

부평 은광산 지역의 유문암질암과 화강암류의 가스 및 유체포유물 연구

김규한* · 하우영*

Gas and Fluid Inclusion Studies of the Granitic and Rhyolitic Rocks From the Bupyeong Silver Mine Area

Kyu Han Kim* and Woo Young Ha*

ABSTRACT : Volcanic rocks including rhyolitic tuff, rhyolite and welded tuff in the Bupyeong silver mine area form a topographic circular structure which is interpreted as a resurgent caldera. Granitic rocks are emplaced inside and outside area of the circular structure. Pervasive silver mineralization took place in the rhyolitic rock of the southwestern margin of the caldera. Gas and fluid inclusion studies were carried out to investigate the petrogenetic evolution and post-magmatic alteration for the rhyolitic and granitic rocks. Gas compositions are characterized by a low CH_4/CO_2 ratio (0.004-0.005) for rhyolitic and inside granitic rocks and a high CH_4/CO_2 ratio (0.01~0.29) for outside granitic rocks such as the Kimpo and Incheon granites. Homogenization temperature of solid daughter mineral bearing fluid inclusion (III and IV types) and two phase fluid inclusion (I and II types) for quartz in the Bupyeong granites range from 400 to 500°C and 121 to 514°C, respectively. Salinities vary from 20 to 30 wt% NaCl for type III and IV inclusions and less than 20 wt % NaCl for type I and II inclusions. The fluid inclusion data shows a considerable influx of the meteoric water toward post magmatic alteration stage.

서 언

유문암질 화산암류가 부평지역을 중심으로 계양산, 철마산, 만월산을 거쳐 장수동에 이르는 직경 약 10 km의 환상구조로 신출되고 있다. 환상구조 내외부에 화강암류가 관입하고 있다. 이 지역의 화산암류와 심성암류는 resurgent caldera의 형성 진화과정에 관입 분출된 것으로 해석하였다 (서규식, 1985; 서규식, 박희인, 1986). 국내 최대의 은광산인 부평 은광상이 유문암질암체 내에 발달하고 있으며 이 지역의 지질에 대해서는 박노영, 정경식 (1968), 서규식, 박희인 (1986), 최위찬 등 (1995a, 1995b) 등에 의해 연구된 바 있다. 부평 은광상에 대해서는 신명식 (1970), 전효택, 전용원 (1973) 서규식 (1985), 서규식, 박희인 (1986) 등에 의해 연구가 수행된 바 있다. 대부분의 연구자들이 이 지역의 화산암류를 유문암으로 통칭하거나 응회암류로 명명하였다.

부평 은광산 지역에는 선캄브리아시대의 경기변성암 복합체를 기반암으로 화강암류와 유문암질암이 관입, 분출 분포하고 있다. 유문암질 암체와 관련되어 은광화작용(부평 은광상)이 수반되고 있다. 유문암질암의 환상 분포 및 산출 상태가 특이하며 환상 유문암질암체 분포지역 내외부에 화강암류가 분포하고 있어 이들 암체간의 성인적 관계와 후마그마 열수변질작용의 특징이 흥미의 대상이 되고 있다.

은광화관련 유문암질암의 열수변질 특징과 이와 관련되어 신출되는 심성암류인 화강암류들의 후마그마 열수변질작용의 특성을 규명하기 위하여 부평지역의 화산암류와 화강암류에 대하여 전암가스 분석 및 유체포유물 연구를 실시하였다.

지질개요

부평지역의 지질은 선캄브리아시대의 경기 편마암복합체의 변성암류와 중생대 화성암류 및 맥암으로 구성되어 있다. 변성암류는 편마암, 편암, 규암, 석회암, 각섬암 등

* 이화여자대학교 과학교육과 (Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750, Korea)

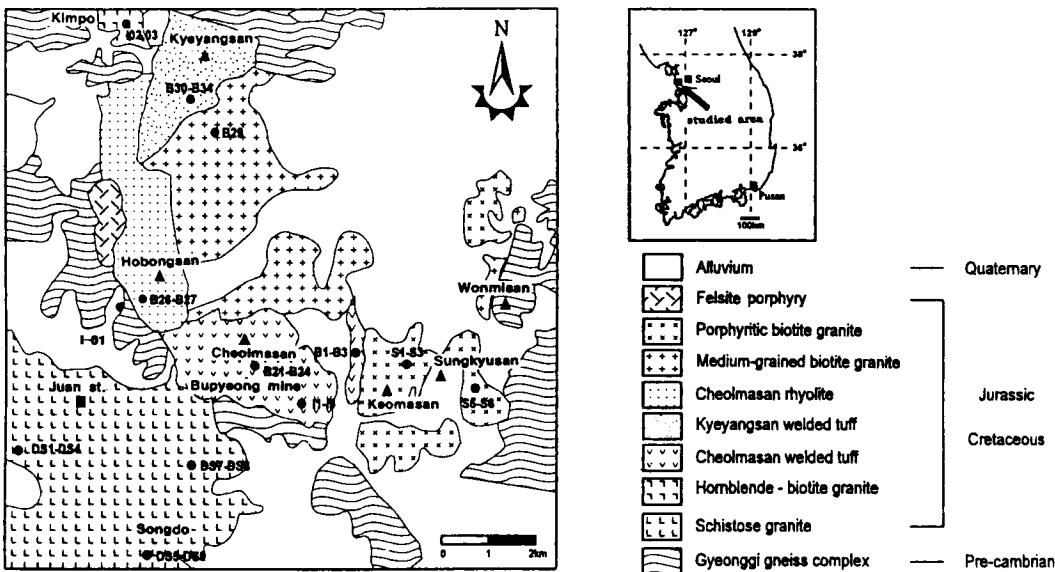


Fig. 1. The geologic map showing sampling site around the Bupeong silver mine area (after Kim, 1975; Choi *et al.*, 1995a; 1995b; Seo, Park, 1986).

으로 구성되어 있다. 중생대 화성암류는 유문암류와 화강암류 및 중성 내지 염기성 맥암으로 구성되어 있다.

화산 쇄설암류의 분포는 계양산, 철마산, 원미산으로 이루는 환상의 지형을 나타내고 있다 (Fig. 1). 화산암류는 주로 유문암질 용결응회암, 응회암, 소규모의 유문암 등으로 구성되어 있다. 환상구조 내부는 지형적으로 저지대를 이루며 저지대는 대부분 화강암이 풍화된 층적층으로 덮여 있다. 화강암류는 조립질 반상 흑운모 화강암, 각섬석-흑운모 화강암, 중립질 분홍색 장석-흑운모 화강암, 엽상화강암 등으로 구성되어 있다. 이중 중립 내지 조립질 홍색장석-흑운모 화강암과 반상 흑운모 화강암은 주로 화산암의 환상구조 내측에 분포하고 있다.

철마산 유문암질 용결 응회암

부령광산 부근에서 거마산과 원미산에 이르기까지 넓게 분포한다. 기질의 색은 밝은 회색, 녹회색 내지 회색을 띠며 간혹 갈색을 띠는 회색 암석도 산출된다. 현미경 하에서 기질은 대부분 석영과 장석 및 유리샤드로 되어 있다. 2 mm 정도 크기의 커다란 석영반정과 정장석, 방해석 반정을 포함하기도 하고 장석 반정의 경우 일부가 2차적으로 방해석으로 치환된 것도 있다. 장석류는 상당 부분이 견운모화 되어있다. 소량의 사장석 반정과 인회석, 녹염석을 함유하며 유문암과 소량의 점토광물 암편을 포함한다. 암편의 크기는 대략 0.5 mm로 비교적 작지만 드물

게는 2-3 m정도의 큰 것도 관찰된다. EPMA분석 결과 사장석 반정의 성분은 대다수 알바이트 ($An_{0.4.3}$)조성을 갖는다. 유문암질 응회암은 암적색 부분과 밝은 부분이 교호되는 유상구조를 갖는다. 정도의 차이는 있지만 대부분 기질은 용결되어 있으며 급속한 냉각 및 고결로 인한 것으로 보여지는 스페룰라이트 조직 (spherulitic texture)이 관찰된다.

계양산 유문암질 용결 응회암

계양산을 중심으로 분포하는 이 암석은 암회색~흑색을 띠는 치밀하고 견고하며 패각상의 깨짐을 보여준다. 대부 분 용결된 부석 및 유리샤드로 구성되어 있는 기질과 정 장석, 소량의 사장석과 석영의 바탕을 갖는다.

철마산 유문암

철마산과 호봉산을 걸쳐 분출한 유문암이다. 암편은 거의 발견되지 않고 붉은색을 띠는 회색 내지 담회색의 색 대에 의해 뚜렷한 유상구조가 나타난다. 정장식 반정이 대부분이지만 사장식 반정도 합유되어 있다.

중립질 분홍색 장석- 흰운모 화강암

황상구조의 내측에 분포하며 분홍색의 장석을 많이 함

유함에 따라 담홍색을 띤다. 대부분 중립질이나 부분적으로 세립질 또는 조립질인 것도 있다. 정장석과 퍼어사이트 (perthite)가 많이 관찰된다. 사장석은 자형~반자형의 결정을 이루며 주로 알바이트 쌍정과 누대구조를 나타내기도 한다. 누대구조의 가장자리 성분은 An_{4-20} 이며 중심부의 성분은 An_{13-23} 이다. 사장석은 주로 올리고클레이스 (An_{10-23})이다.

조립질 반상 흑운모 화강암

거마산 남쪽 및 성규산 동쪽 일대에 관입되어 있다. 약 0.2-0.5 cm 크기의 정장석과 사장석의 반정을 가지는 반상 흑운모 화강암이다. 홍색의 정장석의 큰 결정들이 대부분을 차지하고 있어 암석은 담홍색으로 보인다. 정장석은 대부분이 변질을 받았다. 퍼어사이트와 미사장석이 관찰 된다. 알바이트 쌍정을 보이는 사장석이 자형으로 산출된다. 사장석은 주로 올리고클레이스 (An_{13-23})이다.

각섬석 흑운모 화강암

김포지역인 계양산의 서쪽에서 편마암류와 화산쇄설암류의 경계를 따라 소규모로 관입 분포하고 있다. 흑운모와 각섬석을 많이 함유한다. 흑운모는 자형으로 산출되는 것이 많으며 각섬석은 0.5~1 cm 정도의 크기를 나타내며 일부는 녹니석화되었다. 정장석과 사장석의 반정을 다량 포함하며 석영이 소량 관찰된다. 사장석은 안데신 (An_{30-50})내지 라브라도라이트 (An_{28-59})로 자형으로 산출된다. 각섬석은 희각섬석 (calcic amphibole) 군에 속한다. 각섬석에 대하여는 뒤에 구체적으로 소개한다.

우백질 엽상 흑운모 화강암

인천 남측 송도 지역에 분포하며 흑운모의 엽리구조가 잘 발달한 엽상 화강암 (foliated granite)이다. 흑운모는 부분적으로 녹니석화 되었다. 결정의 크기는 세립~중립에 걸쳐 다양하며 지역에 따라 조립질로도 산출된다. 암석은 우백색 장석이 많아 대체로 흰색~담회색이지만 부분적으로는 홍색 정장석을 많이 함유하고 있다. 부분적으로는 페그마타이트질 화강암도 있다. 주로 정장석과 미사장석으로 구성되어 있고 퍼어사이트도 관찰된다. 올리고클레이스나지 안데신 성분의 사장석 (An_{21-35})과 석영 결정의 연정으로 된 밀메카이트 구조 (myrmekitic texture)도 관찰된다. 사장석은 누대구조를 나타내며 중심부가 Ca-rich 사장석이다.

각섬석 지질압력계

김포지역 화강암 2개 시료의 각섬석에서 총 6점에 대하여 전자현미경분석을 실시하였으며 그 분석 결과는 Table 1과 같다. 각섬석의 구조식은 23 Oxygen을 기초로 표준화하였으며 13-CNK 방법 (Papike *et al.*, 1974)과 15-NK 방법을 사용하여 그 평균값을 채택하였고 Fe^{2+} 와 Fe^{3+} 의 구분은 Laird, Albee (1981)의 방법으로 재계산하였다 (Leake, 1978). IMA에 의한 각섬석 분류법을 적용하면 본 지역 시료의 각섬석은 Ca 이온수가 1.75~1.86^o이고 B자리 Na 이온수는 0.074~0.133로 $(Ca+Na)B \geq 1.34$, $NaB < 0.67$ 에 해당하는 회각섬석군인 ferroan pargastic hornblende에 속한다.

각섬석을 이용한 지질압력계와 지질온도계는 많은 연구자에 의해 보고되어 있다 (Hammarstrom, Zen, 1986, Hollister *et al.*, 1987, Johnson, Rutherford, 1989). 김포 지역 화강암은 각섬석 지질압력계 적용에 필수적인 마그마기원 광물 조합인 사장석+각섬석+흑운모+알칼리장석+석영+스핀+자철석 또는 티탄철석을 포함하는 칼크 알칼리 계열의 심성암 이므로 Johnson and Rutherford (1989)의 지질압력계 적용이 가능한 것으로 판단되어 각섬석 내의 알루미늄 함량에 기초하여 압력을 계산하였다 (Table 2).

Chivas (1981)는 $Si > 7.3$ 인 각섬석은 마그마 고결광물 이라기 보다는 subsolidus crystallization의 결과로 생긴 것으로 가정하였다. Leake (1978)는 이 actinolitic 각섬석의 분류 기준을 $Si > 7.25$ 로 정하였다. 그런데 김포지역의 화강암내 각섬석의 경우 Si 값이 모두 7.25 미만이므로 2차 산물의 결과라기 보다 화성암 결정 당시 존재하던 것으로 보인다. 그러나 결정화 작용이 종결된 후 냉각 단계에서 각섬석이 변질될 수 있으므로 각섬석 지질압력계에 의한 값이 반드시 화강암의 고결압력이라 할 수는 없다 (Blundy, Holland, 1990).

그리고 Blundy, Holland (1990)는 사장석과 공존하는 각섬석의 Al (iv) 함량에 기초하여 지질온도계를 제시하였다. 이를 이용 계산된 압력과 온도는 Table 2와 같다.

계산된 김포지역 화강암의 압력 범위는 4.8~5.4 kbar이며 온도는 786~823°C이다. Johnson, Rutherford (1989)의 압력계를 이용하여 계산된 쥬라기 대보화강암의 생성 압력과 온도는 각각 2.5~6.3 kbar과 700~790°C이며 백악기 불국사 화강암의 생성압력과 온도는 각각 2~4.2 kbar과 680~770°C로 보고되어 있다 (Lee *et al.*, 1994). 기타 국내의 연구자들에 의해 대보화강암류와 불국사화강암류의 압력 추정이 시도되었다. 조등룡 (1992),

Table 1. Electron microprobe analyses and structural formulae for amphibole in the granites from the Incheon district.

Sample No.	I-O2-1	I-O2-2	I-O2-3	I-O3-1	
SiO ₂	41.488	41.481	41.432	41.972	43.139
Al ₂ O ₃	10.733	11.602	11.291	11.872	10.727
TiO ₂	2.858	2.999	3.542	3.469	3.737
Cr ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FeO	19.782	17.178	18.184	13.596	13.253
MgO	7.995	9.489	9.268	11.724	12.147
MnO	0.313	0.433	0.350	0.443	0.000
K ₂ O	2.303	2.216	2.320	2.468	2.511
Na ₂ O	0.999	0.950	1.051	0.872	0.755
CaO	10.586	10.874	10.814	11.672	11.229
Total	97.057	97.222	98.252	98.088	97.498
Number of ions on the basis of O=23					
Si	6.401	6.301	6.266	6.245	6.435
Al(iv)	1.599	1.699	1.734	1.755	1.565
Al(vi)	0.355	0.380	0.281	0.330	0.323
Ti	0.332	0.343	0.403	0.388	0.419
Fe ⁽⁺³⁾	-0.038	0.043	0.029	-0.080	-0.248
Mg	1.838	2.148	2.089	2.600	2.700
Fe ⁽⁺²⁾	2.590	2.139	2.271	1.772	1.902
Mn	0.041	0.056	0.045	0.056	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ⁽⁺²⁾ _(M4)	0.117	0.108	0.116	0.065	0.096
Ca	1.750	1.770	1.752	1.861	1.795
Na _(M4)	0.133	0.123	0.132	0.074	0.109
Na(A)	0.556	0.530	0.548	0.638	0.617
K	0.197	0.184	0.203	0.165	0.144
Mg/(Mg+Fe+Mn)	0.415	0.490	0.471	0.598	0.620
Fe ²⁺ /Fe ²⁺ +Mg	0.585	0.499	0.521	0.405	0.413
Mg/Mg+Fe ²⁺	0.415	0.501	0.479	0.595	0.587
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.015	0.020	0.013	0.045	0.131

Table 2. Calculated pressure and temperature of emplacement of the granite plutons from the Kimpo district based on the amphibole geobarometer and plagioclase-amphibole geothermometer by Johnson, Rutherford (1989) and Blundy, Holland (1990), respectively.

것으로 사료된다.

유체 포유물 연구

분석방법

유체포유물 연구를 위해 부평, 인천 및 김포지역의 화강암 시료 13개를 선정하여 화강암내 석영에 포획된 유체포유물의 균일화 온도와 염농도를 측정하였다. 측정은 Fluid Inc. adapted U.S.G.S. gas-flow heating/freezing stage를 이용하였다. 균일화 온도 (Th, homogenization temperature)와 냉각온도 (Tm, final ice melting temperature)의 측정오차는 각각 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ 와 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이다. 포유물의 염농도는 Tm을 측정하여 실험식 (Potter *et al.*, 1978, Potter, Clyne, 1978)으로 계산하였다.

유체 포유물의 분류 및 균일화 온도와 염농도 측정결과

Sample No.	Al(t)	X _{Ab}	P(kbar)	T($^{\circ}\text{C}$)
I-02-1	1.599	0.652	4.8	797
I-02-2	1.699	0.652	5.3	811
	1.734	0.652	5.1	823
I-0203	1.755	0.652	5.4	823
I-03-1	1.565	0.680	4.5	786
	1.694	0.680	5.0	805

Al(t); total aluminum content of the amphibole.

X_{Ab}; mole fraction of albite in the plagioclase.

조동룡과 권성택 (1994)의 각섬석 지질압력계에 의해 대보화강암류는 2.8~7.9 kbar로 불국사화강암류는 3.0 kbar미만의 저압으로 추정되었다. 김포지역 화강암은 대보화강암의 관입심도에 해당하는 깊은 심도에서 생성되었고 저반의 저면 부분이 현재 소규모로 노출되어 있는

유체포유물 연구는 광물의 형성 온도, 열수변질 온도 및 암석 형성의 온도 및 압력을 추정하는 지질온도계·지질압력계로서 사용된다. 그리고 마그마의 화학적 특성, 열수 유체의 특성과 진화 경로를 밝히는데도 이용되고 있다.

유체포유물은 실온에서의 형태와 상태에 따라 기상의 비율이 50%미만인 I형 (liquid-rich inclusion), 기상이 전체 부피의 50% 이상을 차지하는 II형 (vapor-rich inclusion), 액상과 기상 외에 암염 또는 기타 딸광물을 포함하고 있는 포유물 중 딸광물의 비율이 50%미만인 III형 (multi-phase solid inclusion), 딸광물의 비율이 50%이상인 IV형 (multi-solid inclusion)으로 구분하였다 (Fig. 2).

포유물의 형태는 타원형에 가까운 것이 많으나 부정형도 다수 관찰된다. 크기는 5 μm 미만에서 55 μm 까지 다양하며 대부분 7 μm ~15 μm 에 속한다.

포유물의 냉각 실험시 측정가능한 공융점 온도 (first ice melting temperature)는 -56°C~-21°C이다. 암염딸광

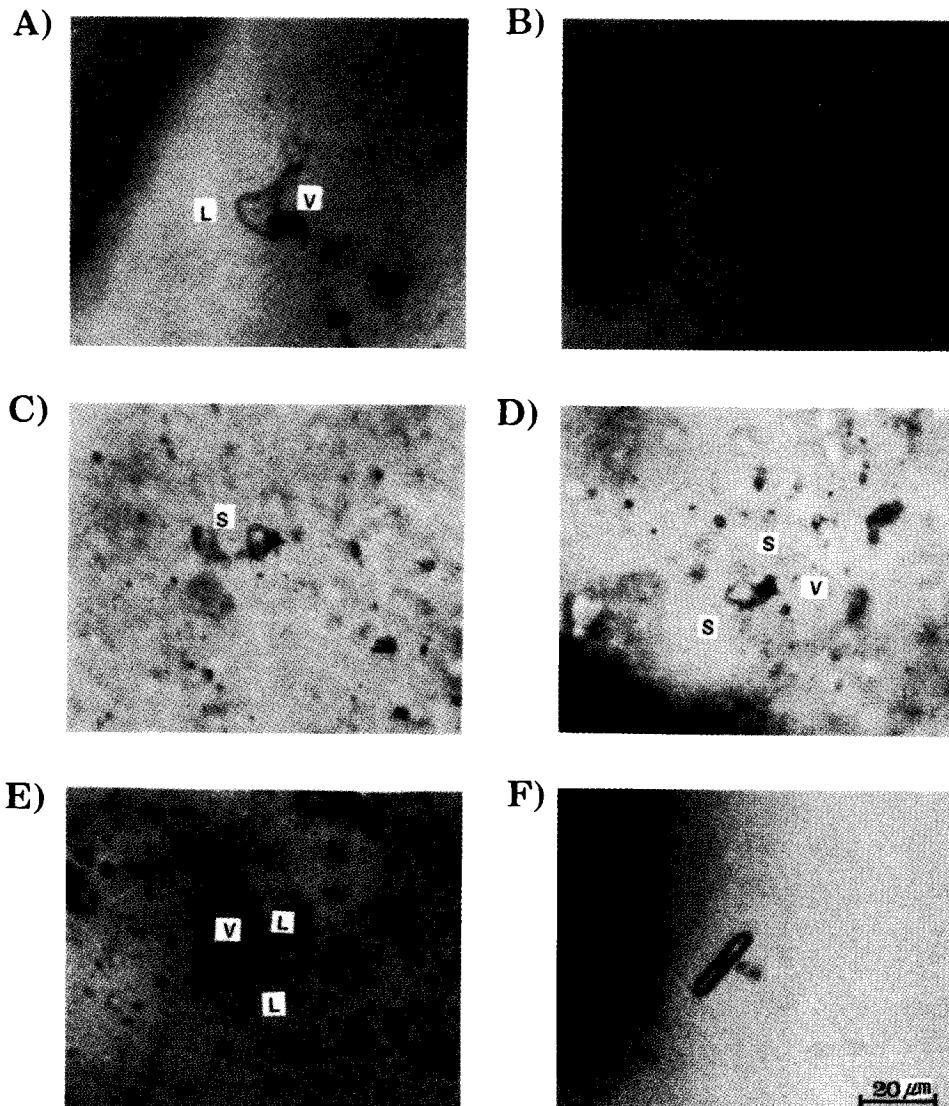


Fig. 2. Various types of fluid inclusion for the granites from the Bupeong, Incheon and Kimpo areas. A) Type I; liquid-rich two phase inclusion, B) Type II; vapour-rich two phase inclusion, C) Type III; solid bearing inclusion, D) Type IV; multi solid bearing inclusion, E) immiscible inclusion and F) tabular shape inclusion.

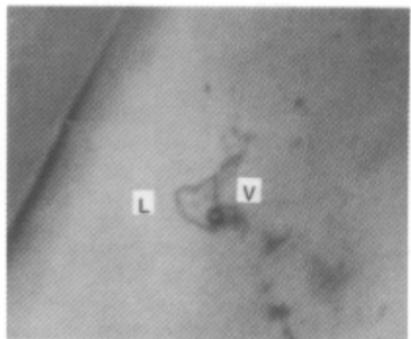
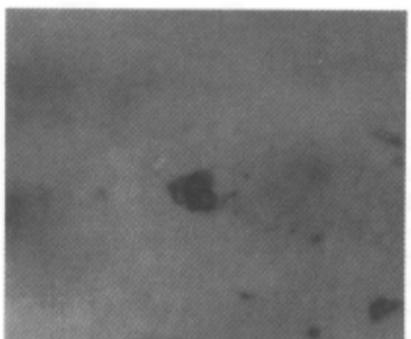
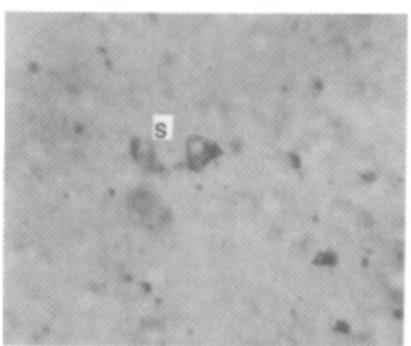
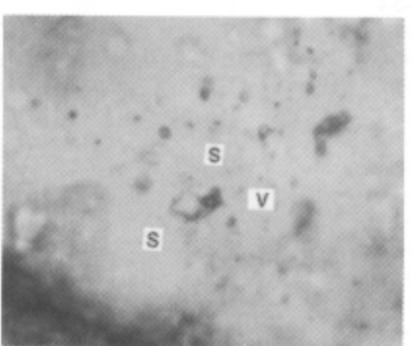
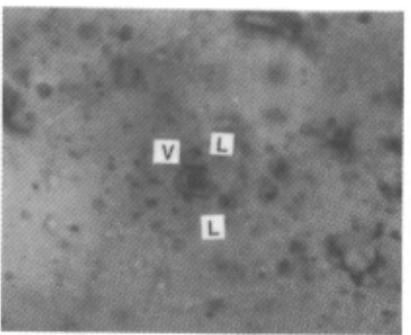
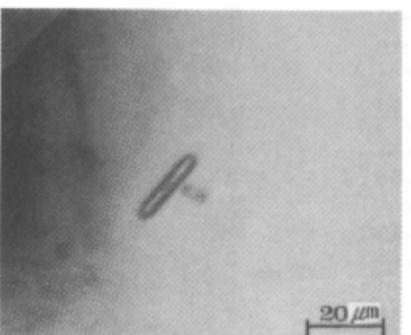
A)**B)****C)****D)****E)****F)**

Table 3. Fluid inclusion data for quartz in granites from the Bupyeong, Incheon and Kimpo areas

Sample No.	Type	Degree of fill	size (μm)	Tm ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (NaCl equiv. wt.%)	Th (Ts*) ($^{\circ}\text{C}$)
S-1-1a	I	0.65	10	-1.0	1.8	331.8
S-1-1b	I	0.75	10	-2.4	4.0	290.8
S-1-2	III	0.4	11	-18.3	21.0	267 (>500)
S-1-3	III	0.85	13	-18.0	20.9	166.5 (270)
S-1-4b	III	0.3	15	-20.4	22.5	121 (>500)
S-1-6	IV	0.7	10	-21.0	23.32	270 (447)
S-1-7	III	0.85	20	-26.0	26.8	200 (389.4)
S-2-1	I	0.85	12.5	-19.7	21.85	242.4 (412.5)
S-2-2	III	0.85	20	-13.1	17.1	126 (203.1)
S-2-3b	II	0.5	15	5.4		324.1
S-2-4	III	0.75	14	-21.0	23.32	120 (270.2)
S-2-5	III	0.55	13	-31.3	30.5	174.2 (443)
B-29-1-1	I	0.5	8	-3.3	5.35	256.3
B-29-1-2	I	0.75	10	-7.6	11.2	243
B-29-1-3	III	0.75	32	-18.0	20.9	198 (316.2)
B-29-1-4	I	0.75	18	-6.6	10.0	170
B-29-1-5	I	0.65	17.5	-6.6	10.0	275.7
B-29-1-6	I	0.5	8	-4.0	6.4	260.1
DS-1-2	I	0.7	7	-10.8	14.8	521.7
DS-1-3	III	0.25	13	-5.6	8.7	417 (580)
DS-1-4	I	0.7		-8.1	11.8	522.1
DS-2-1	I	0.75	12.5	-5.2	8.1	284.9
DS-2-2	I	0.8	10	-4.4	7.0	272.5
DS-2-3	II	0.2	21	-7.4	11.0	405.4
DS-2-4	I	0.8	11	-4.0	6.4	304.5
DS-2-5	III	0.5	20	-26.7	27.0	>500 (350)
DS-2-6	III	0.6	20	-25.0	26.1	245 (460.5)
DS-3-1	I	0.8	20	-10.5	14.5	291.3
DS-3-2	I	0.5	19	-10.0	14.0	211
DS-3-3	II	0.3	15	-9.0	12.9	480
DS-3-4a	III	0.5	9	-21.0	23.32	292.8 (513.5)
DS-3-4b	III	0.35	25	-18.6	21.2	300.2 (>500)
DS-3-5	I	0.65	10	-10.0	14.0	287.8
DS-3-6	I	0.80	10.5	-11.3	15.3	214.8
DS-3-7	I	0.75	10	-10.8	14.8	171.3
DS-4-1	I	0.7	11	-13.7	17.7	242.5
DS-4-2	III	0.3	11	-21	23.32	(468.2)
DS-4-3	IV	0.3	8.8	-22.0	24.0	(453.2)
DS-4-4	I	0.85	13	-4.2	9.7	125.2
DS-4-5	III	0.55	12.5	-24.4	25.6	(514.6)
DS-4-6	I	0.9	13.2	-9.5	13.5	200.2
DS-7-1	II	0.5	12	9.3		207.9
DS-7-2	I	0.6	12.5	8.7		199
DS-7-3	II	0.5	13	9.5		177.3
DS-7-4	I	0.6	8	8.5		282.2
DS-7-6	II	0.4	5.5	11.2		236.8
DS-8-1-1	IV	0.1	17	4.6		315 (500)
DS-8-1-2	III	0.5	15	5.8		318 (>500)
DS-8-1-3	II	0.35	15	5.6		245
DS-8-1-4	II	0.35	9.5	7.3		327
DS-8-1-5	II	0.5	6.5	-1.3	2.2	264.9
DS-8-1-6	II	0.45	6.2	6.3		283.7
DS-8-2-1	IV	0.15	23	-14.4	18.3	248.7 (327.6)
DS-8-2-2	III	0.65	13.8	-6.4	9.7	251.5 (478.3)
DS-8-2-3	III	0.55	21	-8.4	12.1	266.9 (478.3)

Table 3. Continued.

Sample No.	Type	Degree of fill	size (μm)	Tm ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (NaCl eq. wt.%)	Th (Ts*) ($^{\circ}\text{C}$)
DS-8-2-4a	I	0.45	14	5.2±2		309
DS-8-2-4b	II	0.25	6	5.7±2		440.8
DS-8-2-5	I	0.55	13	-5.4	8.3	219.2 (366.5)
DS-9-1	II	0.4	11.5	-0.5	0.9	360
DS-9-2	II	0.5	15	0.0	0.0	374.9
DS-9-3	I	0.7	10	-0.2	0.4	254.5
DS-9-4	I	0.7	11.5	-1.3	2.2	225.8
DS-9-5	I	0.75	55	-1.0	1.8	287.2
DS-9-6	III	0.6	15			269.2 (288.6)
I-02-1	I	0.7	6.5	17.4	20.5	>500
I-02-2	III	0.6	20	-33.4	32.3	>500 (334)
I-03-1	I	0.6	7	6.0 (-20.6)	9.2	>500
I-03-2	I	0.75	7	-2.6 (-45.2)	4.4	>500
I-03-3	I	0.5	7	-4.09 (-34)	6.4	>500

*Ts; Homogenization temperature for solid daughter mineral bearing fluid inclusion

물 함유 포유물의 공용온도는 -21.2°C 내외이므로 위의 측정결과는 포유물내의 유체가 단순히 NaCl 성분 뿐만 아니라 K-Ca-Mg-Fe-Cl 계열의 복잡한 성분을 함유하고 있기 때문인 것으로 보인다. 인천지역 화강암의 시료 중 Tm > 0°C인 포유물이 많이 관찰이 되었는데 이것은 metastable superheated ice의 용해 (Roedder, 1984) 때문인 것으로 보인다.

가열 실험에서 I형은 대체로 액상으로, II형은 대체로 기상으로 균일화되나 각각 그 반대의 경우도 관찰되었다. III형, IV형은 고체 딸광물이 용해됨으로써 균일화되었고 이때의 온도를 측정하였다. 이 지역 화강암류의 석영내의 유체포유물의 염농도와 균일화온도의 측정결과는 Table 3과 같다.

측정대상 시료는 환상 화산암체 내·외부에 분포하는 화강암과 인천지역과 김포지역의 화강암이다. 화강암류중 석영내 모든 유형 (I~IV형)의 유체포유물의 균일화 온도는 121~514°C 범위를 나타내며 고체상 포유물을 함유하는 III형과 IV형의 유체포유물의 균일화 온도는 대체로 400~500°C내외의 온도를 나타낸다. 그리고 NaCl 상당염농도는 I형, II형 포유물은 주로 20 wt% 미만이나 III, IV형 포유물은 20~30 wt% 내외이다. 환상구조의 화산암체 외부와 내부 그리고 인천지역 화강암의 유체포유물의 특성 사이에는 차이가 나타나지 않으나 (Fig. 3) 김포지역의 화강암의 유체포유물과는 차이가 있다. 측정 결과를 요약하면 Table 4와 같다.

Table 4에서와 같이 고체가 용해되면서 균일화되는 III형, IV형의 포유물의 균일화 온도가 I형, II형포유물에

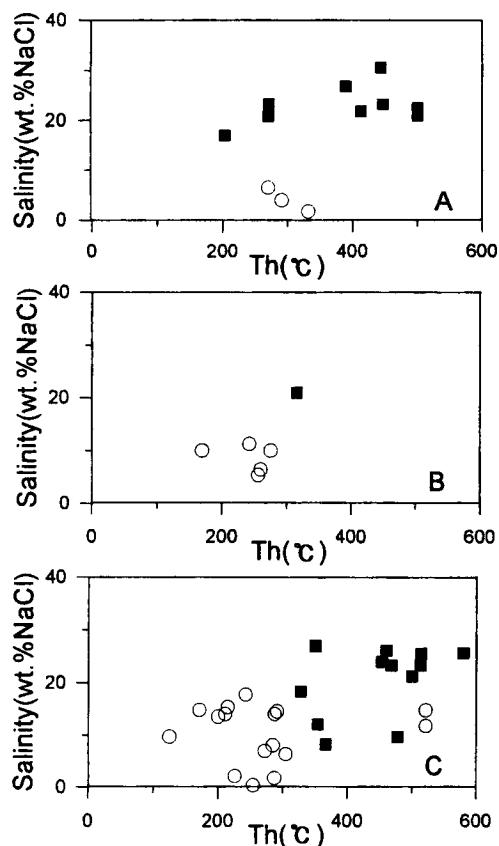


Fig. 3. Homozenization temperature vs. salinity (expressed as equivalent wt. % NaCl) for liquid-rich (circle) and solid bearing (square) inclusions. A; outer granites of the circula volcanic body, B; inner granites of the volcanic body and C; Incheon granites.

Table 4. Summary of the homogenization temperature and salinity data for the granitic rocks from both side of the circulated rhyolitic belt

Location	Type of inclusion	Tm (°C)	Salinity (NaCl equiv. wt.%)	Th (°C)
Bupyeong (outside)	I	-4.1~1.0	6.6~1.8	291~332
	III	-31.3~13.1	30.5~17.1	270~>500
Bupyeong (inside)	I	-7.6~3.3	11.2~5.4	170~276
	III	-18.0	20.9	316
Incheon	I	-13.7~0.2	17.7~0.4	125~522
	II	-9.0~0	12.9~0.0	237~480
	III	-26.7~18.6	27.0~21.2	289~580
	IV	-25.4~22.0	26.4~24	328~453
Kimpo	I	-6.8~2.6	9.2~4.4	>>500
	III	-33.4	32.3	>>500

비해 상당히 높음을 알 수 있다. L+V 형 포유물에서도 I 형 포유물에 비해 II형포유물의 균일화 온도가 높다. 종합하여 보면 딸광물 함유 포유물이 균일화 온도가 가장 높고 I형보다는 II형이 더 높게 나타나며 같은 유형에서도 기상으로 균일화되는 포유물이 균일화 온도가 더 높게 나타난다. 동일한 유형의 유체포유물의 균일화 온도를 비교할 때 인천지역 화강암과 환상구조 외부의 화강암이 환상구조 내부의 화강암에 비해 온도가 다소 높다. 부평 지역 화강암류중의 석영의 III, IV형 유체포유물의 균일화 온도는 동위원소 지질온도계에서 얻어진 온도와도 유사하여 화강암질 마그마의 고결 심도가 깊지 않은 것으로 해석된다. 이는 서규식 (1985)의 연구에서 이 지역 화강암이 비교적 관입심도가 얕은 것으로 해석한 결과와도 일치한다. 그러나 김포지역 화강암내의 유체포유물의 균일화 온도는 500°C 이상이어서 사용되었던 Heating stage로는 측정이 불가능하였다. 그리고 앞에서 기술한 사장석-각섬석 지질온도계에 의해 786~823°C으로 높은 온도가 얻어졌다.

이같은 온도는 남한의 중생대 화강암류의 대보화강암류 (372~539°C)와 불국사화강암류 (337~556°C)의 균일화 온도 (박성숙, 1995)와 Kim *et al.* (1992)의 산소 동위원소 지질온도계에 의해 얻어진 대보화강암의 형성온도 (500~630°C)와 불국사 화강암의 온도 (520~660°C)보다 훨씬 높다.

III, IV형 유체포유물은 마그마 단계에서 형성된 것으로 서 암염의 용해도 평형곡선상이나 곡선 가까이 도시되며, 용해도 평형곡선에서 떨어져 도시되는 염농도가 상대적으로 낮은 포유물은 후기 열수변질 단계에 포획된 것으로 해석하였다 (김규한 등, 1996). 본 연구 지역의 화강암에서도 암염딸광물 함유 III, IV형 포유물과 I, II형 포유물 사이에 구분이 명확하다 (Fig. 4). 그러나 III, IV형 포유

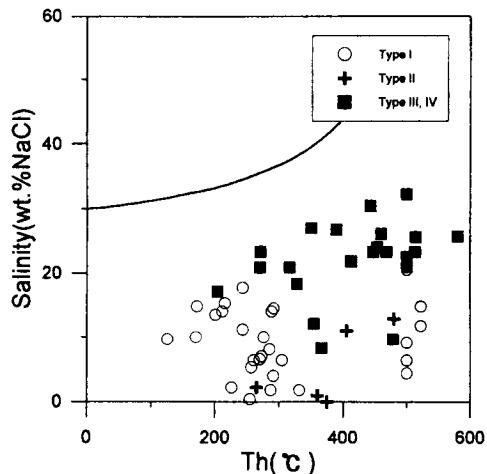


Fig. 4. Homogenization temperature vs. salinity for Type I, II, III and IV inclusions in the granites of the Bupyeong area. The solid line is the solubility curve of NaCl.

물의 측정값도 암염 포화도 평형곡선에서 다소 떨어져 도시된다. 이는 후기 열수 변질 단계로 감에 따라 순환수의 유입이 더욱 증가한 것으로 해석된다.

칼데라 가장자리에서 형성된 부평 온광상의 모암이 규화작용과 같은 모암변질작용을 심하게 받고 있다. 이같은 광화대의 유문암질암의 변질작용 역시 순환수 유입과 관련된 후마그마 열수변질작용과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다.

전암중의 가스성분 연구

분석방법

전암중의 가스 추출 및 분석은 피스톤형 파쇄방법

(Andrawes, Gibson, 1979; Welhan, 1988)과 유사하게 제작된 나고야대학 지구행성과학과의 실험실에 설치된 추출장치와 분석장치를 이용하였다.

3 mm정도 크기의 시료 5 g을 피스톤 장치에 넣은 후 알곤 가스로 장치 내부를 정제한 후 100 kg/cm²정도 압축 후 추출된 가스를 TCD가스크로마토그래피에서 H₂를 분석하고 FID-가스크로마토그래피에서 CH₄, CO, CO₂를 분석하였다. 정량된 가스의 양은 시료의 표면적당 가스의 양 (ml/cm²)으로서 반정량적인 값이다.

분석결과

부평지역 화강암류와 유문암 전암종의 가스성분 측정 결과는 Table 5와 같다.

유문암질암에 대한 CH₄/CO₂비는 0.004~0.005로 CO₂가 상대적으로 우세하게 검출되며 김포지역 화강암 (시료 번호 I-O2, I-O3)과 인천 송도지역 화강암 (DS-1~6)을 제외한 모든 화강암류 또한 CO₂가 우세한 유형이다. 한편 인천 송도지역 백악기 편상 화강암의 CH₄/CO₂비는 0.15으로 CH₄ 함량이 상대적으로 높다. 송도지역 등립질 화강암류 역시 CH₄/CO₂ 비가 0.01~0.29로 CH₄ 함량이 높다. 이 지역의 페그마타이트질 화강암의 CH₄/CO₂비는 1.24로 대단히 CH₄의 함량이 높은 특징을 나타내고 있다. 그리고 기반암인 선캠브리아시대의 흑운모 편마암은 CH₄ 함량 (CH₄/CO₂=10.9)이 대단히 높다. 김포지역 쥬

라기 각섬석- 흑운모 화강암은 CH₄/CO₂ 비가 0.14~0.27로 CH₄ 함량이 상대적으로 높으나 CO₂의 절대 함량이 기타 암석에 비하여 대단히 낮다.

김규한 등 (1996)에 의하면 한반도의 쥬라기의 화강암류의 CH₄/CO₂ 비는 0.1~67로서 변화의 폭이 큰 반면 경상 퇴적분지 내의 백악기 화강암류는 CH₄/CO₂ 비가 0.1 내외로 균일한 특징을 가진다. 부평, 김포, 인천지역 쥬라기 화강암류의 CH₄/CO₂ 비는 김규한 등 (1996)이 보고한 한반도 쥬라기 대보 화강암류의 CH₄/CO₂ 비의 특성에 유사하다. CH₄, CO₂, CO 가스와 같은 C 함유 가스의 산화-환원 상태는 마그마방에서의 산소분압에 의해 영향을 받는다 (Arculus, Delano, 1981; Sugisaki *et al.*, 1995). 티탄철석계 화강암형과 자철석계 화강암형 역시 마그마의 진화시 fO₂의 영향을 받는다 (Ishihara *et al.*, 1981). 산화 또는 환원형의 화강암의 성인은 마그마내의 SO₂ 함량과 밀접한 관련이 있으며 SO₂ 함량이 250 ppm 이하이면 티탄철석계 화강암이 형성되고 SO₂ 함량이 250~1700 ppm일경우 휘석류와 같은 규산염광물내의 철을 산화시켜 자철석계 화강암이 형성된다 (Tetsuichi, Tsukimura, 1997). 자철석계 화강암의 산화작용은 함수 마그마내의 물의 용해 (dissolution)에 의한 것이고 티탄철석계 화강암의 환원작용은 퇴적기원의 환원성 탄소에 기인한다 (Sugisaki *et al.*, 1995).

부평지역 쥬라기 화강암류는 대체로 티탄철석계 화강암류로 보고되어 있다 (조득룡, 권성택, 1994). H₂-CO₂-

Table 5. Gas compositions of the granitic rocks from the Bupyeong silver mine area, South Korea

Sample No.	Description	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂	CH ₄ /CO ₂
B29	Pink feldspar granite (M)	3.79	0.05	1.43	126.1	0.011
B29-1	Pink feldspar granite (M)	4.08	0	1.23	99.6	0.012
I-02	Hornblende-biotite granite (F)	3.33	0	0.23	1.68	0.137
I-03	Hornblende-biotite granite (F)	2.59	0	0.45	1.67	0.269
S-1	Pink feldspar granite (M)	4.97	0.66	0.86	375.1	0.002
S-2	Pink feldspar granite (M)	2.24	0.29	0.99	305.5	0.003
S-3	Pink feldspar granite (M)	5.64	0.49	3.29	718.8	0.005
S-4	Pink feldspar granite (M)	1.37	0.5	0.72	645	0.001
DS-1	Biotite granite (F)	0.93	0	0.45	1.55	0.29
DS-2	Leucocratic granite (C)	0.56	0	3.31	26.76	0.124
DS-3	Foliated granite (C)	1.29	0	1.03	6.77	0.152
DS-4	Pegmatitic granite	1.47	0	20.39	16.51	1.235
DS-6	Biotite granite (F)	2.67	0	0.38	4.99	0.076
DS8-1	Diorite (F)	2.87	0	0.45	46.73	0.01
DS8-2	Pink feldspar granite (M)	0.55	0	0.51	438	0.001
DS-9	Biotite granite (F)	1.15	0	0.35	0.81	0.432
I-1	Grey rhyolite	1.59	0	0.5	121.7	0.004
I-3	Purplish rhyolite	1.58	0	0.42	98.5	0.004
I-4	Brownish rhyolite	1.08	0	0.48	101.3	0.005
I-01	Biotite gneiss	3.47	0	35.92	3.3	10.885

Unit: 10 mL/cm², abbreviations: C; coarse grained, M; medium grained, F; fine grained

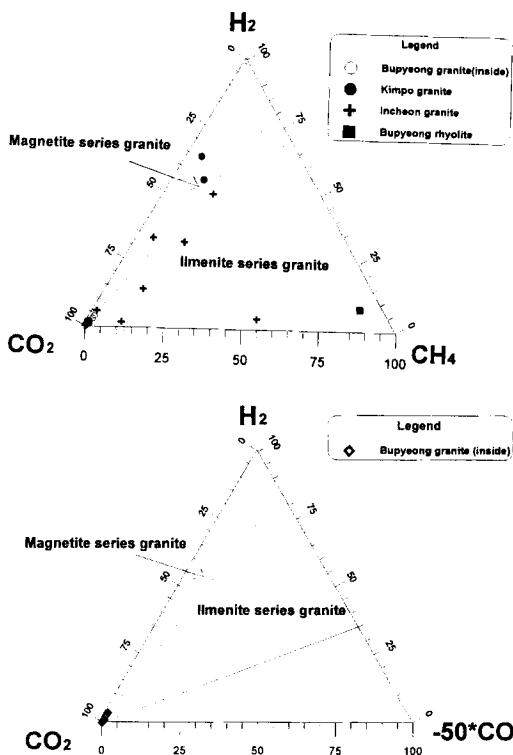


Fig. 5. H_2 - CO_2 - CH_4 plots and H_2 - CO_2 - CO plots for granitic rocks from the Bupyeong silver mine area. Open circle; Bupyeong granite (inside), closed circle; Kimpo granite, cross mark; Incheon granite and triangular; Bupyeong rhyolite. Divided line between magnetite series and ilmenite series after Sugisaki *et al.* (1995).

CH_4 에서 부평지역과 인천 송도지역의 화강암류는 티탄 철석계 화강암의 가스 특성을 나타내고 있다 (Fig. 4). 그러나 김포지역 화강암은 CH_4/CO_2 의 비 (0.14-0.27)는 크지만, Fig. 5에서 자철석계 화강암의 특징을 나타내고 있다. 조사지역 쥬라기 화강암류들의 CH_4 가 우세한 특징은 하부지각의 환원성 변성퇴적암물질 (CH_4 우세형)의 부분 용융 산물임을 암시하고 있다.

송도지역 백악기 화강암류내에 CH_4/CO_2 비가 높은 것은 백악기의 지질시대 규제보다는 화강암질 마그마의 기원물질에 의해 지배되고 있음을 알 수 있다. 즉, C 함유 퇴적 변성암의 부분 용융 산물로 해석된다. 김포지역 세립질 각섬석-혹운모화강암의 사장석과 공존하는 각섬석 지질온도계 (Blundy, Holland, 1990)에 의한 형성온도 790~820°C와 지질압력계 (Johnson, Rutherford, 1989)를 이용하여 계산된 4.5~5.4 kbar와 CH_4/CO_2 비를 이용하여 이 화강암 형성시의 산소 분압을 구해보면 $fO_2=-16.5$ 내외로 높은 산소 분압 환경을 나타내고 있다 (Fig. 5).

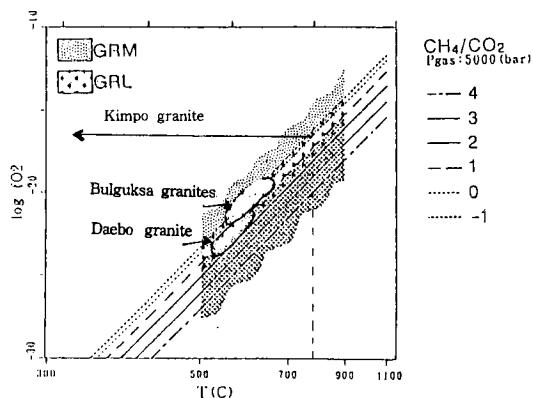


Fig. 6. T - fO_2 diagram based on CH_4/CO_2 ratio in the granitic rocks at 5 kbar (Sugisaki *et al.*, 1995). GRM; magnetite series granite, GRL; ilmenite series granite. Oxygen fugacity of the Bulguksa and Daebo granites (Kim *et al.*, 1996). Oxygen fugacity of the granitic magma of the Kimpo granite is estimated to be -16.5.

결 론

부평 지역의 화강암류와 유문암질암에 대하여 전암중의 가스성분 분석과 유체포유물 연구 등을 통하여 이들 암석의 가스 지구화학 특성과 후마그마 열수작용의 특징을 검토하였다.

유체포유물 연구결과, 화강암 내의 석영 중의 고체상의 딸광물을 함유한 III형, IV형 유체포유물의 균일화 온도와 $NaCl$ 상당 염농도는 각각 화산암체 내부 부평 화강암 316°C, 20.9 wt%, 거마산지역 화강암 270~500°C, 17.1~30.5 wt%, 김포지역 화강암 >500°C, 32.3 wt%, 송도지역 화강암 289~580°C, 21.2~27 wt.%이다. 이들의 I형 및 II형 포유물의 온도와 $NaCl$ 상당 염농도는 대체로 130~480°C와 0.4~17.7 wt.%로 III, IV형 포유물에서 얻어진 값 (400~500°C, 20~30 wt%)보다 현저히 낮다. I, II형 포유물은 후기 열수변질 단계에 포획되었으며 III, IV형 포유물은 후기 열수변질 유체가 크게 영향을 준 것으로 해석된다.

전암중의 가스성분은 CO_2 성분비가 높은 유문암질암과 환상화산암체 내부의 화강암류 ($CH_4/CO_2=0.004\sim0.005$)와 CH_4 성분이 높은 환상 화산암체 외부의 송도지역 화강암 ($CH_4/CO_2=0.01\sim0.29$)으로 대분된다. 이 지역의 화강암류의 가스 조성의 특징에 의하면 티탄철석계 화강암류에 해당된다. 그러나 김포지역 각섬석 화강암은 자철석계 화강암의 특징을 나타내고 있다.

유체포유물과 전암의 가스 조성의 특성은 이 지역의 화성암류들이 후마그마 열수변질작용을 심하게 받았으며

마그마 단계에서 열수변질 단계로 감에 따라 순환수 유입이 증가한 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 전략광물자원연구센터의 연구비에 의해 수행되었다. 교육부기초과학육성연구비 (BSRI-97-2427)의 부분자원에 감사하며, 전암가스 분석시 협조하여준 일본 나고야대학 지구화학연구실 三村耕一 박사와 村山正樹씨에게 사의를 표한다. 그리고 논문 심사위원의 유익한 수정내용 지적에 감사한다. 원고 정리를 도와준 이화여자대학교 교육대학원생 정해란, 이지민, 김진남양에게도 고마움을 전한다.

참고문헌

- 김규한, 박성숙, Sugisaki, R. (1996) 남한의 중생대 화강암 중의 가스성분과 유체포유물 연구. 자원환경지질, 29권, p. 455-470.
- 김규한, 박성숙, 나춘기 (1994) 남한의 중생대 화강암류의 Nd, Sr동위원소 및 유체포유물 연구. 제 49차 대한지질학회 학술발표회.
- 박노영, 정경식 (1968) 부평 은·연광상의 지질 및 광상: 지질광상조사 연구보고. 제 10호, p. 5-32.
- 박성숙 (1995) 남한의 중생대 화강암류의 나오디미움·스트론튬 동위원소 및 유체포유물 연구. 이화여자대학교 대학원 석사학위 논문.
- 서규식 (1985) 부평 은광상의 성인에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
- 서규식, 박희인 (1986) 부평지역의 중생대 화성암류. 광산지질, 19권, p. 179-192.
- 신명식 (1970) 부평 은·연 광산의 지질과 광상. 광산지질, 3권, p. 177-186.
- 양경희, 김정진 (1993) 경상분지 남동부에 분포하는 화강암류 내의 유체포유물 연구. 지질학회지, 29권, p. 551-565.
- 전효택, 전용원 (1973) 부평은·연 광산의 광화작용과 모암변질. 광산학회지, 10권, p. 72-82.
- 조동룡 (1992) 남한에 분포하는 현생 화강암류의 기원에 관한 광물 및 암석화학적 연구. 연세대학교 박사학위논문, 189p.
- 조동룡, 권성태 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석·지압계와 지각 두께의 진화. 지질학회지, 30권, p. 41-61.
- 최위찬, 김규봉, 윤우, 최성자 (1995a) 인천도록 설명서. 자원개발연구소.
- 최위찬, 김규봉, 윤우, 최성자 (1995b) 김포도록 설명서. 자원개발연구소.
- Andrewes, F.F. and Gibson, E.K. (1979) Release and analysis of gases from geological samples. Am. Min., v. 64, p. 453-463.
- Arculus R.J. and Delano, J.W. (1981) Intrinsic oxygen fugacity measurements: Techniques and results for spinels from upper mantle peridotites and megacryst assemblages. Geochim. Cosmochim. Acta., v. 45, p. 899-913.
- Blundy, J.D. and Holland, T.J.B. (1990) Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. Contr. Mineral. Petrol., v. 104, p. 208-224.
- Chivas, A.R. (1981) Geochemical evidence for magmatic fluids porphyry copper mineralization. Part 1. Mafic silicate from the Koloula igneous complex. Contr. Mineral. Petrol., v. 78, p. 389-430.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E. (1986) Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. Am. Min., v. 71, p. 1297-1313.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H. and Sisson, V.B. (1987) Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alcaline plutons. Am. Min., v. 72, p. 231-239.
- Ishihara, S., Lee, D.S. and Kim, S.Y. (1981) Comparative study of Mesozoic granitoids and related W-Mo mineralization in Southern Korea and Southwestern Japan. J. Res. U.S. Geol. Survey, v. 6, p. 701-705.
- Johnson, M.C. and Rutherford, M.J. (1989) Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. Geology, v. 17, p. 837-841.
- Kim, K.H., Satake, H. and Mizutani, Y. (1992) Oxygen isotopic compositions of Mesozoic granitic rocks in South Korea. Mining Geol., v. 42, p. 311-322.
- Laird, J. and Albee, A.K. (1981) High temperature metamorphism in mafic schist, Northern Vermont. Am. J. Sci., v. 321, 9. 97-126.
- Leake, B.E. (1978) Nomenclature of amphiboles. Am. Min., v. 63, p. 1023-1052.
- Lee, I.H., Tsusue, A. and Hori, T. (1994) Amphibole chemistry of Jurassic and Cretaceous granitic rocks in South Korea 1. Pressure and temperature of intrusions. Resource Geology, v. 44, p. 125-132.
- Papike, J.J., Cameron, K.L., Baldwin, K. (1974) Amphiboles and pyroxenes: Characterization of other than quadrilateral components and estimates of ferric iron from microprobe data. Geol. Soc. Am. Abs.
- Potter, R.W., Clyne, M.A. and Brown, O.L. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solution. Econ. Geol., v. 73, p. 284-285.
- Potter, R.W. and Clyne, M.A. (1978) Solubility of highly soluble salts in aqueous media. part 1, NaCl, KCl, CaCl₂, Na₂SO₄, and K₂SO₄ solubilities to 100°C. J. Res. U.S. Geol. Survey, v. 6, p. 701-705.
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusions. Rev. Mineral., v. 12, 644p.
- Sugisaki, R., Masami, A. and Nagamine, K. (1995) Distribution of carbon bearing gas species in plutonic rocks and their behaviors in igneous processes. Geochim. Cosmochim. Acta (submitted).
- Tetsuichi, T. and Tsukimura, K. (1997) Genesis of oxidized and reduced type granites, Econ. Geol., v. 92, p. 81-86.
- Welhan, J.A. (1988) Methane and hydrogen in mid-ocean ridge basalt glasses: analysis by vacuum crushing. Can. J. Earth. Sci., v. 25, p. 38-48.