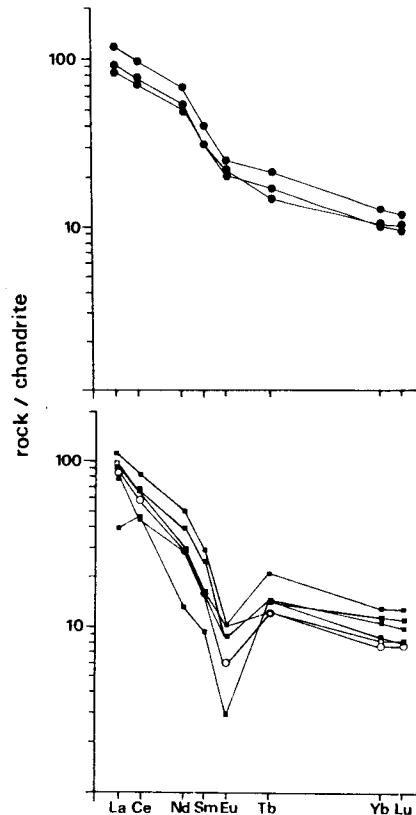


Fig. 6. Chondrite normalized REE patterns of the volcanic rocks in the study area. Symbols are the same as in Fig. 2.

좌수향이동단층은 약 2.5~3 km 정도의 폭을 가지며 $\text{N}60^\circ\text{W}$ 주향의 단층들을 야기시켰는데 각각의 단층은 다시 수조의 coupling을 야기시켰다. 각각의 coupling 지역내에서는 소규모의 좌수향이동단층을 2차로 수반하였다. 수반단층에서 shear faulting이 가장 먼저 일어났으며 그후 장력에 의한 tension fault들이 shear fault들을 소규모로 절단하였다. 이 tension fault들과의 선후관계는 불분명하나 Riedel's fracture pattern에 적합한 $\theta \leq 15^\circ$ 와 $\theta \leq 70^\circ$ 인 2종의 좌수향 이동단층들이 역시 발달하고 있다. 오토산 지역에서는 상기 수반 단층들중에서 shear fault 및 tension fault를 따라서 열수성 열극충진 광화작용이 일어나고 있다.

광상개요

금성산칼데라의 북단에 위치하는 오토산 주변에는 두 개의 동광상이 배태하고 있다. 오토산의 북쪽에는 오토광

Table 3. K-Ar ages of the volcanic rocks and sericites from the study area.

Site No.	Sample No.	Mineral and rocks	K Wt%	Rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ ccSTP/g)	Age (Ma)	Non-rad. (%)
1	OT91503-6-1	Sericite	7.44±0.15	2075.75±20.13	70.48±1.54	1.2
2	TH91501-10-1	Sericite	6.65±0.13	1735.44±17.16	66.01±1.45	2.1
3	ES910501-21	Rhyolite	3.48±0.07	918.58±9.17	66.81±1.47	3.2
4	ES1	Basic dyke	2.03±0.04	412.58±4.57	51.55±1.16	9.2
5	ES2	Basic dyke	3.59±0.07	646.22±6.59	45.84±1.02	5.4
6	30-46	Basalt	0.70±0.02	198.88±2.31	71.37±2.25	15.0
7	ES4	intrusive rhyolite	4.07±0.08	1083.16±10.64	67.30±1.47	2.8

산, 남쪽에는 토현광산이 위치한다. 본 광상의 광화작용에 대해서는 지세정 외 (1989), 이현구 외 (1993a, b)에 의해 자세히 보고되어 있어, 그결과만을 간략하게 요약한다.

오토광산의 동광상은 NS~N20°E 방향의 열극을 충전하여 발달되어 있으나 EW계의 단층에 의해 심하게 교란되어 광맥의 연장이 불량하고 만곡되어 있으며 갭입구로부터 140여m 지점에 발달하는 EW의 단층에 의해 광맥이 동쪽으로 약 60m나 이동되어 있다. 맥폭은 대개 50cm 이하로서 전체적인 광화작용의 정도는 미약하나 부분적으로 부광대를 형성하는 곳도 있다. 산출되는 주성분광물로는 유비철석, 황철석, 황동석, 방연석, 섬아연석, 자류철석 등이며, 부성분광물로는 백철석, 자철석, 적철석, 공작석 등이다. 맥석광물로는 소량의 석영, 방해석등이고, 모암변질로는 건운모화작용이 우세하며 녹니석화, 황철석화, 방해석화작용 등이 관찰된다.

토현광산의 동광상은 N5°W N5°E, 70~85°NE의 주향과 경사를 갖는 초기 광맥과 이를 절단하는 N80°E, 50~70°SE의 주향과 경사를 갖는 후기 광맥으로 구분된다. 초기광맥의 맥폭은 대개 1m 이내이며 부분적으로 3m에 달하는 부광대를 형성하는 곳도 있다. 본 광상에서 산출되는 주성분광물은 유비철석, 황철석, 황동석, 방연석 및 섬아연석 등이며, 부성분광물은 자류철석, 황석석, 차골석, 보우란제라이트, 휘안석, galenobismutite, 자연비스무스 등이고, 맥석광물로는 소량의 석영, 방해석 등이 있다. 모암변질로는 건운모화작용이 우세하며 녹니석화, 황철석화, 방해석화, 고령토화작용 등이 관찰된다.

한편, 후기의 광맥 (EW계)은 갭내에서 6개조가 관찰되는데 초기 광맥보다 맥의 발달이 미약하여 경제성은 없다. 광석광물들은 주로 열극을 따라 농집되며, 간혹 황화광물이 대상을 보여준다. 본광맥을 구성하는 주성분광물은 황철석, 유비철석, 섬아연석, 황동석 및 방연석 등이며, 부성분광물로는 황석석, 백철석등이 있다. 맥석광물은 석영과 소량의 방해석이고 모암의 변질은 녹니석화, 건운모화,

방해석화작용이 미약하게 관찰된다.

K-Ar연대측정

측정 시료의 산상

No.OT910503-6-1 (건운모)

본 시료는 오토광산 갭입구에서 약 60m 지점에서 상부로 약 20m 정도 굴진한 곳에서 채취하였다. NS의 주향과 65°W의 경사를 갖는 광맥 (맥폭은 약 30cm) 주변에는 열수변질작용에 의해 생성된 건운모의 발달이 양호한데 이것을 연대측정시료로 채취하였다. 이 광맥을 구성하는 광석광물로는 유비철석, 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석 등 광화초기에 정출한 광물이다.

No.TH910501-10-1 (건운모)

본 시료는 토현광산의 갭입구에서 약 140m 지점의 NS의 주향과 85°W의 경사를 갖는 광맥 (맥폭은 약 60cm) 주변에 발달한 건운모이다. 광맥을 구성하는 주성분광물은 유비철석, 황철석, 섬아연석, 방연석, 황동석, 황석석, 보우란제라이트 등이다.

No.30-46 (현무암)

본 시료는 의성군 금성면 탐리리 정자골에 분포되는 현무암으로서 (Fig. 1, site 6) 주로 짙은 회색을 띠고 있으며 방해석과 규산질 광물이 행인상구조를 보이고 있다. 현미경하에서 주 구성광물은 사장석과 휘석으로 구성되고 부성분광물로는 녹니석, 방해석 및 불투명광물 등이다. 기질은 주로 입경이 100 μm 이하인 사장석으로 이루어져 있고, 소량의 녹니석, 방해석 및 불투명광물로 이루어져 있다. 반정은 주로 입경이 100~300 μm 정도인 휘석으로 구성되어 있다.

No. ES910501-21 (유상 유문암)

본 시료는 의성군 사곡면 신리리 하전동과 상전동 서남쪽의 해발 약 450 m 부근에 분포되는 유문암으로서 (Fig. 1, site 3), 암색은 담홍색을 띠고 소량의 석영반정을 갖는 반상조직과 유상구조를 보이는 유문암이다. 반정은 100 μm 정도의 석영, 흑운모로 구성되고 기질은 유리질의 석영, 장석류, 견운모 및 불투명광물로 구성되어 있다.

No. ES4 (관입 유문암 ?)

관입유문암은 금성산칼데라의 북서쪽에 위치하는 오토산을 중심으로 칼데라의 함몰에 의해 형성된 환상단층을 따라 두께는 약 100 m에서 400 m의 폭으로 약 7 km 정도 연장 발달되어 있다. 본 암과 접하는 퇴적암류는 열수변질을 받아 미약하지만 자류철석, 섭아연석, 방연석, 황동석 등이 광염되어 있다. 본 시료는 의성군 사곡면 작승리의 토현지 부근 (Fig. 1, site7)에서 N50°W의 주향으로 관입된 관입유문암으로서 암색은 유백색 내지 담홍색을 띠고 입자는 1 mm 정도의 등립질로 구성된다. 본암의 주구성광물은 석영과 사장석이고 미량으로 흑운모, 견운모 및 형석으로 구성되어 있다.

No. ES1, ES2 (중성암맥)

중성암맥은 환상단층이나 방사상단층대를 따라 관입하였다. ES1시료는 토현지부근 (Fig. 1, site4)의 관입유문암과 인접하여 그와 평행하게 발달된 중성암맥 (맥폭은 약 5 m)이고, ES2는 금성산 칼데라의 북서쪽, 만내리에서 토현리간 고개정상부근에 분포되는 응회암을 N15°W의 주향으로 관입한 중성암맥 (맥폭은 약 2m)이다 (Fig. 1, site 5). 암색은 회색내지 녹색을 띠고 있으며, 사장석과 흑운모를 반정으로 하는 반상조직을 보이고 있다. 기질은 주로 사장석, 석영, 휘석 및 흑운모로 구성되고, 방해석과 견운모가 소량 관찰된다.

시료준비

연대측정을 위한 시료준비는 준비과정에서 생기는 오염을 최소한도로 줄이고 정확한 자료를 얻기 위하여 세심한 주의를 요한다.

K-Ar연대측정용 암석시료는 박편을 제작하여 구성광물과 변질상태를 확인한 후, 암석내에 존재하는 반정이나 포획암 등을 핸드픽킹으로 제거시켰다. 이것을 쇠걸구에서 분쇄하여 60~80 mesh 크기로 sieving한 후, 물로 점토분이 없어질 때까지 세척한 후에 다시 이온교환수로 초음파세척기에서 세척하였다. 그리고 2차적으로 마그네틱

분리기를 이용한 자기분리법으로 핸드픽킹에서 제거되지 않은 반정을 제거시켰다.

견운모의 경우에는 시료를 증류수에 넣어서 수비법을 이용하여 점토성분만을 분리하였다. 이런 시료중에 함유된 녹니석은 회염산 (물: 염산=4:1)을 사용하여 제거하였다.

상기의 처리방법으로 제작한 시료는 X-선 회절분석기 (XRD)를 이용하여 시료처리후에 변질물과 불순물이 완전히 제거되었음을 확인하였다. 이와같은 과정을 거친 시료에 대해서 K과 Ar측정용으로 사용하였다. 또한 연대측정에 사용된 시료의 주성분원소와 부성분원소의 화학조성은 Table 1, 2과 같다.

K-Ar 연대측정 결과

K-Ar 연대측정은 일본 오카야마이과대학 허루젠연구소에 설치되어 있는 질량분석기를 이용하여 알콘을 측정하였고, 칼륨은 원자흡광분석기를 이용하여 측정하였다. 화산암류와 맥암류의 분석은 전암분석을, 견운모는 수비법에 의해 순수한 견운모만을 분리하여 분석하였다. 연대측정 시료는 광상의 모양의 변질물시료 2개, 화산암류의 시료 5개였고 측정시료의 위치와 측정결과는 Fig. 1과 Table 3이다. 이 표에서 보여주는 바와 같이 금성산 화산암류의 분화는 금성산화산암 복합체의 하부를 접하는 현무암이 가장 오래된 것 (71 Ma)이고, 비봉산북쪽 정상부에 유상구조를 갖는 유문암이 현무암보다 후기의 암체 (67 Ma)임이 밝혀졌다. 또한, 오토산 북측에 환상단층을 관입한 관입유문암은 상기 유문암의 분화시기와 거의 동일시기 (67 Ma)에 관입한 것으로 보이며, 중성맥암류는 이보다 후기 (46~52 Ma)에 관입한 암체임이 밝혀졌다.

한편, 이 지역에 배태되는 오토광산과 토현광산의 동광화시기는 그 광상모양의 변질물인 견운모를 측정된 결과 오토광산의 생성시기는 70 Ma로서 금성산칼데라의 생성 초기에 분출한 현무암류의 분화시기와 유사한 연대를 보이며, 토현광산은 66 Ma로서 그보다 후기인 유문암질암이나 관입유문암 (?)의 분화시기와 유사한 연대를 보이고 있다.

토 론

오토산주변에 배태되는 동광산들의 광상학적 생성환경의 차이는 이현구 외 (1993)에 의해 보고된 바와 같이 오토광산 (광화 I)과 토현광산 (광화 II)은 금성산칼데라의 생성에 수반된 구조대에 배태된 광상임에도 불구하고 구성광물, 화학조성, 생성온도, 유황분압, 안정동위원소 조성

등이 상이한 값을 가지는 광상이다. 즉, 오토광산은 철, 비소, 연, 아연, 동 등의 금속원소를 함유하는 열수용액에 의해, 토현광산은 철, 비소, 연, 아연, 동, 주석, 안티몬, 비스무스, 금, 은 등의 다금속원소가 용존된 열수용액 의해 생성되어 있는 등 도저히 동일기원의 광상으로 보기는 어렵다. 따라서 상기 두 광상의 생성시기가 다를 것으로 유추되어 K-Ar연대측정을 실시한 결과 오토광산의 열수변질물은 70.4 Ma, 토현광산은 66 Ma에 생성된 것으로 그 시기를 달리하고 있음이 밝혀졌다. 이와같은 시기가 금성산 화산활동과 어떤관계에 있는가를 파악하기 위해 화산암류에 대한 연대측정을 실시하였다. 그 결과 현무암은 71.4 Ma, 유문암은 66.8 Ma, 관입유문암은 67.3 Ma, 중성암맥은 51.6 Ma와 45.8 Ma를 보이고 있어서 적어도 4회 이상의 화산암의 분화가 있었던 것으로 확인되었다. 윤성효 (1993)는 금성산 화산활동을 다섯단계로 분류하고 있는데 탐리현무암의 분화이전에 사곡남서쪽에 소규모의 초기 응회각력암의 분출이 있었다고 보고하고 있다. 그렇다면 71.4 Ma의 현무암 용암의 분출이전에 화산활동이 있었을 것이고, 이때 원형합물구조가 형성되었으며, 신양동층을 포함한 원형합물운동이 수반되었을 것이다. 탐리현무암은 현재의 노두의 발달은 환상분포를 하고 있으나, 원래 환상구조를 갖고 있는 것인지 현무암 용암이 후기의 화산생성물에 의해 피복되어 있는지는 확인할 수가 없다. 그러나 이 현무암의 분출이전에 원형단층이 생성되어 있었다면 이 단층대를 따라 현무암이 분출했을 가능성을 배제할 수 없다.

71.4 Ma 시기에는 탐리현무암의 분출이 있었고, 이때 좌수향 이동단층운동 (약 60°NW)이 있었으며 이에 수반되어 NS계의 소단층이 생성되었을 것이다. 이 단층을 충전하여 잔류열수용액의 관입에 의해 70.5 Ma 시기에 오토광상 (NS계)이 생성되었을 것이다.

그 후 원형합물운동에 의해 생성된 칼데라호에 화산분출물이 퇴적되었고, 67 Ma 시기에는 금성산화산암 복합체의 동북단에 분포하는 유상구조를 갖는 유문암과 원형단층대를 따라 관입한 유문암이 분출하였다. 이때 또다시 좌수향 이동단층운동에 수반된 NS계의 단층대가 형성되었고 이 단층대를 따라 66 Ma경에 산성화산암류의 잔류열수용액의 관입에 의해 토현광상 (NS계)이 생성되었을 것으로 판단된다. 그 이후에도 최소한 2회 이상의 화산활동이 있었고 좌수향 이동단층운동을 수반하였을 것으로 사료된다.

결 론

금성산칼데라지역의 화산암류의 분화에 수반된 구조운동과 동광화작용을 시대별로 구분하여 종합하면 다음과 같다.

1) 71.4 Ma 이전에 초기 응회각력암의 분출이 있었고 (윤성효, 1993), 이에 수반되는 초기 원형합물단층이 생성되었다.

2) 71 Ma경에는 현무암 및 현무암질 응회암의 분출이 있었고, 잔류 용액에 의해서 70.5 Ma에 오토동광상이 형성되었다.

3) 71 Ma에서 67 Ma 사이에는 칼데라의 침강과 더불어 다시 원형합물단층이 생성되었으며, 응회질 각력암과 현무암 및 현무암질 응회암이 칼데라호에 퇴적되었다.

4) 67 Ma경에는 유문암질암의 분출과 원형구조대를 따라 유문암이 관입되었다. 이 마그마의 일부 열수용액은 NS계 단층대를 충전하여 66 Ma경에 토현동광상을 형성시켰다.

5) 67 Ma 이후에 오토, 토현광산에 발달한 NS계 광맥을 절단하는 EW계의 광맥이 생성되었다.

6) 52 Ma경에는 N60°W의 단층대를 따라 중성암맥의 관입이 있었다.

7) 46 Ma경에는 NS계 단층대를 따라 최후기에 관입한 중성암맥이 관입하였다.

결론적으로 상기의 자료를 종합 검토해 보면 오토, 토현동광화작용은 금성산화산암복합체의 분화와 시공간적으로 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, 오토광상과 토현광상은 각각 현무암질암과 유문암질암의 분화와 밀접한 관계를 갖고 있으며, 이 지역에는 최소한 4회 이상의 화산활동이 있었을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 1990년 한국과학재단 특정기초연구비에 의해 수행되었으며, 일부의 연구는 동재단의 전략광물자원연구센터의 협조에 의해 완성되었음을 밝히며 이에 당재단에 감사한다. 야외조사와 실내실험을 적극적으로 도와준 김기운군과 노기숙양, 그리고 K-Ar연대측정실험에 도움준 오카야마 이과대학 히루젠연구소의 학생들에게도 감사를 드린다.

참고문헌

김상중, 이현구 (1992) K-Ar 연대측정을 통한 금성산 화산암류의 분출시기와 주변의 광화작용. 지질학회지, 28권, 제 47

- 차 정기학술발표회 발표논문 요약, p. 510.
- 김종환, 조한익, 고상모, 채수천, 김문영, 신흥자, 이성록, 홍세선, 문희수, 김용준, 윤성효, Reedman, A. J. (1990) 화산원천열수성광상탐사 및 모델정립 (I). 과학기술처.
- 민경덕, 김옥준, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국남부의 백악기말 이후의 화성활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구 (I). 광산지질, 15권, p. 123-154.
- 박기화 (1986) 의성지역 금성산 칼데라에 관련된 광화작용. 동력자원연구소, KR-86-10, p. 319-337.
- 손집담 (1990) 의성소분지 경상누층군 (진주층과 일직층)의 퇴적상과 속성작용. 전국대학 기초과학연구소지구과학 (지질)분야 학술심포지움 발표논문집, p. 11-26.
- 송영수, 채효석, 이강석, 정승환, 이현구, 윤혜수 (1993) 유도분극, 전기비저항, VLF 탐사법을 이용한 벤토나이트 광상탐사 연구. 한국자원공학회지, 30권, p. 102-107.
- 윤성효 (1987) 경상분지북부의 화산암물구조. 부산대학교 대학원, 이학박사학위논문.
- 윤성효 (1993) 의성분지 중앙부 금성산 화산암복합체의 화산활동과 콜드론 구조. 지질학회지, 29권, p. 309-323.
- 윤성효, 차문성 (1986) 후기 백악기 의성 콜드론의 지질과 구조. 부산대학교 사대논문집, 12권 별책, p. 151-171.
- 윤혜수, 이현구, 문희수 (1993) 경상계 퇴적암석의 색과 그 층서적 및 고환경적 의의. 광산지질, 26권, 제 26 차 정기학술발표회 발표논문 요약집, p. 35.
- 원종관 (1968) 경상분지내에서의 백악기 화성활동에 관한 연구. 지질학회지, 4권, p. 215-236.
- 원종관, 강필중, 이상현 (1978) 경상분지의 구조해석과 Igneous Pluton에 관한 연구. 지질학회지, 14권, p. 79-92.
- 이광춘 (1985) 의성소분지 신동층군의 퇴적암석학 및 퇴적환경. 광산지질, 18권, p. 289-299.
- 이상만 (1972) 경상분지내의 화강암류와 광화작용. 순천무교수회잡논문집, p. 195-200.
- 이현구, 김상중, 윤혜수, 송영수, 오민수, 최위찬, 정승환 (1991) 경북 의성군 오토산 부근의 동-연-아연 광화작용에 관한 연구. 지질학회지, 27권, 제 46 차 정기학술발표회 발표논문 요약, p. 527-528.
- 이현구, 김상중, 윤혜수 (1993a) 경북 의성분지내의 동-연-아연광상의 광화작용과 광화시기. 광산지질, 26권, 제 26 차 정기학술발표회 발표논문 요약, p. 242-243.
- 이현구, 김상중, 윤혜수, 송영수, 김인수 (1993b) 경북·의성 동남부 오토산 주변의 동광화작용. 광산지질, 26권, p. 311-325.
- 장기홍 (1977) 경상분지 상부중생계의 층서퇴적 및 지구조. 지질학회지, 13권, p. 76-90.
- 장기홍 (1978) 경상분지의 층서, 퇴적 및 지구조 (II) (퇴적환경과 구조해석-에너지자원 부존검토를 겸하여). 지질학회지, 14권, p. 120-135.
- 장기홍, 고인석, 이영재, 김상욱 (1977) 구산동도폭 (1:50,000). 자원개발연구소.
- 장기홍, 이윤중, 박병권 (1981) 군위도폭 (1:50,000). 한국동력자원연구소.
- 지세정, 도성재, 최선규, 이재호 (1989) 의성광화대 동-연-아연-은 광상의 지화학적 연구. 광산지질, 22권, p. 253-266.
- 지세정, 도성재, 최선규, 고용권 (1991) 의성지역의 금-은 광화작용. 광산지질, 24권, p. 151-165.
- 차문성, 윤성효 (1988) 한반도의 화산암물구조와 환상복합암체에 관한 연구. 지질학회지, 24권, p. 67-86.
- 최위찬, 황재하, 윤옥, 송교영, 김동학 (1990) 우보도폭 (1:25,000). 한국동력자원연구소.
- 최현일 (1985) 백악기 경상분지의 퇴적과 그의 층서분류와의 연관성. 지질학회지, 21권, p. 26-37.
- Kim, H.M. (1973) Sedimentary Structures of the Gyeongsang Supergroup in Northwestern Part of the Gyeongsang Basin, Southeastern Korea. The Journal of Geology Society of Korea, v. 9, p. 125-147.
- Lipman, P. W. and Hagstrum, J. T. (1992) Jurassic ash-flow sheets, calderas, and related intrusions of the Cordilleran volcanic arc in southeastern Arizona: Implications for regional tectonics and deposits. Geological Society of America Bulletin, v. 104, p. 32-39.
- Kouda, R. and Koide, H. (1978) Ring Structure Cauldron, and Ore Deposits in the Hokuroku Volcanic Field, Northern Akita, Japan. Mining Geology, v. 28, p. 233-244.
- Kouda, R. and Ni, R. (1986) Wubu deposits, a representative lead-zinc mineralization associated with Mesozoic volcanic rocks in China. Bulletin of the Geology Survey of Japan, v. 37, p. 271-296.
- Scott, M. McLennan, W. B. Nance and S. R. Taylor (1980) Rare earth elements composition of the continental crust. Geochimica et cosmochimica. Acta., v. 44, p. 1833-1839.
- Irvine, T. N. and W. R. A. Baragar (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences., v. 8, p. 523-548.
- Kubota, Y. (1991) Significance of cauldrons as potential sites of gold deposits. Mining Geology, v. 41, p. 379-386.