

국내에 분포하는 화산암류중 금의 분포특징에 관한 연구

윤정환* · 오근창*

Distribution Characteristics of Gold in the Volcanic Rocks, Korea

Chung-Han Yoon* and Keun-Chang Oh*

ABSTRACT : One hundred of thirty volcanic rocks collected from the Jeju island, Jeongog, Guryongpo and other areas were analyzed for major elements and trace elements with Au by inductively coupled argon plasma and graphite furnace atomic absorption spectrometry. The Au content is the highest values (0.2~43.4 ppb, average; 10.34 ppb) from the Jeju island volcanic rocks and the lowest (0.5~11.0 ppb, average; 1.23 ppb) from the Guryongpo volcanic area. The content of Au tends to be higher in the Quaternary volcanic rocks than Tertiary or Cretaceous volcanic rocks. The Au content of the calc alkali volcanic rocks tends to increase from mafic to felsic volcanic rocks, but that of the alkalic volcanic rocks tends to increase from felsic to mafic volcanic rocks. The Au content of the volcanic rocks collected from the Jeju island shows the highest values in the feldspar olivine basalts. Elements or oxides which have positive or negative correlations with Au are Ag, Mo, Rb, V, Y, K₂O, MgO and SiO₂, but other elements analyzed are not shown correlations with Au. It has a tendency to show that samples from the Jeju with 5 ppb gold and more are plotted in the non-Dupal area and those with less than 5 ppb gold in the Dupal area, while those from the Jeongog with 5 ppb gold and more are plotted in the Dupal area and those with less than 5 ppb gold in the non-Dupal area, in the Ba/Nb-La/Nb, Zr/Nb-Ba/Nb diagrams. It shows that samples from the Jeju and Guryongpo with high gold content are plotted in the within-plate, while those with low gold content are plotted in the arc-related area, and those from the Jeongog are scattered in the TiO₂-Al₂O₃, Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃ diagrams.

서 론

본 연구는 국내 화산암류중 제주도, 전국 및 구룡포 지역에 분포하는 화산암류를 대상으로 하였다. 제주도에 분포하는 화산암류에 관한 지질학적 및 지구화학적 연구는 많은 학자들에 의해서 연구된 바 있고 (Lee, 1966; 원종관, 1976; 이문원, 1984; 이문원 등, 1994; 박범준, 권성택, 1991, 1993a, 1993b), 전국화산암류에 관한 지질학적 및 지구화학적 연구 (김규한 등, 1984; 원종관, 1983; 원종관 등, 1990; 이대성 등, 1983)는 추가령 열곡대 연구 및 제 4기 화산암류 연구와 관련되어 연구된 바 있으며 구룡포 화산암류에 관한 지질학적 및 암석학적 연구 (윤성효,

1988; 이문원 등, 1988; 이유대 등 1988)와 지질학적 및 고지자기에 관한 연구 (김광호 등, 1993; 민경덕 등, 1994)가 이루어진 바 있으나 본 연구지역에 분포하는 화산암류를 대상으로 금함유량에 관한 연구는 수행된 바 없다.

국내에 분포하는 화산암류중의 Au함량에 관한 지구화학적 연구는 김문영 등 (1988)이 경남 양산지역에 분포하는 화산암류를 대상으로 연구한 바 있고 Yoon (1991)이 국내 일부 심성암류와 해남지역의 화산암류 및 점토광물을 대상으로 연구 (1993)한 것이 전부이나 외국의 경우는 중성자활성분석기가 개발되면서부터 암석 및 광물중에 미량으로 존재하는 Au함량을 분석하여 암석 및 광물중 Au의 지구화학적 거동을 연구하였다 (Vincent, Crockett, 1960; Goodwin, 1965; Kwong, Crockett, 1976; Tilling *et al.*, 1973; Keays, Scott, 1976; Shcherbakov, Perezhogin, 1964; Alderton, 1988; Plant *et al.*, 1989;

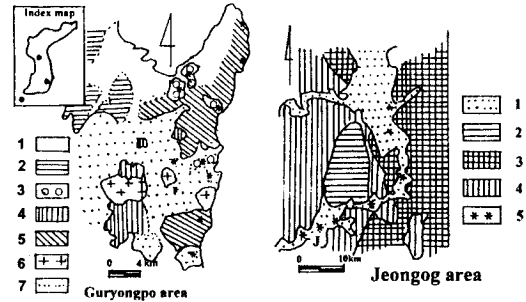
* 전남대학교 자원공학과 (Department of Mineral and Energy Eng., Chonnam National University)

Bencini *et al.*, 1990; Terashima *et al.*, 1994). 화성암류 중 Au함량변화는 분포지역에 따라 상이하기 때문에 화성암류중 금의 지구화학적 분포특징은 아직 확실하게 정리되어 있지 않다. 본 연구에서는 주로 제 3기 및 제 4기에 걸쳐서 분출된 제주도, 전곡 및 구룡포에 분포한 화성암류를 대상으로 주성분원소와 Au를 포함한 미량원소함량을 XRF, ICP 및 GFAAS로 분석하여 국내에 분포되어 있는 화성암류중 Au의 분포특성을 밝히고자 한다.

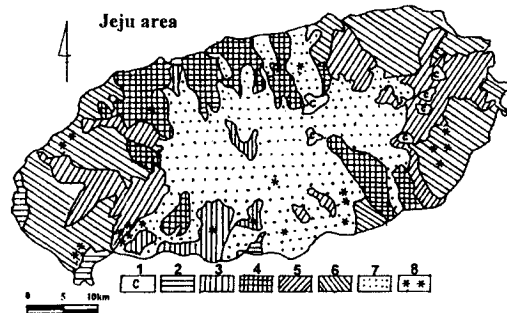
지질개요

제주도의 지질은 신생대 제 3기 플라이오세의 서귀포층, 제 4기 플라이토세에 속하는 성산층, 화순층 및 신양리층의 퇴적층과 현무암, 조면암질안산암 및 조면암 등의 화산암류 그리고 기생화산에서 분출된 화산쇄설물 등으로 구성되어 있다 (Fig. 1). 제주도에서 화산활동은 K-Ar동위원소에 의한 절대연령측정 및 산출상태로 보아 4~5회에 걸쳐서 있었고 70~80회의 용암분출이 있었던 것으로 관찰되며 360여개의 기생화산이 발달되어 있다 (원종관, 1976; 이동영 등, 1987; Lee, 1982). 100 m 이상의 깊이에서는 이들 화산암류는 분포되지 않고 제3기 팔레오세에서 중생대에 속하는 유천층군의 응회암과 화강암이 분포한다. (윤상규, 김원영, 1984; 원종관 등, 1993; 안건상 등, 1995). 원종관 (1975), 윤선 (1986), Lee (1982), Choi (1985) 등은 제주도의 형성과정을 3단계~6단계의 화산분출기로 분류하였는데 최근에는 K-Ar법에 의한 암석의 절대연령 측정결과 용머리 응회환내의 감람석·휘석현무암의 1.2 Ma (윤상규 등, 1986)에서 한라산 조면암의 0.025 Ma (Won *et al.*, 1986)로 밝혀졌으며 화산암의 산출상태 등의 연구로 제주도는 백만년 이상의 화산활동으로 4단계에 걸쳐서 형성된 것으로 정리되고 있다. 초기에 생성된 용암류는 비정질이 대부분이고 후기에 분출된 용암류는 장석과 휘석 반정이 증가하는 경향을 보여준다. 제주도에 분포되어 있는 화산암류는 알카리현무암, 하와이아이트, 뮤저라이트, 안산암, 벤모라이트, 조면암 및 소량의 소레아이트 (Lee, 1989; 박준범, 권성택, 1991) 등이다. 알카리현무암은 반정광물의 종류에 따라서 휘석현무암, 장석현무암 및 감람석현무암류로 세분된다.

구룡포지역에 관한 연구는 포항시 약전동부터 경남 울산시 주전면까지의 해안을 대상으로 했다. 이 지역의 지질은 백악기 불국사통에 속하는 퇴적암류, 화성암류 및 호온펠스가 기반을 이루며 이를 제 3기 장기층군, 범곡리층군 및 연일층과 이 시기에 분출한 화산암류가 부정합으



1. Alluvium, 2. Yonil Group, 3.1. Choogaryong Basalt, 2. Crete Yonil Basalt 4, beonggokri taceous Volcanics, 3. Daebo Granite, 4. Gyeonggi Gneiss Complex, 5. Sample Site, J; Jeongog 6. Igneous Rocks, 5. Sample Site, J; Jeongog



1. cinder cone, 2. Seongsan Fm., 3. Trachytic andesite, 4 Porphyritic Pyroxene Basalt, 5. Amorphous Basalt, 6. Feldspar-olivine Basalt, 7. Feldspar Basalt, 9. Sample Site.

Fig. 1. Simplified geologic map and sample sites of the studied area.

로 피복하고 있다 (Fig. 1). 분지내의 제 3기 화산암류의 지질시대에 관해서 연구자들 (Tateiwa, 1924; 최위찬 등, 1988; 윤선, 1988)사이에 이견을 보였으나 층서적관계와 동위원소 연대측정결과 (Kim *et al.*, 1986; 이문원 등, 1988; 진명식 등, 1988) 에오세로부터 마이오세에 이르는 견해가 우세하다. 특히 이 지역에 분포하는 화산암의 분출시기는 K-Ar법에 의해서 20.5 Ma~22.7 Ma (이문원 등, 1988)로 밝혀짐에 따라 Tateiwa (1924)에 의해서 제 3기말에서 제 4기초로 제시된 연일현무암은 제 3기의 화산활동에 의한 것으로 밝혀졌다. 구룡포연구지역에는 현무암, 안산암, 데사이트 및 유문암 등의 화산암류가 분포하고 있다. 현무암류에는 감람석, 휘석 및 사장석 등이 반정과 석기로 포함되어 있으며 안산암류에는 휘석, 사장석 및 각섬석 등이 반정과 석기를 이루고 있다.

전곡지역의 지질은 선캄브리아기의 경기변성복합체와 연천계가 기반을 이루며 주라기의 화강암이 이들을 관입하고 있다 (Fig. 1). 이대성 등 (1983)은 백악기의 퇴적암류 및 화산암류와 주라기의 화강암류와의 관계를 밝히지

Table 1. Max. min., and mean of major elements in Guryongpo, Jeju island, Jeongog and Keumsungsan areas (wt.%).

Guryongpo		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Intermediate or mafic volcanic rocks	Max.	64.94	19.37	11.02	6.91	10.60	5.10	3.74	1.46	0.34	0.19
	Min.	50.40	14.55	2.63	0.46	0.78	1.86	0.22	0.46	0.07	0.04
	Mean	59.59	17.00	7.25	3.52	6.61	3.68	1.49	0.89	0.25	0.14
	S.D.	4.79	1.23	2.30	1.83	2.21	0.92	0.75	0.30	0.06	0.04
Felsic volcanic rocks	Max.	77.52	16.97	5.16	5.16	3.62	5.25	4.61	0.66	0.20	0.09
	Min.	67.37	12.90	0.52	0.04	0.17	3.19	1.57	0.04	0.02	0.01
	Mean	73.13	14.42	2.44	0.98	1.58	3.99	3.44	0.29	0.09	0.06
	S.D.	3.34	1.12	1.22	1.42	1.16	0.51	0.76	0.19	0.05	0.02
Jeju island		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Max.	57.16	17.84	13.54	9.84	9.02	5.26	3.14	3.25	1.01	0.20	
Min.	46.18	12.89	9.71	2.09	5.69	2.56	0.50	1.85	0.31	0.14	
Mean	49.97	15.18	12.10	6.65	7.97	3.45	1.59	2.36	0.51	0.16	
S.D.	2.09	1.49	0.93	2.19	0.92	0.55	0.59	0.28	0.17	0.02	
Jeongog		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Max.	59.88	16.32	11.40	9.41	16.48	4.17	2.61	1.71	0.63	0.16	
Min.	48.22	10.40	7.18	1.87	6.43	2.60	0.93	0.60	0.09	0.13	
Mean	55.16	14.11	9.12	4.81	9.88	1.29	1.71	1.29	0.35	0.14	
S.D.	2.99	1.88	1.28	2.59	3.55	0.46	0.59	0.46	0.21	0.01	
Keumsungsan		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
Max.	77.19	17.61	8.95	5.34	6.09	5.25	4.58	1.17	0.49	0.11	
Min.	55.91	12.75	1.28	0.10	0.26	3.70	1.30	1.30	0.04	0.01	
Mean	63.31	15.82	6.38	3.06	3.29	4.32	2.62	2.62	0.33	0.07	
S.D.	9.82	2.18	3.60	2.19	2.39	0.67	1.41	1.41	0.21	0.04	

못하였으나 김규한 등 (1984)과 원종관 등 (1990)은 이들을 부정합 관계로 보았고 백악기의 퇴적암류 및 화산암류와 제 4기의 퇴적암류 및 화산암류와는 부정합적이다 (김규한 등, 1984; 원종관 등, 1990). 전곡지역의 용암류는 한탄강을 따라서 분포하고 있으며 현무암류는 73.1 Ma~78.6 Ma (Lee, 1989)에 분출된 것과 0.27 Ma~0.72 Ma (석동우, 1982; Choi, 1982)에 분출된 두종류가 있는데 한탄강을 따라서 분출된 현무암류의 절대연령을 원종관 등 (1990)은 0.1~0.27 Ma로 추정하고 있다.

시료채취 및 실험방법

본 연구를 위한 시료의 채취는 제주도, 구룡포 및 전곡지역을 대상으로 신선한 노두에서 각각 78개, 52개, 33개의 시료를 채취하였다. 채취된 시료를 대상으로 박편제작을 시행하였고 화학분석을 실시하였다. 화학분석을 위해서 채취된 시료를 jaw crusher와 disc mill을 이용하여 200메쉬 이하로 분쇄하여 영국의 London대학교 캐나다 AC-TALAB에서 X-ray fluorescence (XRF)로 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, K₂O 및 Na₂O 등과 같은 주성분 원소함량을 분석하였고 Au함량은 graphite furnace atomic ab-

sorption spectrometer (GFAAS)로 분석하였으며 그밖의 미량원소함량은 inductively coupled plasma (ICP)로 분석하였다.

결과 및 고찰

주성분원소

Table 1은 본 연구를 위해서 제주도, 구룡포 및 전곡지역에서 채취된 시료중 신선한 대표 시료를 대상으로 분석한 결과를 나타낸 것이다. 제주도 지역의 화산암류중 SiO₂함량은 구룡포 및 전곡지역의 화산암류의 SiO₂함량에 비해서 낮은 경향을 보여주는데 이는 제주도 화산암류는 주로 염기성 내지 중성암으로 구성된 반면 구룡포와 전곡지역 화산암류는 염기성암에서 산성암까지 다양하게 분포하고 있기 때문이다. 제주도 지역의 시료중 SiO₂함량은 Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 대부분이 52% 미만이며 52% 미만에 도시된 시료와 56%이상에 도시된 시료도 있어 bi-modal한 경향을 보여주는데 이는 염기성암과 중성암의 분석결과를 함께 도시하였기 때문이다. 제주지역 화산암류에서는 SiO₂함량이 증가함에 따라서 Fe₂O₃, CaO,

MgO 및 TiO₂ 함량이 감소하는 경향을 보여주는 반면에 Na₂O와 K₂O 함량은 증가하는 경향을 나타낸다 (Fig. 2). 구룡포지역 화산암류중에서는 SiO₂ 함량이 증가함에 따라서 Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, TiO₂ 및 P₂O₅는 감소하는 경향을 보여주는 반면에 K₂O 함량은 증가하는 경향을 나타낸다 (Fig. 2). 전곡지역 화산암류에서 SiO₂ 함량이 증가함에 따라서 Al₂O₃와 Fe₂O₃ 함량은 증가하고 MgO 함량은 감소하는 경향을 보여주지만 기타 산화물과의 관계는 불명확하다. 전곡화산암류중 Fe₂O₃, CaO, TiO₂ 및 K₂O 함량은 bi-modal한 경향을 보여주고 MgO 및 P₂O₅ 함량은 tri-modal한 경향 (Fig. 2)을 나타내는데 이는 전곡지역에 분포하는 화산암류의 생성환경 및 생성연대가 상이한 결과인 것으로 사료된다.

Fig. 3은 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 관계를 나타낸 그림이다.

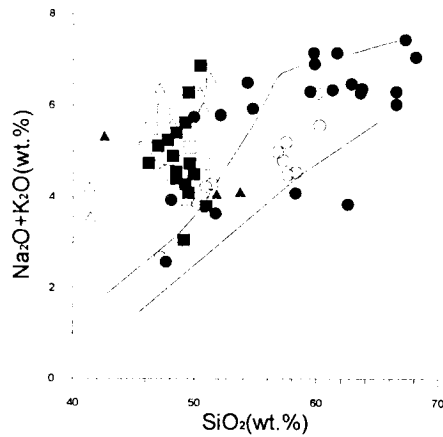


Fig. 3. SiO₂-(Na₂O+K₂O) diagram of the studied volcanic rocks. Symbols as in Fig. 2.

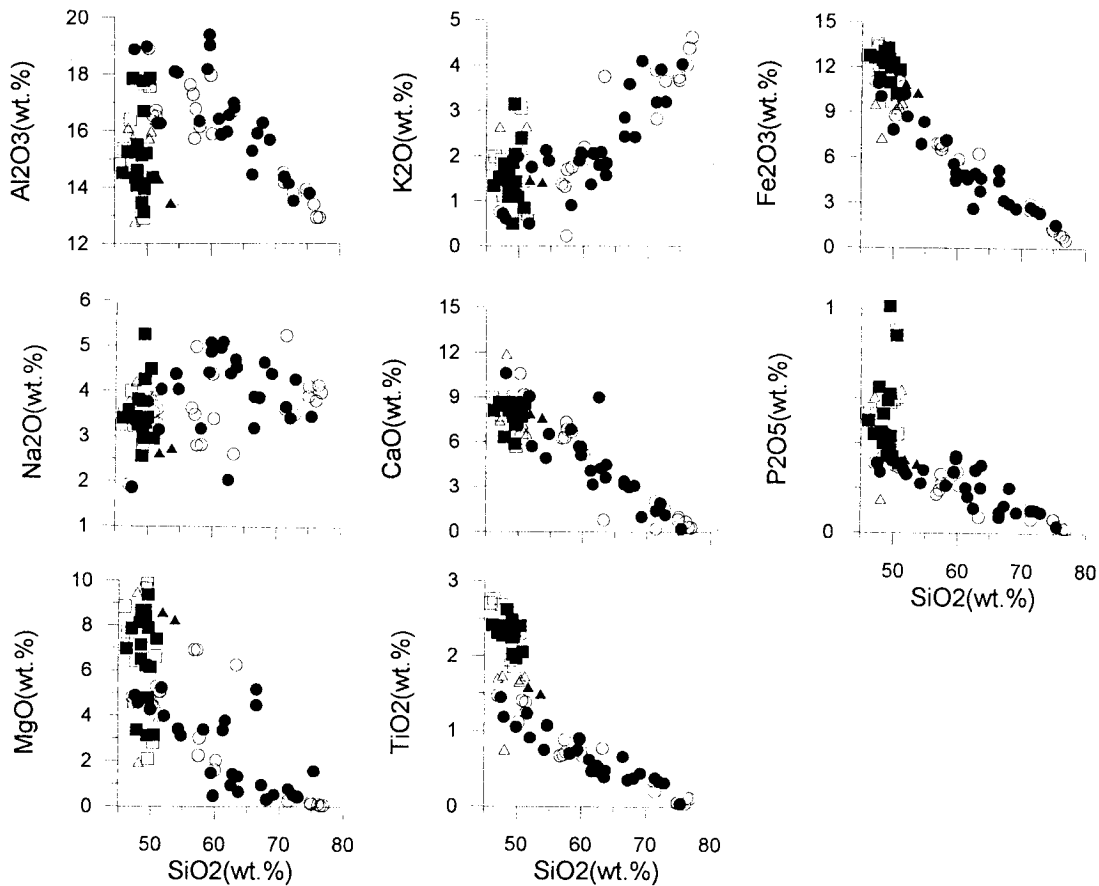


Fig. 2. Major oxide-SiO₂ diagram of the studied volcanic rocks. Symbols are:
 □; JEJU (over 5 ppb Au), ■; JEJU (less 5 ppb Au)
 △; JEONGOG (over 5 ppb Au), ▲; JEONGOG (less 5 ppb Au)
 ○; GURYONGPO (over 1 ppb Au), ●; GURYONGPO (less 1 ppb Au)

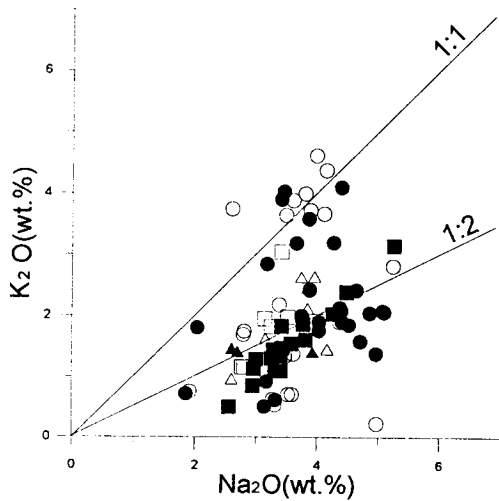


Fig. 4. Diagram of K_2O-Na_2O of the studied volcanic rocks. Symbols as in Fig. 2.

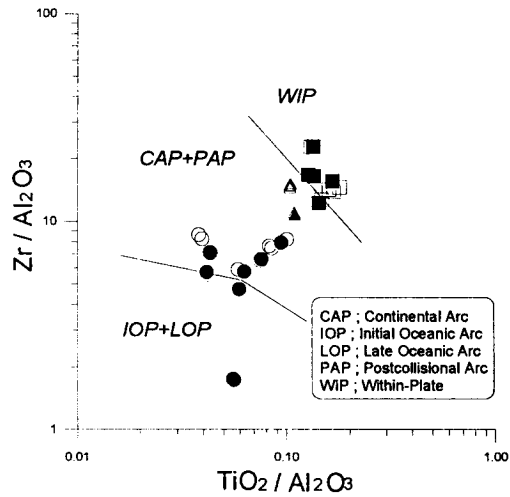


Fig. 6. Discrimination diagram of the studied volcanic rocks. Symbols as in Fig. 2.

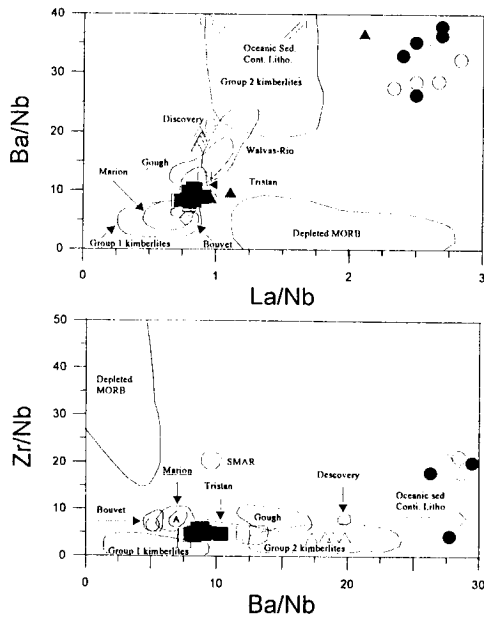


Fig. 5. Covariation of Ba/Nb , and La/Nb ratios of the studied volcanic rocks. From le Roex 91986). Symbols as in Fig. 2.

이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 제주도 화산암류와 전곡화산암류는 알카리영역에 도시되지만 구룡포지역 화산암류는 산재되는 경향을 보여준다. 이러한 결과는 원종관 (1976), 김규한 등 (1984), 이대성 등 (1983), 원종관 (1983), 이문원 등 (1988)이 본 연구지역에서 연구한 결과와 일치하고 있다. 제주도 화산암류에서는 SiO_2 함량과

알카리함량과의 관계는 뚜렷하지 않은 반면 전곡화산암류와 구룡포 화산암류에서는 SiO_2 함량이 증가함에 따라서 알카리함량이 증가하는 경향을 보여주는데 이는 김규한 등 (1984), 원종관과 이문원 (1988), 이민성과 전용원 (1985) 등의 연구결과와 유사하다.

Fig. 4는 Na_2O-K_2O 관계를 나타낸 그림이다. 이민성과 전용원 (1985)은 Middlemost (1975)가 제안한 Na_2O/K_2O 비를 이용하여 전곡화산암류는 알카리화산암류의 K-계열과 Na-계열에 걸쳐 도시되나 K계열이 우세하며 제주도 화산암류는 Na계열이 우세하다고 보고한 바 있으며 Lee (1982)는 MacDonald와 Katsura (1964)가 제안한 방법에 의하여 제주도 알카리화산암은 대체로 전형적인 K계열인 고프형 (Gough trend)과 Na계열의 하와이형의 중간형인 전이적인 경향을 보인다고 밝힌 바 있는데 본 연구결과 (Fig. 4)도 Lee (1982)의 결과와 유사하다.

Le Roex (1986)는 Dupre, Allegre (1983) 그리고 Hart (1984)가 Sr, Nd 및 Pb 동위원소 이상에 의해서 구별한 Dupal 이상과 non-Dupal 이상을 미량원소 Ba/Nb , La/Nb 및 Zr/Nb 비에 의해서도 Dupal 이상과 non-Dupal 이상지역을 구별할 수 있음을 보고한 바 있는데 본 연구지역의 화산암류를 le Roex (1986)가 제안한 그림 (Fig. 5)에 도시한 결과 제주도 화산암류는 non-Dupal에서 Dupal 이상에 걸쳐서 도시되고 전곡화산암은 Dupal 이상지역에 도시되나 구룡포지역의 화산암류 대부분은 대륙암석권의 영역에 도시되는데 제주도 화산암류는 박준범, 권성택 (1993b)이 제주 북부지역 화산암류를 대상으로 연구한 결과와 유사하다. Fig. 6, 7은 Mü-

Table 2. Max., min., and mean of trace elements in Guryongpo, Jeju island, Jeongog and Keumsungsan areas. [Unit : ppm except Au(ppb) & Ag(ppb)]

Guryongpo		Ag	As	Au	Ba	Cu	Mo	Rb	V	Y
Intermediate or mafic volcanic rocks	Max.	180.00	18.30	2.00	650.00	76.00	2.34	158.00	305.00	51.00
	Min.	20.00	0.91	0.50	36.00	4.00	0.09	7.00	7.00	12.00
	Mean	60.00	3.45	0.97	349.86	28.14	0.51	36.76	150.86	27.45
	S.D.	30.00	4.63	0.51	155.95	20.98	0.50	29.10	78.39	7.57
Felsic Volcanic rocks	Max.	110.00	9.08	11.00	745.00	2.57	2.57	156.00	82.00	31.00
	Min.	20.00	0.92	0.50	473.00	0.19	0.19	13.00	2.00	10.00
	Mean	50.00	2.06	1.49	596.06	0.82	0.82	108.72	23.33	21.78
	S.D.	30.00	2.30	2.36	79.18	0.67	0.67	36.92	22.43	7.94
Jeju island		Ag	As	Au	Ba	Cu	Mo	Rb	B	Y
Max.		152.00	1.27	43.40	974.00	54.00	2.87	68.00	237.00	44.00
Min.		11.70	0.25	0.20	264.00	10.00	0.03	6.00	55.00	24.00
Mean		29.46	0.54	10.34	460.00	39.48	0.62	25.89	168.11	29.67
S.D.		26.33	0.26	11.87	195.36	12.83	0.60	12.96	43.28	5.06
Jeongog		Ag	As	Au	Ba	Cu	Mo	Rb	V	Y
Max.		92.70	1.21	28.20	2993.00	58.00	2.13	55.00	173.00	30.00
Min.		11.70	0.24	0.46	227.00	11.00	0.44	10.00	106.00	18.00
Mean		40.84	0.61	12.11	1008.91	31.45	1.34	33.45	138.09	25.18
S.D.		26.70	0.31	9.97	815.15	14.02	0.62	16.19	18.74	3.51
Keumsungsan		Ag	As	Au	Ba	Cu	Mo	Rb	V	Y
Max.		53.20	0.77	13.30	1283.00	34.00	0.50	124.00	156.00	36.00
Min.		33.70	0.41	0.91	419.00	5.00	0.33	17.00	4.00	25.00
Mean		44.40	0.60	7.25	728.33	23.00	0.40	57.33	103.00	31.00
S.D.		8.07	0.15	5.08	393.08	12.83	0.07	47.49	70.06	4.55

ller *et al.* (1992)이 제안한 것인데 이는 SiO₂함량이 41.4~62.1 wt.%, TiO₂가 0.26~5.5 wt.%, Al₂O₃가 7.3~20.1 wt.%, Fe₂O₃ (tot.)가 4.3~12.2 wt.%, MnO가 0.05~0.2 wt.%, MgO가 2.8~18.7 wt., CaO가 3.3~16.5 wt.%, Na₂O가 0.7~4.9 wt.%, K₂O가 0.4~8.4 wt.%, P₂O₅가 0.03~3.1 wt.%, LOI가 0.01~4.9 wt.% 그리고 0.14 < K₂O/Na₂O/Na₂O/8.9 범위에 드는 시료만을 대상으로 Zr/Al₂O₃, TiO₂/Al₂O₃ (Fig. 6) 그리고 TiO₂와 Al₂O₃ 함량관계 (Fig. 7)를 나타낸 그림이다. 제주도 화산암류중 상기의 조건에 부합되는 시료는 금함량이 5 ppb 이상인 것이 대부분이고 5 ppb 이하의 시료는 1개 뿐이며, 전곡화산암류중 상기 조건에 부합되는 시료는 5 ppb 이하의 시료뿐이며 구룡포지역 화산암류중 1 ppb 이상인 시료가 4개이고 1 ppb 이하가 대부분이다. 제주도 화산암류의 대부분과 구룡포 화산암류의 일부는 판내 (within plate) 현무암 영역에 도시되나 대부분의 구룡포 화산암류는 continental arc영역에 도시되며 전곡 화산암류는 분산도시 되는 경향을 나타내는데 제주도 화산암류는 이문원 등 (1994)이 제주도 남사면 화산암류를 대상으로 연구한 결과와 일치한다.

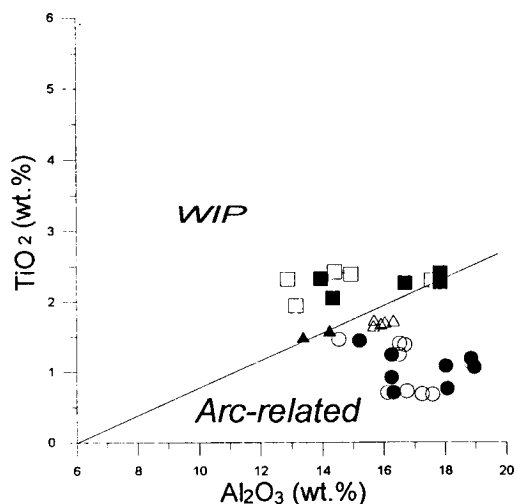


Fig. 7. TiO₂-Al₂O₃ diagram of the studied volcanic rocks. Symbols as in Fig. 2.

금함량변화

본 연구에서 채취한 화산암류를 대상으로 Au를 비롯해

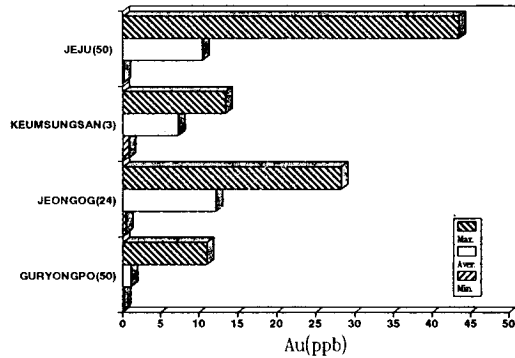


Fig. 8. Maximum, minimum and average content of gold of the studied volcanic rocks. Numbers in parenthesis are number of samples analyzed.

서 9개의 미량원소를 분석한 결과를 Table 2에 나타냈다. Fig. 8은 각 지역의 화산암류의 Au함량을 나타낸 것으로 제주도 화산암류중 최대Au함량은 43.4 ppb이고 최저Au함량은 0.2 ppb이며 평균Au함량은 10.34 ppb이다. 전곡화산암류중 최대Au함량은 28.2 ppb이고 최저함량은 0.46 ppb이며 평균함량은 12.11 ppb이다. 구룡포 화산암류중 염기성 및 중성화산암류에서 최대Au함량은 2.0 ppb이고 최저Au함량은 0.5 ppb이며 평균함량은 0.97 ppb로 매우 낮은 함량을 나타내고 구룡포 화산암류중 규장질 화산암류에서 최대Au함량은 11.0 ppb이고 최저Au함량은 0.5 ppb이며 평균함량은 1.49 ppb로 역시 낮은 함량을 나타낸다. 의성 금성산에 분포하는 화산암류중 현무암 (3개 시료)의 최대 Au함량은 7.53 ppb이고 최저Au함량은 0.91 ppb이며 평균함량은 3.33 ppb인 반면 동일지역 유문암류 (1개 시료)의 Au함량은 13.3 ppb로 산성암에서 Au함량이 더 높다. 무등산에 분포하는 화산암류중 1개의 유문암에서 Au함량은 0.81 ppb이고 안산암류는 0.51~1.35 ppb (평균 Au함량: 0.78 ppb)로 낮은 경향을 보여준다. 이상에서 살펴 본 바와 같이 제주도와 전곡화산암류에서 Au함량이 높은 반면 구룡포, 무등산 및 금성산의 화산암류에서는 낮은 경향을 나타낸다. Au함량분포는 지역적으로 다를 뿐만아니라 화산암류의 암질에 따라서도 상이하다. 즉 알카리계열의 화산암류 (Fig. 9)인 제주도와 전곡화산암류에서 Au함량이 높은 경향을 보여주나 칼크 알카리계열인 구룡포와 무등산 화강암류 (Fig. 9)에서 낮은 경향을 보여준다. 알카리계열에 속하는 제주도와 전곡화산암류중의 염기성암에서는 높고 산성암에서는 Au함량이 낮은 경향을 나타내는 반면에 칼크 알카리계열에 속하는 구룡포 화산암류중 염기성암에서는 낮고 산성암에서는 Au함량이 높은 경향을 보여준다 (Fig. 9). 이러한 경향은 한국과 일본의 심성암류 (Yoon,

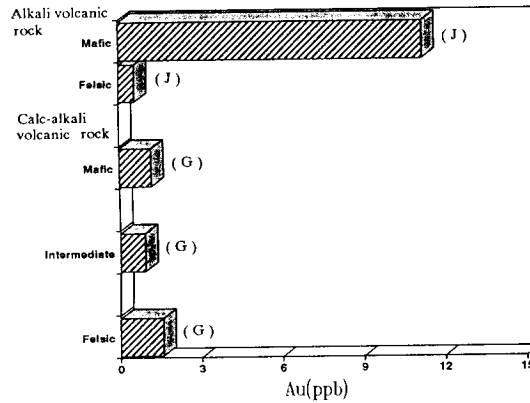


Fig. 9. Gold content of the studied volcanic rocks. G : volcanic rock from Guryongpo area, J : volcanic rocks from Jeju and Jeonggog area.

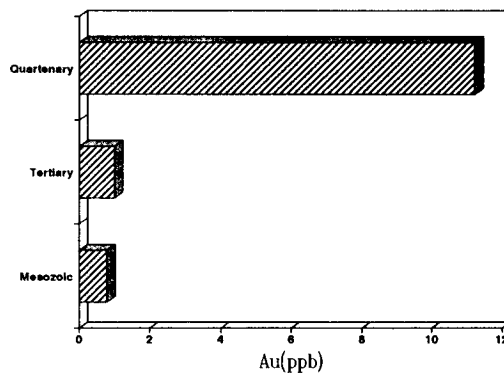


Fig. 10. Average gold content of each periods of the studied volcanic rocks.

1991; Ishihara *et al.*, 1985, 1986)에서 염기성암보다는 산성암에서 Au함량이 높은 반면 미국서부지역 (Gottfried *et al.*, 1972; Tilling *et al.*, 1973), 러시아의 Altai-Sayan습곡지대의 심성암류 (Shcherbakov, Perezhogin, 1964)와 캐나다 Manitoba남서부 (Stephenson, Ehmann, 1971)의 심성암류에서는 반대로 염기성암에서 Au함량이 높고 산성암에서 낮은 결과와 비교하면 매우 흥미있는 결과다.

조암광물중의 Au함량분포를 바탕으로 Au의 산상에는 두가지의 상이한 견해가 있다. 하나는 염기성마그마가 분화 또는 정출하는 과정에서 Au는 불활성 또는 중성원자로서 거동하므로 Au는 암석의 화학성분에 관계없이 분산 (Degrazia, Hoskin, 1964; Mantei, Brownlow, 1967; Voskresenskaya *et al.*, 1970)된다는 것이고 또 다른 견해는 Shcherbakov, Perezhogin (1964)가 제시한 것으로서 Au는 동가의 갈람석과 휘석 격자에 농집되기 때문에 암

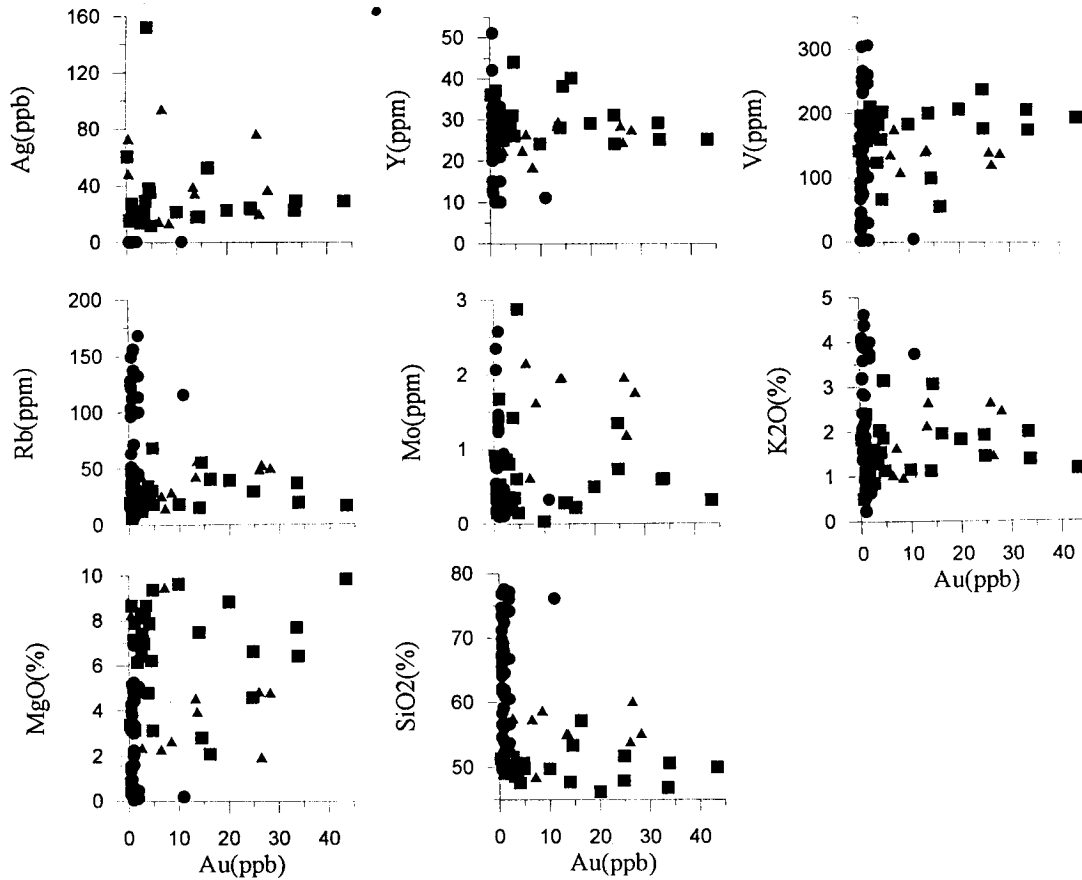


Fig. 11. Plot of Au content vs. Ag, Y, V, Rb, Mo, K₂O, MgO and SiO₂ content. Symbols are ■; JEJU, ▲; JEONGGOG, ●; GURYONGPO.

석이 염기성일수록 Au함량이 높아진다는 것이다. 본 연구결과는 이상의 결과중 어떤 견해와도 일치하지 않지만 제주도 화산암류중 장석질 감람석 현무암에서 Au함량이 다른 화산암류중의 Au함량보다 높은 경향을 나타내는 것으로 보아 제주지역 일부화산암류중 Au함량 분포경향은 후자의 견해와 일치함을 보여준다.

본 연구대상 화산암류중 평균 Au함량은 제 4기 화산암류에서 가장 높고 제 3기 화산암류가 중간이며 중생대 화산암류에서 가장 낮은 경향 (Fig. 10)을 보여 주는데 이러한 Au함량분포경향을 나타내는 이유에 대해서는 아직 확실치 않다.

Fig. 11은 Au함량과 Ag, V, Mo, Y, Rb, MgO, K₂O 및 SiO₂함량과의 관계를 나타낸 것이다. 제주화산류중 Au와 Ag함량관계는 Au함량이 증가함에 따라서 Ag함량이 완만하게 증가하나 전곡화산암류에서 Au와 Ag함량관계는 완만한 부의 관계를 나타내는 그룹과 정의 관계를 나타내는

그룹으로 양분되는데 이는 전곡화산암류에서 보여준 화학조성과 유사하다. Au함량과 V함량과의 관계 (Fig. 11)는 제주도 화산암류에서는 Au함량이 증가함에 따라서 전체적으로 약간 증가하나 전곡화산암류에서는 약간 감소하는 경향을 보여주는데 Terashima *et al.* (1994)도 Izu-Ogasawara의 해저화산암류를 대상으로 연구한 결과 norm 자철석 함량이 높은 화산암류에서 V과 정의 관계가 있음을 보고한 바 있다. 이는 조암광물중 자철석에서 Au함량이 높고 (Shcherbakov, Perezhagin, 1964) 마그마 결정작용시 V이 자철석중에 쉽게 농축되기 때문인 것으로 보인다. 제주도 화산암류에서 Au함량과 Mo함량관계는 Au함량이 25 ppb까지는 정의 관계를 나타내나 25 ppb 이상에서는 감소하는 경향을 보여주며 전곡화산암류에서는 증가하는 그룹과 감소하는 그룹으로 양분된다. Au함량과 Y함량과의 관계 및 Au함량과 Rb함량과의 관계는 일반적으로 부의 상관관계를 나타낸다 (Fig. 11). Au함량과 MgO함량과의 관

계 (Fig. 11)는 제주도 화산암류는 대체로 정의 관계를 보여준다 전곡화산암류에서는 부의 관계를 나타낸다. 일반적으로 화산암류의 K함량은 SiO₂함량과 정의 상관관계를 나타내기 때문에 Au함량과 K함량과는 부의 상관관계가 예상되지만, Gottfried, Greenland (1972), Gottfried *et al.* (1972)의 연구결과에 의하면 반드시 부의 상관관계를 나타내지는 않는다. 본 연구에서도 제주도 화산암류에서 Au함량과 K₂O함량관계 (Fig. 11)는 분산되지만 전체적으로 보면 부의 관계를 나타내며 전곡화산암류도 대체로 부의 관계를 보여주며 일본의 Izu-Ogasawara의 알카리 화산암류 (Terashima *et al.*, 1994)에서도 제주도 및 전곡화산암류와 유사한 경향을 나타내고 있다. SiO₂와 Au함량과의 관계 (Fig. 11)를 살펴보면 제주화산암류의 경우 Au함량이 5 ppb 이상의 시료에서는 대체로 부의 상관성을 보여주고 전곡화산암에서는 Au함량이 15 ppb까지는 대체로 정의 상관관계를 보여주나 15 ppb 이상에서는 부의 상관관계를 나타낸다. 구룡포 화산암류는 대부분의 시료가 2 ppb 이하의 Au함량이기 때문에 뚜렷한 경향을 나타내지 않으나 2 ppb 이상에서는 정의 상관관계를 보여준다.

Fig. 5의 Ba/Nb-La/Nb, Zr/Nb-Ba/Nb도에서 제주도 화산암류중 Au함량이 5 ppb 이상인 시료는 non-Dupal지역에 도시되고 5 ppb 이하인 시료는 Dupal 이상지역에 도시되는 경향을 보여주나 전곡지역 화산암류는 5 ppb 이상의 시료는 Dupal 이상지역에 도시되고 5 ppb 이하인 시료는 non-Dupal지역에 도시되는 상반되는 경향을 보여준다. TiO₂-Al₂O₃관계도 (Fig. 7)에서도 Fig. 6와 마찬가지로 제주도와 구룡포 화산암류 Au함량이 높은 시료는 판내 (within plate)영역에 도시되나 Au함량이 낮은 시료와 전곡화산암류는 판내 (within plate)영역밖에 즉 Arc와 관련된 영역에 도시되는 특징을 보여준다. Müller *et al.* (1992)가 제시한 Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃ (Fig. 6)도에 의하면 제주도 화산암류중 5 ppb 이상이면 Müller *et al.* (1992)가 제시한 조건에 부합되는 시료는 판내 영역에 도시되나 5 ppb 이하인 시료는 continental arc와 postcollisional arc영역에 도시되며 구룡포지역 화산암류는 1 ppb 이상의 시료는 판내 영역에 도시되나 1 ppb 이하의 시료는 continental arc와 postcollisional arc영역에 도시되며 전곡화산암류는 분산도시되는 특징을 보여준다.

결 론

본 연구지역에 분포하는 화산암류를 대상으로 Au분포 특성을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Au함량은 제주도 화산암류에서 가장 높고 구룡포

화산암류에서 가장 낮은 경향을 나타냈으나 지역적 규칙성 (예를 들면 위도에 따른 변화)은 보여주지 않는다.

2. Au함량은 제 4기 화산암류에서 가장 높고 그 다음이 제 3기 화산암류이고 백악기 화산암류가 가장 낮은 경향을 나타낸다.

3. 칼크 알카리화산암류에서 Au함량은 염기성암에서 낮고 산성암류에서는 높은 경향을 보여주는 반면에 알카리화산암류중 Au함량은 산성암류에서는 낮고 염기성화산암류일수록 높은 경향을 보여준다.

4. 제주도 화산암류중 Au함량은 장식 감람석 현무암 (feldspar olivine basalts)이 다른 종류의 화산암류에서 보다 높은 경향을 나타낸다.

5. 본 연구에서 분석된 원소중 Au함량과 정 또는 부의 상관관계를 나타내는 성분은 Ag, Mo, Rb, V, Y, K₂O, MgO 및 SiO₂ 등이며 기타의 원소함량과는 상관성을 나타내지 않는다.

6. Ba/Nb-La/Nb, Zr/Nb-Ba/Nb도에서 제주도 화산암류는 5 ppb 이상인 시료는 non-Dupal지역에 도시되고 5 ppb 이하인 시료는 Dupal 이상지역에 도시되나 전곡화산암류에서는 5 ppb 이상의 시료는 Dupal 이상지역에 도시되고 5 ppb 이하인 시료는 non-Dupal지역에 도시되는 경향을 보여준다.

7. TiO₂-Al₂O₃, Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃도에서 제주도와 구룡포 화산암류 Au함량이 높은 시료는 판내 (within plate)영역에 도시되나 Au함량이 낮은 시료는 arc와 관련된 영역에 도시되고 전곡화산암류는 분산도시되는 특징을 보여준다.

사 사

이 연구는 1994년도 교육부 학술진흥재단의 지원으로 이루어진 연구로서 연구비를 지원해준 학술진흥재단에 감사드리며 의성금성산지역 화산암 시료를 제공해 주신 충남대학교 지질학과 이 현구 교수와 제주도 야외지질조사를 도와주신 김정빈 박사와 농어촌진흥공사 제주도지부 김진희씨에게도 감사드리며 본 연구논문을 위해서 많은 조언을 해 주신 이화여자대학교 김규한 교수님께도 감사드립니다. 그리고 이 논문을 타이핑 해 준 전남대학교 공과대학 자원공학과 박영주양에게도 감사드립니다.

참고문헌

김광호, 도성재, 황창수, 임동성 (1993) 포항분지에 분포하는 연일층군의 고지자기연구. 광산지질, 26권, p. 507-518.
김규한, 김옥준, 민경덕, 이운수 (1984) 추가령지구대의 지질

- 구조, 고지자기 및 암석학적 연구. 광산지질, 17권, p. 215-230.
- 김문영, 신흥자, 이평구, 장영남 (1988) 경남 양산지역에 분포하는 화산암류의 지구화학적 특성연구. 광산지질, 21권, p. 139-148.
- 민경덕, 김원균, 이대하, 이운수, 김인수, 이영훈 (1994) 포항 일원에 분포하는 제3기 암류에 대한 고지자기 연구. 자원 환경지질, 27권, p. 49-63.
- 박범준, 권성택 (1991) 제주도 화산암의 암석화학적 진화 (2): 제주동부 월라봉부근 시추코어연구 요약문. 지질학회지, 27권, p. 531.
- 박범준, 권성택 (1993a) 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부지역의 화산층서에 따른 화산암류의 암석기제 및 암석화학적 특징. 지질학회지, 29권, p. 39-60.
- 박범준, 권성택 (1993b) 제주도 화산암의 지화학적 진화 (II): 제주 북부지역의 화산암류의 미량원소적 특징. 지질학회지, 29권, p. 477-492.
- 석동우 (1982) 전국 및 한반도 지역에 분포하는 현무암에 대한 고지자기 연구. 연세대학교 석사학위논문.
- 안건상, 이현구, 임철철 (1995) 제주도에서 산출되는 화강암에 대한 연구. 자원환경지질, 28권 p. 513-518.
- 원종관 (1975) 제주도의 형성과정과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 이학논집, 1권, p. 7-48.
- 원종관 (1976) 제주도 화산암류에 대한 암석화학적 연구. 지질학회지, 12권, p. 207-226.
- 원종관 (1983) 한반도에서의 제4기 화산활동에 관한 연구. 지질학회지 19권, p. 159-168.
- 원종관, 김윤규, 이문원 (1990) 추가령 알카리 현무암에 대한 지구화학적 연구. 지질학회지, 26권, p. 70-81.
- 원종관, 이문원 (1988) 한반도에서의 제4기 알카리 화산암의 암석학적 연구. 지질학회지, 24권, p. 181-193.
- 원종관, 이문원, 이동영, 박계현 (1993) 성산도록설명서. 제주도청, 104p.
- 윤상규, 김원영 (1984) 제주지역 지열조사연구. 한국동력자원연구소, 연구보고 83-5-08호, p. 109-134.
- 윤상규, 한대석, 이동영 (1986) 제주도 남부지역의 제4기 지열조사연구. 동력자원연구소, KR-86-2 (B)-2호, 7p.
- 윤선 (1988) 한반도 남부의 제3기 층서. 한국과학재단 연구 보고서.
- 윤성효 (1988) 포항분지 북부 (칠포-월포일원)에 분포하는 화산암류에 대한 암석학적, 층서적 연구. 광산지질, 21권, p. 117-129.
- 윤정환 (1993) 해남 옥매산-성산광상 Acid-sulfate변질대에 서 금합량에 관한 연구. 광산지질, 26권, p. 155-166.
- 이대성, 유기주, 김광호 (1983) 추가령일곡의 지구조적 해석. 지질학회지, 19권, p. 19-38.
- 이동영, 윤상규, 김주룡, 김윤중 (1987) 제주도 제4기 지열조사 연구. 한국동력자원연구소, p. 233-278.
- 이문원, (1984) 제주 화산암류에 함유된 mafic포획암. 지질학회지, 20권, p. 306-313.
- 이문원, 원종관, 김광호, 노진환 (1988) 구룡포지역에 분포하는 신생대 화산암의 지질과 암석학적 연구. 지질학회지, 24권, p. 1-15.
- 이문원, 원종관, 이동영, 박계현, 김문섭 (1994) 제주도 남사면 화산암류의 화산층서 및 암석학적 연구. 지질학회지, 30권, p. 521-541.
- 이민성, 전용원 (1985) 한반도 남부의 제4기 화산암류와 이들의 tectonic한 환경. 지질학회지, 21권, p. 260-280.
- 이유대 (1988) 한국 포항분지 신제3기층의 연구-퇴적암석학적, 고생물학적 및 광물학적 연구를 중심으로-. 지질학회지, 24권, p. 16-30.
- 진명식, 김성재, 신성천 (1988) 동위원소지질연구. 한국동력 자원연구소.
- 최위찬, 황재하, 윤옥, 김동학 (1988) 이일지질도폭 보고서. 한국동력자원연구소.
- Alderton, D.H.M. (1988) Ag-Au-Te mineralization in the Ratagain complex, northwest Scotland. Trans., Instn. Min., Metall., Sect., v. 13, B171-180.
- Bencini, A., Ciurlic, C., Tanelli, G. and Verrucchi, C. (1990) Distribution of gold in some magmatic rocks from Central Italy. Mineral Deposits, 25[Suppl] S82-S85.
- Choi, M.C. (1982) Report of the third excavation in Cheongog Paleolithic site. J. of Liberal of art, v. 14, Kon-Kuk Univ.
- Choi, S.H. (1985) Hydrogeological study of Cheju Island. KIER 85-20, p. 173-177.
- Degrazia, A.R., Haskin, L. (1964) On the gold contents of rocks. Geochim. Cosmochim. Acta, 28, p. 559-564.
- Dupre, B., Allegre, C.J. (1983). Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena. Nature, v. 303, p. 142-146.
- Goodwin, A.M. (1965) Volcanism and gold deposition in the Birch-Uchi Lake area. Canadian Inst., Mining Metallurgy Trans., v. 68, p. 91-104.
- Gottfried, D., Greenland, L.P. (1972) Variation of iridium and gold in oceanic and continental basalts. Internat. Geol. Cong., 24th, Montreal 1972, Sec. 10, p. 135-144.
- Gottfried, D., Rowe, J.J., Tilling, R.I. (1972) Distribution of gold in igneous rocks. U.S. Geol. Surv., Prof. Paper, 727, 42p.
- Hart, S.R. (1984) A large-scale isotope anomaly in the southwest hemisphere mantle., Nature, v. 309, p. 753-757.
- Ishihara, S., Kimura, K., Ohta, K. and Sato, A. (1985) Gold abundance of Japanese granitoids. -A preliminary report. Mining Geol., v. 35, p. 295-298.
- Ishihara, S., Kimura, K., Takahashi, H., Saito, Y. and Hirao, Y. (1986) Gold abundance of Japanese plutonic rocks: A preliminary result. Mining Geol., v. 36, p. 407-410.
- Keays, R.R., Scott, A.R. (1976) Precious metals in ocean ridge basalts: Implications for basalts as source rocks for gold mineralization. Econ. Geol., v. 71, p. 705-720.
- Kim, K.H., Won, J.K., Matsuda, J., Nagao, K., and Lee, M. W. (1986) Paleomagnetism and K-Ar age of volcanic rocks from Guryeongpo area. Jour. Korean Inst., Mining Geol., v. 19, p. 231-237.
- Kwong, Y.T.J., Crockett, H.H. (1978) Background and anomalous gold in rocks of an Archean Greenstone assemblage, Kakagi Lake Area, northwestern Ontario. Econ. Geol., v. 73, p. 50-63.
- Lee, J.S. (1989) Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoic Volcanics of South Korea: geodynamics implications on the East-Eurasian margin. Thesis of Doctor Degree, Univ. DOR-LEANS.
- Lee, M.W. (1982) Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea. Sci. Rep. Tohoku Univ., Series 3, v. 15, p. 177-256.
- Lee, S.M. (1966) Volcanic rocks in Cheju island. J. Geol. Soc. Korea, v. 2, p. 1-7.
- Le Roex (1986) Geochemical correlation between Southern Africa Kimberlites and South Atlantic hotspots. Nature, v. 324, p. 243-245.

- MacDonald, G.A., Katsura, T. (1964) Chemical composition of Hawaiian Lavas. *J. Petrology*, v. 5, p. 82-133.
- mantei, E.J., Brownlow, A.H. (1967) Variation in gold content of minerals of the Marysville quartz diorite stock, Montana. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 31, p. 225-235.
- Middlemost, E.A.K. (1975) The basalt clan. *Earth Sci. Rev.*, v. 11, p. 337-364.
- Müller, D., Rock, N.M.s. and Groves, D.I. (1992) Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: a pilot study. *Mineral petrol.*, v. 46, p. 259-289.
- Plant, J.A., Breward, N., Forrest, M.D. and Smith, R.T. (1989) The gold pathfinder elements As, Sb and Bi their distribution and significance in the southwest Highlands of Scotland. *Trans., Instn Min. metal, Sect. B*, p. 91-101.
- Sheherbakov, Y.G., Perezhogin, G.A. (1964) Geochemistry of gold. *Geochem. Internat.*, v. 3, p. 489-496.
- Stephenson, J.E., Ehman, W.D. (1971) Neutron activation analysis of gold in Archean igneous and metamorphic rocks of the Rice Lake-Beresford lake area, southeastern Manitoba. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 933-939.
- Tateiwa, I. (1924) Geological Atlas of Chosun, No. 2, En-nichi, Geological atlas of Kyuryuho & Choyo sheets. Geol. Surv. Gov. Korea Yongil Kuryongpo Gen. Chosun. and Joyan sheet. Geol. Surv. Korea. Seoul.
- Terashima, S., Yuasa, M. and Nohra, M. (1994) Gold content of submarine volcanic rocks from the Izu-Ogasawara (Bonin) Are. *Resource Geology*. v. 44, p. 241-247 (in Japanese with English abstract).
- Tilling, R.I., Gottfried, D., and Rowe, J. (1973) Gold abundance in Igneous rocks: Bearing on gold mineralization. *Econ. Geol.* v. 68, p. 168-186.
- Vincent, E.A., Crockett, J.H. (1960) Studies in the geochemistry of gold-1. The distribution of gold in rocks and minerals of the Skaergaard intrusion, East Greenland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 18, p. 130-142.
- Voskresenskaya, N.A., Zvereva, N.F., Konkina, O.M., and Feldmann, V.I. (1970) Behavior of gold during differentiation of a basic magma. *Geochem. Internat.*, v. 7, 1066p.
- Won, J.K., Matsuda, J.I., Nagao, K., Kim, K.H. and Lee, M.W. (1986) Paleomagnetism and radiometric age of trachytes in Juju Island Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 25-33.
- Yoon, C.H. (1991) Gold content of Jurassic and Cretaceous granitic rock in Korea. *Mining Geol.*, v. 41, p. 151-158.

1996년 5월 28일 원고접수