

남한의 중생대 화강암중의 가스성분과 유체포유물 연구

김규한* · 박성숙* · 杉崎隆一 **

Gas Composition and Fluid Inclusion Studies of the Mesozoic Granitic Rocks in South Korea

Kyu Han Kim, Seong Sook Park and Sugisaki Ryuichi

ABSTRACT : Mesozoic granitic rocks in the Korean peninsula contain H₂, CH₄, CO and rare C₂H₆. The Jurassic Daebo granites mostly belonging to the ilmenite series are predominated in CH₄. Meanwhile, the magnetite series Bulguksa granites of Cretaceous age in the Kyongsang basin and Okchon zone are relatively enriched in CO₂. The older granites have a wide variation of CH₄/CO₂ ratios (0.1~1.0) compared to those of the younger ones (0.1~0.5). This characteristics of gas compositions suggest that the Jurassic granites are principally derived from the partial melting of metasedimentary rocks with much reducing materials in the lower continental crust. On the other hand, the mantle source granitic magmas might be responsible for the Cretaceous granites characterized by dominant and homogeneous CO₂ gas compositions. Liquid-vapor homogenization temperatures of quartz in the Jurassic and Cretaceous granites range from 108 to 539°C (av. 324°C) and 160 to 556°C (av. 358°C), respectively. Their salinities are between 0.2 and 16.3 wt.% NaCl for the Jurassic granites and 0.4, and 15.6 wt.% NaCl for the Cretaceous ones. Fluid inclusions with solid daughter minerals lying on or near the halite equilibrium curve represent inclusion fluids from the magmatic stage. The type I and II fluid inclusions which are plotted apart from the equilibrium curve are considered to trap in late hydrothermal alteration stage with a increasing influx of metedric water.

서 언

남한에는 선캄브리아기부터 제3기의 관입시기의 화강암질 암석이 넓게 분포하고 있으며 그중 중생대 화강암류(쥬라기~백악기)가 가장 우세하다. 중생대 화강암류는 대보화강암류(쥬라기~백악기 초)와 불국사화강암류(백악기 말~제3기 초)로 대분된다. 대보화강암류는 주로 한반도 중부에 지나 방향으로 분포하고 있다. 불국사화강암류는 주로 경상분지 내에 분포하며 성인적으로 밀접히 관련된 안산암질 화산암류가 시공간적으로 밀접하게 분포하고 있다.

이들 중생대 화강암류에 대한 암석지구화학적 연구

(Kim, 1975; Jin, 1981, 1985a, 1985b, 1986, 1988; 진명식, 1995; 이종익, 1994; 김규한, 1990, 1992; 조동룡, 1992; 조동룡, 권성택, 1994; Hong, 1985, 1987; Lee, 1991; Lee *et al.*, 1993; Lee, 1994; Lee *et al.*, 1995)와 산소안정동위원소 연구(Kim *et al.*, 1992) 등이 이루어진 바 있다. 이들 화강암류에 대한 Nd, Sr 동위원소 분석 연구도 수행된 바 있다(권성택, 1991; Kwon, Tilton, 1992; 김규한 등, 1994; 박성숙, 1995; Na, 1994; Kim *et al.*, 1996).

경상퇴적분지 동남부에 분포하는 백악기~제3기의 불국사화강암류 내에 존재하는 유체포유물 연구가 이루어졌다(양경희, 1993). 그러나 대보화강암류와 경상분지 밖의 불국사화강암류에 대한 유체포유물 연구는 아직 이루어진 바 없다. 지금까지 중생대 화강암질 암석에 대한 많은 연구에도 불구하고 이들 암석의 생성 환경과 암석성인 해석 등에는 많은 문제점이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 대보화강암류와 불국사화강암류에 대해 유체

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

** 일본 나고야대학 지구행성과학과 (Dept. of Earth and Planetary Sciences, Nagoya University, Chikusa Nagoya 460-01, Japan)

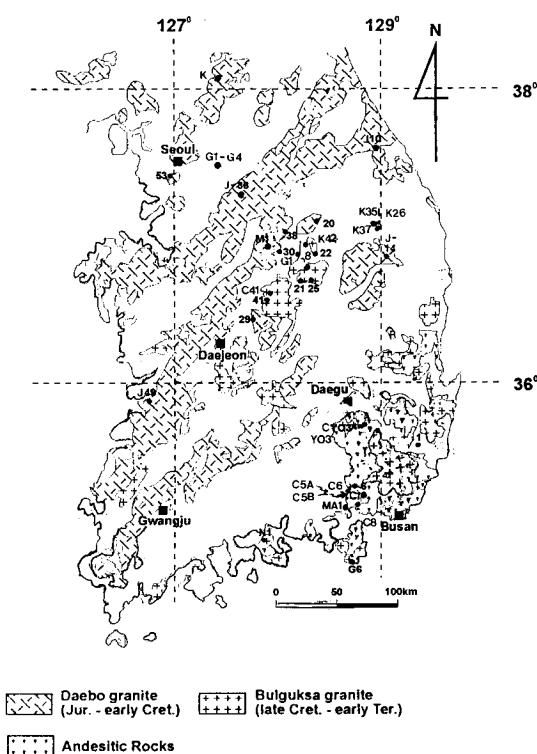


Fig. 1. Geologic map showing the sampling location of Daebo and Bulguksa granites.

포유물연구와 전암 중의 가스 성분 분석을 통하여 이들 암석의 생성 환경과 암석 성인을 해석하고자 한다.

본 연구를 위하여 남한 전역에 분포하는 대표적인 대보화강암 및 불국사화강암에 대해 총 40개의 암석 시료를 이용하였다 (Fig. 1). 암석 성인 해석시에 산소동위원소비와 비교 종합 검토하기 위하여 이용된 시료는 대다수 산소안정동위원소 분석과 Nd, Sr 동위원소 분석이 실시된 동일 시료 (Kim *et al.*, 1992)를 사용하였다. 전암 중의 가스 성분 분석은 일본 나고야대학 행성지구과학과에서 실시하였으며 유체포유물 연구는 이화여자대학교 지구과학 실험실에서 이루어졌다.

화강암류의 산출상태와 암석기재

쥬라기 대보화강암류는 주로 남한 중부 경기육괴, 영남 육괴, 옥천습곡대 지역에 폭 30~50 km의 지나방향인 NE-SW 방향으로 연속적으로 길게 대상으로 선캠브리아기의 변성암 및 고생대 퇴적암을 관입 분포하고 있다 (Fig. 1). 백악기 불국사화강암류는 주로 경상분지와 옥천

습곡대 내에서 타원 또는 불규칙한 형태인 저반 또는 암주 (stock)상으로 관입 분포하고 있다. 경상분지 내에서는 불국사화강암류와 밀접하게 안산암에서부터 유문암에 이르기까지의 안산암질 화산암류가 분포하고 있다 (Lee, 1972; Chang, 1975; Kim, Lee, 1983; Lee, 1987).

대보화강암류는 조립 등립질 조직을 보이며 주로 화강암, 화강섬록암으로 구성되어 있으며, 섬록암, 아다멜라이트류를 포함한다. 반면에 불국사화강암류는 아다멜라이트와 화강섬록암, 석영섬록암 등으로 구성되어 있다. 이들 화강암질 암석은 칼크알카리 계열의 안산암질 마그마 또는 화강섬록암질 마그마로부터 분별 결정되었음이 주원소 및 미량원소 지화학연구에 의해 밝혀졌다 (Jin *et al.*, 1981; Jin, 1981, 1985a, 1985b, 1986, 1988, 1995; Hong, 1987; Tsusue *et al.*, 1981, 1990; Lee *et al.*, 1995; 이종익, 1994; 조등룡, 권성택, 1994). 백악기 화강암의 암상의 특징은 세립질 반상 조직 혹은 미문상 조직이 보이며 마이아로리티크 구조 (miarolitic cavity)가 많이 발달함이 특징적이다. 경상분지의 불국사화강암류와 밀접하게 수반되는 안산암류의 지화학적 특징 및 성인 연구에서 이들은 동원 마그마 기원에서 유래된 것으로 해석한 바 있다 (김규한, 이진수, 1993).

대보화강암류

대보화강암류는 주로 흑운모화강암 (강릉, 이천, 산청, 아산, 관악산, 포천관인)이며 분홍색 장석화강암 (무극), 엽상화강암 (아산), 각섬석화강암 (현리) 등도 포함되어 있다. 옥천대의 송학, 황등, 금산, 보은, 충주, 음성지역의 화강암은 흑운모화강암이고, 영남육괴의 춘양화강암은 복운모화강암이다. 이들은 대부분 조립의 등립질 조직을 보이며 주요 구성 광물은 알칼리 장석, 사장석, 등립질 석영, 흑운모, 백운모 등으로 구성되어 있다. 대부분 괴상, 자형, 반자형의 입자의 형태를 보인다. 이들의 화강암의 사장석은 대개 반자형으로 산출되며 반정으로 산출되는 사장석은 포이킬리티크 (poikilitic) 조직을 보여준다. 사장석의 성분은 안데신 (andesine, $An_{20.1-42.0}$)이 우세하다 (박성숙, 1995). 부수 광물로는 석류석, 저어콘, 인회석 등이 산출되고, 이차 변질 광물로는 녹니석, 녹염석, 방해석 등이 존재한다.

불국사화강암류

경상분지 내의 불국사 화강암은 흑운모화강암, 각섬석화강암, 아다멜라이트, 섬록암, 화강반암, 각섬석-흑운모화강암, 분홍색 장석화강암 등이다. 경상분지 밖의 월악

산, 무암사, 속리산 화강암은 주로 분홍색 장석화강암이다. 불국사화강암류는 대체로 백운모가 나타나지 않는 것 이 특징적이다. 불국사화강암류는 석영 혹은 장석의 반경 (2~3.5 mm)이 관찰되는 세립질 및 중립질 반상 조직 혹은 미문상 조직을 보이며, 마이아로리티 구조 (miarolitic cavity)가 많이 발달됨이 특징적이다.

구성 광물로는 마이크로퍼사이드 (microperthite), 정장석, 각섬석, 사장석 등이다. 사장석의 성분은 $An_{5.39-51.04}$ 로 상당히 다양한 성분을 나타낸다 (박성숙, 1995). 사장석 반정 결정은 부분적으로 견운모로 변질되어 있다. 그리고 사장석은 직각의 윤곽을 가지는 누대구조를 보이기도 한다. 알카리 장석은 대부분 퍼사이트조직을 나타내며, 혹은모는 어두운 갈색을 나타내며 일부는 녹니석이나 녹염석으로 변질되어 있다. 각섬석은 연한 녹색~밝은 갈색을 띠며, 쌍정을 보이는 반자형~타형 입자 형태를 보인다. 석영입자 내에는 대보화강암에 비해 비교적 크기가 큰 유체포유물이 다양 존재한다. 혹은모화강암은 유색 광물의 함량이 비교적 적고 붉은색의 알카리 장석이 우세하므로 붉은 회색이나 붉은색을 나타낸다. 또한 백운모와 석류석이 전혀 관찰되지 않는다 (Hong, 1987; 조동룡, 1992). 부수 광물로는 저어콘, 인회석, 스펜, 자철석등이 존재하고 이차 변질 광물로는 녹니석, 녹염석, 방해석, 백운모 등을 포함하고 있다.

화강암질암 전암 중의 가스 성분

지구 심부 기원의 가스 기원 연구를 위하여 화산 가스 연구는 다수 수행되었으나 암석에서 직접 가스를 추출하여 마그마 기원 및 가스 성인을 연구한 보고는 지금까지 대단히 적다 (Eggler, 1978; Sugisaki *et al.*, 1995). 암석 중에 포함된 가스는 유체포유물, 광물입자경계, 광물의 깨진 틈 (mineral crack) 등에 주로 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 유체포유물의 연구와 함께 가스 성분 분석 연구를 실시하였다. 특히 본 연구에서는 우리나라 중생대 화강암류 중 산소안정동위원소 ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), Nd, Sr 동위원소 연구가 이미 수행된 동일한 화강암질암 시료에 대하여 화강암의 조암광물인 석영 내의 유체포유물 연구와 전암 시료에 대하여 직접 가스 추출 분석을 실시하여 화강암질 마그마의 기원과 산화환원 환경조건 및 화강암 내의 가스 성분의 특성 등을 연구하였다.

분석 시료 준비 및 분석 방법

쥬라기 대보화강암 (15개), 경상퇴적분지 내의 백악기

불국사 화강암 (9개), 경상퇴적분지 밖의 화강암 (11개), 선캠브리아기 화강암 (1개) 및 반려암 (4개) 총 40개 시료에 대하여 암석 내에 포함된 가스를 추출하기 위하여 피스톤형 파쇄 방법 (Andrawes, Gibson, 1979; Welhan, 1988)과 유사하게 제작된 가스 추출 장치를 이용하였다. 먼저 3 mm 정도 크기의 시료 5 g을 피스톤 내부에 넣고 Carrier gas로 아르곤 가스를 장치 내부에 1시간 정도 훌려보낸 후 100 kg/cm^2 압력으로 압축시켜 시료 중의 가스를 추출 직접 FID-가스 크로마토그래피로 연결하여 CO, CO_2 를 분석하고 TCD-가스 크로마토그래피에서 H_2 를 분석하였다. 추출 가스의 양은 시료의 표면적 (ml/cm^2)당 가스의 양으로 반정량적인 값이다. 따라서 가스의 함량의 해석은 절대값보다도 각 시료에서의 상대적인 함량 차이의 값으로 사용하였다.

화강암질암 전암 중의 가스 분석 결과

쥬라기 대보화강암, 경상분지 내의 백악기 불국사화강암, 경상분지 밖의 백악기 불국사화강암 및 기타의 시료에 대한 전암 중의 가스 분석 결과는 Table 1, 2, 3과 같다. 대부분 화강암 시료에서 CH_4 , CO_2 , H_2 가 산출되며 CO 와 C_2H_6 성분은 일부 시료에서만 산출된다. 화강암의 관입 시기, 유형, 분포지역에 따라 가스 성분의 차이가 나타난다.

쥬라기 대보화강암

대부분 혹은모 화강암 시료로서 대다수 티탄철석계 화강암 (ilmenite series granite)이며 제천 송학지역 화강암, 황동지역 화강암과 같이 일부 암체만이 자철석계 화강암 (magnetite series granite)으로 되어있다 (조동룡, 1992). 시료 중의 가스 성분 함량은 CH_4 가 $0 \sim 52 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$, CO_2 가 $0 \sim 379 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$, H_2 가 $2.6 \sim 14.0 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$ 이다. 일부 시료에서만 CO 가 검출되며 관악산 화강암에서만 C_2H_6 ($0.42 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$)가 포함되어 있다 (Table 1). CH_4 의 함량이 경상퇴적분지 내의 불국사화강암 ($0.05 \sim 4.8 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$)에서 보다 높은 특징을 나타낸다. 그러나 경상퇴적분지 밖의 불국사 화강암류 중의 CH_4 의 함량은 $0.07 \sim 39 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$ 로 쥬라기 대보화강암류에서와 유사한 특징을 나타낸다. 쥬라기 화강암류에서의 CO_2 의 함량은 $0 \sim 379 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$ 이다. 이 값은 경상퇴적분지 밖의 백악기 화강암류 ($0 \sim 420 \times 10^{-6} \text{ ml}/\text{cm}^2$)에서와 유사하다. CH_4/CO_2 비는 0.1~1.0로 변화폭이 크며 3개의 시료 (시료번호 36, 30, M-1)에서만 CH_4/CO_2 비가 의외로 크며 쥬라기 화강암은 일반적으로 CH_4 함량이

Table 1. Gas compositions of the Jurassic Daebo granites in South Korea (unit $\times 10^6 \text{ ml/cm}^3$).

Sample No.	Description	Age (m.y.)	Locality	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	CH ₄ /CO ₂	$\delta^{18}\text{O}_{\text{wt}}$	Remark
10	Biotite granite (M)	156	Kangneung	3.1	0	0.042	0	0.007	6	7.8	il
36	Biotite granite (M)	156	Echon	5.9	0	0.067	0	0	>67	10.0	il
49	Biotite granite (F)	158-167	Hwangdeung	2.6	0	0.025	0	0.16	0.2	8.8	mt
20	Biotite granite (F)	109-169	Songhak, Jaechon	5.4	0	0.058	0	0.15	0.4	9.5	mt
K	Biotite granite (M)		Kwanin	4.4	0.17	0.20	0	258	0.0	-	mt(?)
29	Biotite granite (M)	166	Boeun	14	0	0.50	0	0.50	1.0	9.4	il
30	Biotite granite (M)	112	Choongjoo	7.3	0.077	0.17	0	0	>17	7.1	il
53	Biotite granite (M)	228	Kwanakan, Seoul	9.4	0.46	33	0.42	379	0.1	8.7	il(?)
M-1	Pink feldspar granite(C)		Mugug	14	0	52	0	0	>52	6.2	il
38	Biotite granite (M)		Samcheok	8.5	0	2.7	0	0.70	3.9	8.7	il
J-36	Biotite granite (M)	156	Echon	7.5	0.082	0.11	0	0.67	0.2	7.8	il
J-10	Biotite granite (M)	156	Kangneung	6.2	0	0.13	0	0.19	0.7	10.0	il
J-14	Biotite granite (M)		Choonyang	6.5	0.12	0.74	0	3.8	0.2	9.2	il
J-49	Biotite granite (F)	158-167	Hwangdeung	3.3	0	0	0	0.86	>0.9	8.8	mt
21	Biotite granite (M)		Dangpo, Moonkyong	4.3	0	0.13	0	2.3	0.1	8.5	il

Data of magnetites series and ilmenite series (Ishihara, 1981, 1984; Cho, 1992) Oxygen isotopic data (Kim *et al.*, 1992). C: coarse grained M: medium grained F: fine grained, W_f: whole rock.

Table 2. Gas composition of the Cretaceous Bulguksa granite in the Kyongsang basin.

Sample No.	Description	Age (m.y.)	Locality	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	CH ₄ /CO ₂	$\delta^{18}\text{O}_{\text{wt}}$	Remark
1	Biotite granite (M)	69	Ulsan	3.0	0	4.8	0.035	2.3	2.1	8.3	mt
6	Hornblende granite(M)	104	Changwon	5.4	0	0.024	0	0.21	0.1	4.3	mt
YO3	Hornblende granite(M)		Yoochon	5.6	0	0.17	0	0	>0.2	8.1	mt
N-1	Diorite		Namhae	17	0.059	0.19	0	2.3	0.1	7.1	mt
C-6	Hornblende granite	104	Changwon	8.8	0.1	0.13	0	1.2	0.1	4.3	mt
CY03	Hornblende granite(M)		Yoochon	2.3	0	0.090	0	1.2	0.1	8.1	mt
Ma-1	Biotite-hornblende granite(M)		Masan	6.9	0	0.09	0	0.59	0.2	-	mt
C-8	Hornblende-biotite granite(M)		Changwon	5.8	0	0.18	0	0.38	0.5	4.3	mt
C-5A	Hornblende-biotite granite		Changwon	9.1	0	0.05	0	2.35	0.0	4.3	mt
C-5B	Hornblende-biotite granite		Changwon	5.6	0.1	0.09	0	0	>0.1	4.3	mt
C-1	Hornblende-biotite granite		Changwon	6.5	0	0.18	0	2.65	0.1	4.3	mt

Table 3. Gas composition of the Cretaceous granite outside of the Kyongsang Basin.

Sample No.	Description	Age (m.y.)	Locality	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	CH ₄ /CO ₂	$\delta^{18}\text{O}_{\text{air}}$	Remark
41	Pink feldspar granite (M)	Sokrisan	5.1	0.078	0.088	0	52	0.0	7.7	-	mt
8	Pink feldspar granite (M)	Wolaksan	3.3	0	0.072	0	52	0.0	-	-	il
22	Pink feldspar granite (M)	Cheongpung	6.0	0.17	0.42	0	262	0.0	8.6	-	il
25	Pink feldspar granite (M)	Undalsan, Moonkyong	4.5	0.18	0.34	0	9.9	0.0	9.1	-	il
C-41	Pink feldspar granite (M)	Sokrisan	8.4	0.21	0.34	0	9.9	0.0	7.7	-	mt
K-35	Granodiorite Granite	108	Epyong, Sangdong	7.0	0.052	39	0.11	0	>34	11.2	il
K-37	Pink feldspar granite	87.5	Sangdong mine	3.8	0	24	0.099	104	0.2	10.1	il
K-42	Pink feldspar granite	4.0	Cuongpung	15	0	36	0.4	8.6	-	il	il
M	Two mica granite	Susan	7.9	8.2	1.9	0	420	0.0	-	-	il
K-26		1767	Nonggeori	11	0.036	38	0.27	0.91	41.8	13.6	il
G-1	Gabbro	Bongwhajae	4.3	0	0.11	0	0	>0.1	-	-	-
G-2	Gabbro	Yangpyong	4.7	0	3.4	0	0	>3.4	-	-	-
G-3	Gabbro	Yangpyong	4.2	0	6.6	0.013	0	>6.6	-	-	-
G-4	Gabbro	Yangpyong	7.6	0	4.4	0.018	0	>4.4	-	-	-

상대적으로 높은 특징을 나타낸다.

경상분지 내의 백악기 화강암

분석 시료는 대부분 각섬석·흑운모 화강암이며 각섬석 화강암, 흑운모 화강암 등도 있다. 이들 화강암류는 모두 자철석계 화강암에 해당되고 있다 (Ishihara, 1984; 조동룡, 1992). Table 2에서와 같이 백악기 화강암 중의 CH_4 함량은 $0.02\sim4.8\times10^{-6}$ ml/cm³ (평균 0.53×10^{-6} ml/cm³), CO_2 함량은 $0\sim2.4\times10^{-6}$ ml/cm³ (평균 1.2×10^{-6} ml/cm³), H_2 함량은 $2.3\sim17\times10^{-6}$ ml/cm³ (평균 6.9×10^{-6} ml/cm³)이다. 쥬라기 대보 화강암에 비해 CH_4 함량이 낮다. 또한 CH_4 , CO_2 , H_2 함량 모두 쥬라기 화강암에 비하여 균일한 값을 가지는 특징이 있다. 남해 지역과 창원 지역 화강암에서 CO 가 검출되며 울산 지역 화강암에서만 C_2H_6 성분이 조사되었다. CH_4/CO_2 비는 0.1~2.1이며 대체로 0.1 내외로 비의 값의 변화폭이 작다. 쥬라기 화강암에 비해서 CH_4 보다 CO_2 함량이 상대적으로 높은 특징을 나타낸다.

경상퇴적분지 밖의 백악기 화강암

분석 시료는 대다수 옥천대 내의 월악산 화강암류가 많으며 주로 분홍색 장석 화강암류로 대표된다. 자철석계와 티탄철석계 화강암 양자가 산출된다 (Table 3). 가스 성분의 함량은 CH_4 가 $0.07\sim39\times10^{-6}$ ml/cm³, CO_2 가 $0\sim420\times10^{-6}$ ml/cm³, H_2 가 $3.3\sim8.4\times10^{-6}$ ml/cm³로 쥬라기 화강암의 가스 성분 함량의 특징과 유사하다. CO_2 함량이 높으며 CO 함량 ($0\sim8.2\times10^{-6}$ ml/cm³) 역시 높은 특징을 나타내고 있다. 일부 시료 (시료 번호 K-35, K-37)에서 C_2H_6 가 포함되어 있다. CH_4/CO_2 비는 0.0~0.4로 대다수 0.0으로 CO_2 함량이 CH_4 에 비해 상대적으로 높게 나타나고 있다.

기타 암석의 가스 성분

선캠브리아기의 농거리 복운모 화강암은 CH_4 38×10^{-6} ml/cm³, CO_2 0.91×10^{-6} ml/cm³, H_2 11×10^{-6} ml/cm³이다. CH_4/CO_2 비는 41.8로 CH_4 이 우세한 화강암이다. 그리고 양평 지역 반려암과 옥천대의 봉화제 지역 반려암질암의 CH_4 가 $0.11\sim6.6\times10^{-6}$ ml/cm³, H_2 가 $4.2\sim7.6\times10^{-6}$ ml/cm³로 CO_2 와 CO 는 포함되어 있지 않다. 그리고 특징적으로 C_2H_6 가 산출된다 (Table 3). 이같은 현상은 반려암이나 초염기성 큐무레이트와 같은 염기성 심성암류에서 CH_4 를 다량 함유하며 C_2H_6 과 같은 높은 탄화수소를 가지는 경향 (Sugisaki *et al.*, 1995)과도 일치하고 있다.

화강암 유형과 가스 성분

White, Chappell (1987)에 의하여 화강암 유형이 퇴적 기원의 S-type 화강암과 화성 기원의 I-type 화강암으로 분류되었다. 이와 유사하게 Ishihara (1981)는 화강암체에 자철석을 함유한 자철석계 화강암과 자철석이 포함되지 않은 티탄철석계 화강암으로 분류하였다. 우리나라의 중생대 화강암류에 대하여도 이들의 분류 기준에 의하여 쥬라기 화강암은 대체로 S-type 화강암 또는 티탄철석계 화강암, 경상퇴적분지 내의 화강암은 I-type 화강암 또는 자철석계 화강암으로 조사되었다 (박미령, 김규한, 1982; 조동룡, 권성택, 1994; Cho, 1992; Jin, 1985; Hong, 1987; Ishihara *et al.*, 1981; Ishihara, 1984). 쥬라기 대보 화강암과 백악기 불국사 화강암체 중에도 자철석계 화강암과 티탄철석계 화강암이 혼재함이 조사되었다 (Cho, 1992). Sugisaki *et al.* (1995)의 연구 결과에 의하면 심성암류의 가스 성분의 특성은 모든 심성암류에서 H_2 가스가 함유되어 있고 반려암질암과 같은 염기성암류는 CO_2 가 거의 포함되지 않는 반면 CH_4 가 모두 함유되어 있으며 C_2H_6 정도의 높은 탄화수소가 함유되어 있다. 그리고 티탄철석계에 속하는 대부분의 화강암류는 CO_2 와 CH_4 이 공통으로 함유되어 있으므로 탄화수소 함유 시료는 드물다. 한편 자철석계 화강암은 소량의 CO_2 를 함유하고 있으며 일부 시료는 높은 CO_2 함량을 가지고 있는 특징이 있다. $\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CO}$ 다이아그램에서 티탄철석계 화강암은 자철석계 화강암에 비하여 CO 함량이 높게 나타난다. 그리고 $\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CH}_4$ 다이아그램에서 자철석계 화강암에서 보다 티탄철석계 화강암에서 CH_4 함량이 높게 나타나고 있다. 우리나라 중생대 화강암류의 경우 경상퇴적분지 내의 백악기의 자철석계 화강암에서 보다 쥬라기 티탄철석계 화강암과 경상퇴적분지 밖의 백악기 화강암류에 CO 함량이 높은 특징이 나타나고 있다 (Fig. 2). 그리고 $\text{H}_2\text{-CO}_2\text{-CH}_4$ 다이아그램에서 경상퇴적분지 내의 백악기 자철석계 화강암에 비해 쥬라기 화강암에서 다소 CH_4 함량이 높은 경향이 있다. 그러나 반려암질암과 선캠브리아기 화강암에서는 CH_4 가 현저하게 우세하다 (Fig. 3). 그러나 경상퇴적분지 내의 울산지역 화강암에서는 CH_4 함량이 높은 예외적인 경우도 있다.

화강암 중의 CH_4/CO_2 비

중생대 화강암류 중 쥬라기 화강암은 CH_4/CO_2 비가 이상적으로 큰 3개의 시료를 제외한 대부분의 암석의 CH_4/CO_2 비가 0.1~1.0으로 비의 변화폭이 크다. 한편 경상퇴

Table 4. Fluid inclusion data for quartz from Daebo and Bulguksa granites.

Sample No.	Occurrence	Type of IC	volume %	shape	size (μm)	origin	T _{m ice} (°C)	Salinity (equiv.wt.% NaCl)	T _H (°C)
DG10-1a	Qtzpheno-RD	III	15	RA	15.0	P		62-63	538.6±8(h) 201.6(v)
DG10-1b	Qtzpheno-RD	I	35	RA	10.0	S	-1.3	2.2	288.8
DG10-1c	Qtzpheno-RD	I	5	IR	12.5	S	-12.3	16.3	174.8
DG10-2	Qtzpheno-FR	I	21	ET	22.0	S	-2.8	4.6	200.9
DG10-3	Qtz pheno-IS	I	12	IR	25.5	S	-4.0	6.4	147.2
DG10-4	Qtz pheno-IS	I	15	ET	12.5	S	-4.2	6.7	195.9
DG10-5	Qtzpheno-RD	III	11	ET	9.0	P		42-43	371.9±5(h) 200.2(v)
DG14-1	Qtzpheno-RD	I	10	RO	8.0	S	-4.5	7.2	269.0
DG14-2	Qtzpheno-RD	I	25	IR	7.5	S	-3.5	5.7	253.4
DG14-3	Qtz pheno-IS	I	32	IR	15.0	S	-5.0	7.9	293.1
DG14-4	Qtzpheno-FR	I	20	ET	12.5	S	-4.0	6.4	164.8
DG14-5	Qtzpheno-RD	I	30	RA	10.0	S	-5.2	8.1	274.0
DG14-6	Qtzpheno-RD	II	45	IR	20.0	S	-5.6	8.7	207.0
DG29-1	Qtzpheno-RD	I	20	IR	25.0	S	-2.1	3.6	238.0
DG29-2	Qtzpheno-RD	I	35	ET	12.5	S	-2.0	3.4	312.4
DG29-3	Qtzpheno-FR	I	20	RO	5.0	S	-1.9	3.2	214.0
DG29-4	Qtzpheno-FR	I	20	IR	16.5	S	-1.7	2.9	204.2
DG29-5	Qtzpheno-RD	I	10	RA	11.0	S	-3.8	6.1	220.2
DG29-6	Qtzpheno-RD	I	18	RA	9.0	S	-6.8	10.2	173.1
DG36-1	Qtz pheno-IS	I	20	ET	7.5	S	-9.2	13.1	239.6
DG36-2	Qtz pheno-RD	II	45	TA	5.0	S	-8.1	11.8	249.5
DG36-3	Qtz pheno-RD	II	40	RA	7.5	S	-3.9	6.3	295.7
DG36-4	Qtz pheno-FR	I	10	ET	5.0	S	-3.8	6.1	173.7
DG47-1	Qtz pheno-RD	I	19	ET	15.0	S	-4.4	7.0	208.7
DG47-2	Qtz pheno-IS	I	15	IR	10.0	S	-7.4	11.0	228.1
DG47-3	Qtz pheno-FR	I	15	IR	15.2	S	-5.1	8.0	188.4
DG47-4	Qtz pheno-IS	II	40	IR	11.5	S	-2.4	4.0	333.9
DG47-5	Qtz pheno-RD	I	22	ET	7.5	S	-2.3	3.9	219.9
DG47-6	Qtz pheno-RD	I	11	IR	16.5	S	-2.8	4.6	116.2
DG21-1	Qtz pheno-RD	III	20	ET	17.5	P		52-59	299.6(v) 473.4(h)
DG21-2	Qtz pheno-RD	III	23	IR	15.0	P		48-50	419.8(h) 324.8(v)
DG21-3	Qtz pheno-IS	III	20	ET	20.0	P		44-52	449.5(h) 377.9(v)
DG21-4	Qtz pheno-RD	III	15	RA	12.5	P		43-50	430.9(h) 309.6(v)
DG21-5	Qtz pheno-RD	III	18	IR	22.5	P		47-49	401.0(h)
DG30-1	Qtz pheno-RD	I	22	IR	5.5	S	-6.0	9.2	265.0
DG30-2	Qtz pheno-RD	I	20	IR	7.5	S	-5.6	8.7	180.4
DG30-3	Qtz pheno-RD	I	24	IR	9.0	S	-6.4	9.7	317.5
DG30-4	Qtz pheno-RD	II	45	IR	9.0	S	-0.1	0.2	388.3
DG30-5	Qtz pheno-RD	I	18	IR	7.8	S	-2.5	4.2	252.3
DG49-1	Qtz pheno-FR	I	9	ET	7.8	S	-4.9	7.7	198.1

P; Primary inclusion, S; Secondary inclusion, DG; Daebo granite, BG; Bulguksa granite, RD; Random distributed, FR; Fractured, IS; Isolated, RA; Rectangular, IR; Irregular, RO; Round, ET; Elliptical

Table 4. Continued.

Sample No.	Occurrence	Type of IC	volume %	shape	size (μm)	origin	T _{m ice} (°C)	Salinity (equiv.wt.% NaCl)	T _H (°C)
DG49-3	Qtz pheno-RD	I	21	IR	16.5	S	-5.0	7.9	107.6
DG49-4	Qtz pheno-RD	I	15	ET	7.8	S	-3.0	4.9	156.7
DG13-1	Qtz pheno-IS	I	23	IR	24.0	S	-7.6	11.2	219.6
DG13-2	Qtz pheno-IS	I	20	IR	12.5	S	-3.6	5.8	206.9
DG13-3	Qtz pheno-IS	II	50	IR	6.5	S	-1.8	3.1	234.2
DG13-4	Qtz pheno-IS	I	13	IR	10.8	S	-0.5	0.9	202.2
DG7-1	Qtz pheno-RD	I	11	IR	22.5	S	-2.4	4.0	170.4
DG7-2	Qtz pheno-IS	I	22	IR	22.5	S	-1.3	2.2	158.4
DG7-3	Qtz pheno-IS	I	15	IR	12.5	S	-5.6	8.7	282.2
DG7-4	Qtz pheno-IS	I	9	ET	8.8	S	-7.1	10.6	238.3
DG7-5	Qtz pheno-IS	I	10	ET	7.5	S	-5.3	8.3	279.4
DG7-6	Qtz pheno-RD	I	14	IR	7.5	S	-2.5	4.2	180.0
BG6-1	Qtz pheno-IS	I	35	ET	12.5	S	-1.5	2.6	354.4
BG6-2	Qtz pheno-RD	I	22	ET	15.0	S	-3.4	5.5	273.3
BG6-3	Qtz pheno-	I	25	IR	9.5	S	-3.2	5.2	320.3
BG6-4	Qtz pheno-	II	85	RO	5.0	S	-7.0	10.5	399.8
BG6-5	Qtz pheno-IS	II	40	ET	11.0	S	-11.6	15.6	335.2
BG6-6	Qtz pheno-IS	II	42	RO	5.0	S	-2.8	4.6	288.8
BG22-1	Qtz pheno-IS	I	13	ET	15.0	S	-4.7	7.4	235.6
BG22-2	Qtz pheno-RD	I	13	IR	11.5	S	-5.6	8.7	267.5
BG22-3	Qtz pheno-IS	I	32	IR	32.5	S	-1.1	1.9	257.9
BG22-4	Qtz pheno-RD	I	25	ET	13.5	S	-4.2	6.7	304.0
BG22-5	Qtz pheno-IS	I	22	IR	17.5	S	-0.2	0.4	310.6
BG25-1	Qtz pheno-RD	I	35	IR	12.5	S	-5.5	8.5	407.2
BG25-2	Qtz pheno-IS	III	30	RA	16.0	P	52-54	450.5±5(h) 355.6(v)	
BG25-3	Qtz pheno-IS	I	32	IR	17.5	S	-3.2	5.2	336.0
BG25-4	Qtz pheno-IS	II	45	RO	6.0	S	-11.2	15.2	462.5
BG25-5	Qtz pheno-RD	I	20	RO	6.0	S	-3.0	4.9	392.2
BG25-6	Qtz pheno-RD	I	25	IR	14.0	S	-5.0	7.9	159.9
BG41-1	Qtz pheno-RD	I	18	IR	15.0	S	-5.0	7.9	234.3
BG41-2	Qtz pheno-IS	II	45	IR	20.0	S	-6.4	9.7	294.6
BG41-3	Qtz pheno-RD	II	40	ET	22.5	S	-4.0	6.4	342.7
BG41-4	Qtz pheno-IS	I	12	IR	17.5	S	-2.9	4.6	218.7
BG41-5	Qtz pheno-RD	I	35	IR	15.0	S	-2.0	3.4	277.1
BG41-6	Qtz pheno-IS	I	25	IR	15.0	S	-5.0	7.9	385.1
BGY03-1	Qtz pheno-IS	III	21	ET	13.5	P	40-42	336.5±9(h) 319.8(v)	
BGY03-2	Qtz pheno-IS	III	35	RA	20.0	P	51-52	451.0±6(h) 439.5(v)	
BGY03-3	Qtz pheno-RD	III	11	RA	15.0	P	42-43	355.4±6(h) 439.5(v)	
BGY03-4	Qtz pheno-RD	III	25	TA	15.0	P	74-77	556.1±5(h) 409.7(v)	
BGY03-5	Qtz pheno-RD	II	1	ET	8.0	P	56-58	498.0±6(h) 246.8(v)	

적분지 내의 백악기 화강암은 9개의 시료 (울산지역 시료 번호 1)를 제외한 모든 암석의 CH_4/CO_2 비가 0.1~0.5

(대부분 0.1)로 쥐라기 화강암보다 작으며 변화폭도 작다.
그리고 경상퇴적분지 밖의 백악기 화강암의 CH_4/CO_2 비

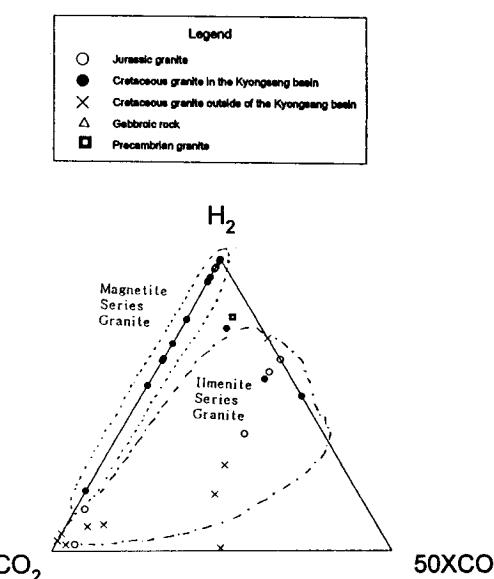


Fig. 2. H_2 - CO_2 - CO plots for Jurassic and Cretaceous granitic rocks in South Korea.

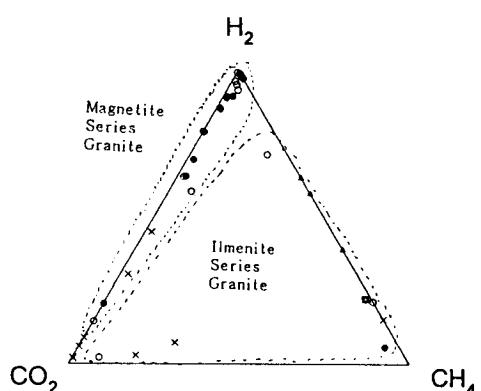


Fig. 3. H_2 - CO_2 - CH_4 plots for Mesozoic granitic rocks in South Korea.

는 대체로 0에 가깝다. 이같은 CH_4/CO_2 비의 특징에서 쥬라기 대보화강암은 CH_4 이 우세하고 경상퇴적분지 내의 불국사화강암과 경상퇴적분지 밖의 백악기 화강암은 CO_2 가 다량 포함되어 있음을 알 수 있다. CO_2 , CO , CH_4 와 같은 C 함유ガ스의 산화환원 상태는 마그마방 (magma chamber)이나 관입 과정에서 산소 분압에 크게 영향을 받는다 (Osborn, 1959; Eugster, Wones, 1962; Sate, 1972; Arculos, Delane, 1981; Sugisaki *et al.*, 1995). 티탄철석계 화강암과 자철석계 화강암의 특징도 마그마의 진화시의 f_{O_2} 에 영향을 받는다 (Ishihara, 1981). 자철석계 화강암의 산화제는 함수 마그마 내의 물의 용해 (dissolution)에 의한

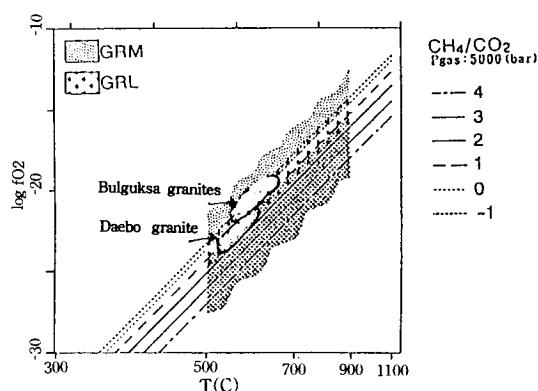


Fig. 4. T - f_{O_2} diagram based on CH_4/CO_2 ratio in granitic rocks at 5 kbar (Sugisaki *et al.*, 1995). Oxygen fugacity of Bulguksa granite shows a little higher than those of Daebo granite. Isotopic temperatures of the granite magma were used (Kim *et al.*, 1992). GRM: magnetite series granite, GRL: ilmenite series granite.

것이고 티탄철석계 화강암은 퇴적 기원의 지각의 탄소와 같은 환원성 물질에 기인한다. Sugisaki *et al.* (1995)에 의하면 자철석계 화강암의 CO_2 는 산화제의 역할을 하고 티탄철석계의 화강암에서는 CO_2 와 공존하는 CH_4 이 환원제의 역할을 하는 것으로 해석되었다. 그리고 칼크알칼리계 암석은 높은 f_{O_2} 하의 현무암질 마그마의 분별 결정 작용 산물인 반면 반려암질암과 같은 소레아이트 (tholeiite)계 암석은 칼크알칼리암계 암석에서보다 훨씬 낮은 f_{O_2} 조건에서 형성된다 (Osborn, 1969). CH_4/CO_2 비에서 우리나라의 쥬라기 화강암보다 백악기 화강암의 마그마 진화시 f_{O_2} 가 높았음을 의미하고 있다. 5 kbar에서 CH_4/CO_2 비와 온도에 따른 산소 fugacity ($\log f_{O_2}$) 관계 (Fig. 4)에서 추정된 우리나라 중생대 쥬라기 대보화강암의 $\log f_{O_2}$ 는 -21 ~ -24이고 경상퇴적분지 내의 백악기 불국사화강암은 $\log f_{O_2}$ 가 -18 ~ -22로 불국사화강암이 f_{O_2} 가 다소 높다. 이때 사용된 온도는 Kim *et al.* (1992)의 동위원소 지질온도계에 의해 얻어진 경상퇴적분지 내의 백악기 화강암의 형성온도 550 ~ 660°C와 경기육괴지역 쥬라기 화강암의 530 ~ 630°C를 이용하였다. 이같이 쥬라기 암석에 CH_4 이 우세하며 상대적으로 낮은 f_{O_2} 환경은 쥬라기 화강암질 마그마는 흑연과 같은 환원성 물질을 함유하고 있는 하부 지각의 퇴적 기원 변성암의 부분 용융 때문으로 해석된다. 한편 CO_2 가 우세하고 균질한 가스 성분을 가지며 CH_4/CO_2 비가 낮으며 상대적으로 높은 f_{O_2} 환경을 나타내는 경상분지 내의 백악기 화강암은 화강암질 마그마의 기원이 맨틀 기원에서 유래한 것으로 해석된다. 그리고 경상퇴적분지 밖의 백악기 화강암의 높은 f_{O_2} 환경을 암시하

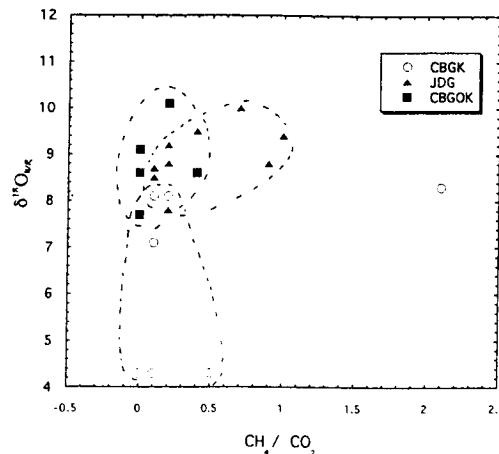


Fig. 5. CH_4/CO_2 vs $\delta^{18}\text{O}$ value for the Mesozoic granitic rocks, South Korea. (BGK; Cretaceous Bulguksa granite in the Kyongsang basin, JDG; Jurassic Daebu granite, CBGOK; Cretaceous Bulguksa granite outside the Kyongsang basin).

고 있다. 높은 CO_2 , CO 함량과 낮은 CH_4/CO_2 비에서 탄소 함량이 높은 기원 물질이 높은 f_{O_2} 환경에서 부분 용융되었음을 의미하고 있다. $\delta^{18}\text{O}$ 값과 CH_4/CO_2 비의 관계에서 쥬라기 화강암과 경상 분지 내의 백악기 화강암, 경상분지 밖의 백악기 화강암 사이에 구분이 되고 있어 이들 지역의 암석은 각각 성인적으로 또는 마그마 진화 환경에 차이가 인지되고 있다 (Fig. 5). 이같은 현상은 쥬라기 화강암과 경상분지 내의 백악기 화강암 및 경상분지 밖의 백악기 화강암에 나타나는 Nd, Sr, O (Kim *et al.*, 1992, 1996) 동위원소 지화학적 특징과도 조화적이다.

유체포유물 연구

화강암질 암석 내의 유체포유물 연구는 Takenouchi, Imai (1975), Madsen (1979), Roedder (1979), Rankin, Alderton (1983), Bodnar, Cline (1991), Yang (1993), Yang, Kim (1993a, 1993b), Ratajeski, Campbell (1994) 등에 의해 수행된 바 있다. Yang (1993b)은 우리나라 불국사 화강암류 유체포유물에 대한 자세한 연구를 수행했다. 본 연구에서는 산소 안정동위원소 분석 연구 (Kim *et al.*, 1992) 및 Nd-Sr 동위원소 연구 (Kim *et al.*, 1996) 가 수행된 동일 시료인 한반도 중생대 대보화강암류와 불국사화강암류에 대하여 유체포유물 연구 및 가스 분석 연구를 실시하였다.

화강암의 형성 온도 및 열수 변질 온도 추정과 화강암 질 마그마의 화학적 특성을 연구하기 위하여 대표적인 대보화강암 10개와 불국사화강암 5개를 선정하여 유체포유

물 연구를 실시하였다.

유체포유물 분석은 0.07~0.1 mm의 두께의 이중 연마 박편을 사용하였다. 가열·냉각 실험은 Fluid Inc. gas-flow heating/freezing stage를 사용하였다. 염농도 측정은 포유물 중의 얼음이 녹는 온도 (T_m ice)를 측정하여 Potter *et al.* (1978)의 실험식에서 계산되었다.

유체포유물은 암석 시료에 따라 포유물의 형태, 크기, 충진도, 포유물의 구성 성분 등이 다양하다. 형태는 독립된 원형, 타원형, 부정형 형태가 관찰되며 충진도는 기상, 액상 비율이 다양하다. 유체포유물은 실온에서의 형태와 산출 상태에 따라 다음 3종류로 나누었다. I (L+V)형은 액상이 풍부하고 기상의 비율이 40% 미만이며 (Fig. 6A, B), II (L+V)형은 기상의 비율이 40% 이상인 것 (Fig. 6C, D), 그리고 III (L+V+S)형은 액상이 풍부하며 염농도가 상당히 높고 암염딸팡물 및 불투명팡물을 포함하고 있는 것 (Fig. 6E, F)으로 분류하였다. 비교적 크기가 큰 원형 내지 타원형 포유물이 독립적으로 분포하거나 고상을 포함한 3상 포유물은 1차 포유물로 분류하고 파쇄대를 따라 포유물 크기가 작고 방향성을 나타내거나 사각 또는 아메바와 유사한 부정형 포유물은 2차 포유물로 분류하였다.

유체포유물의 형태는 대부분 타원형이나 시료에 따라서 원형, 부정형도 관찰되며 크기는 5~25.5 μm 정도이나, 대부분 10 μm 내외이다. 암염 고체상딸팡물을 가지는 포유물은 화강암 마그마 기원에서 포획된 1차 포유물로 추정되며 기타 2상 포유물은 대체로 열수 변질 과정에서 형성된 2차 포유물로 추정된다. 대보화강암류와 불국사화강암류의 석영 내의 유체포유물의 균일화 온도와 염농도 측정 결과는 Table 4와 같다.

대보화강암 내의 유체포유물

대보화강암의 석영 내에는 주로 I형 포유물로 구성되어 있으며 II형 포유물과 III형 포유물은 드물다 (Fig. 6A). 포유물의 크기는 26 μm 이하로 비교적 작다.

대보화강암에는 다수의 I형 포유물이 관찰되며 포유물의 형태도 다양하다. 균일화 온도는 107~317°C이다 (Fig. 7). 이의 상당 염농도는 0.9~16.3 wt.% NaCl이다 (Table 4).

II형 포유물은 I형에 비해 적은수가 관찰된다. II형 포유물의 균일화 온도는 207~388°C이다. 이의 염농도는 0.2~11.8 wt.% NaCl이다. II형 포유물의 균일화 온도는 I형 포유물의 균일화 온도에 비해서 비교적 높게 나타나고 있다. 당포 지역의 화강암 (시료번호 21)에서는 유체포유물 내에 암염과 같은 딸팡물을 가지는 III형 포유물이 다수 발견되

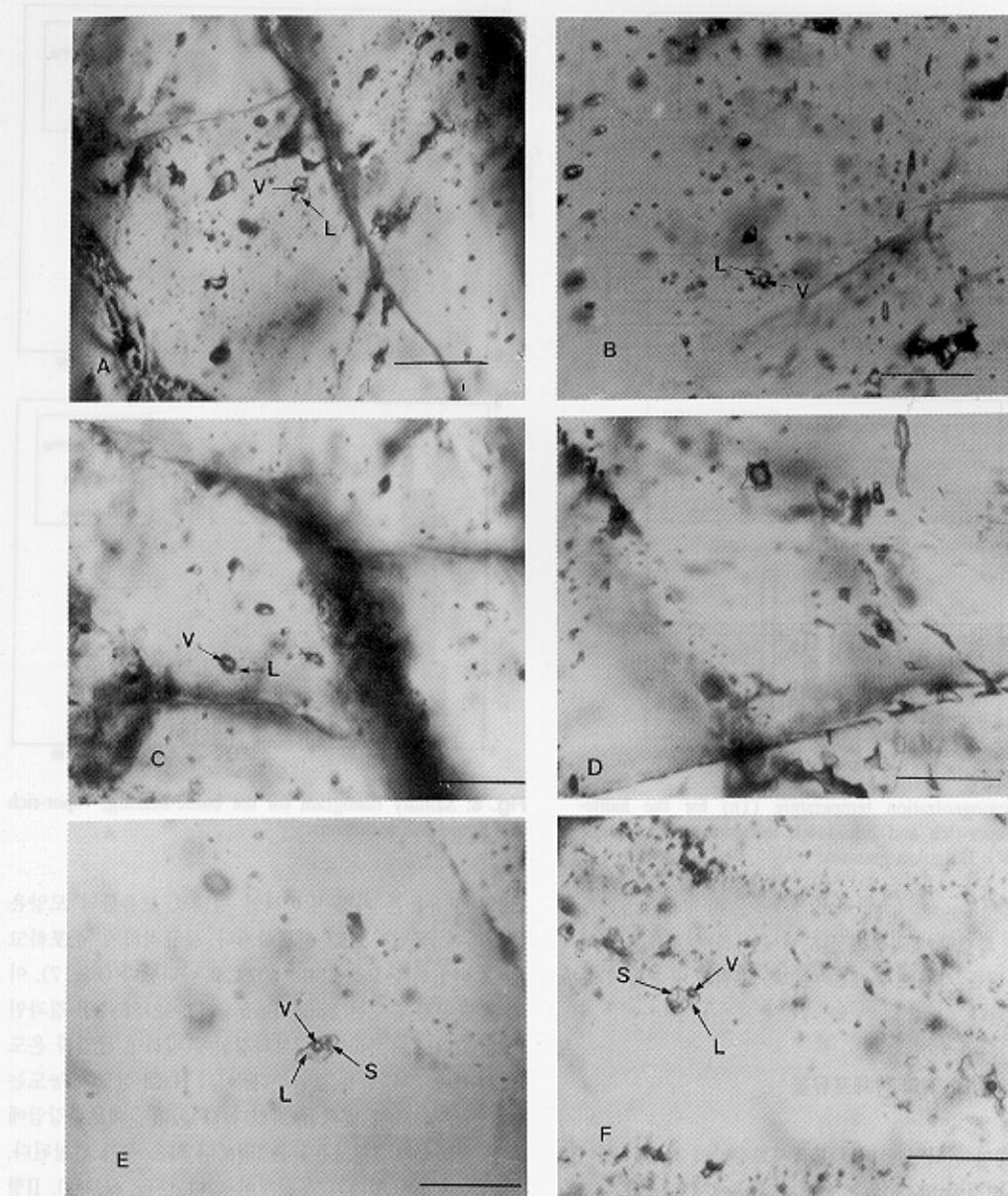


Fig. 6. Photomicrographs showing various types of fluid inclusions common in quartz of Jurassic Daebo and Cretaceous Bulguksa granitic rocks in South Korea. Scale bars indicate 40 μm . A; Type I liquid rich inclusions in quartz phenocrysts of Daebo granite (Samples No. 36), B; Type I liquid rich inclusions coexisted with secondary inclusions in quartz of Bulguksa granite (Sample No. YO3), C; Type II vapor rich inclusions in quartz of the Bulguksa granite (Sample No. 6), D; Type II vapor rich irregular shaped inclusions in quartz of the Bulguksa granite (Sample No. YO3), E; Type III inclusion coexisted with secondary tiny and irregular shaped inclusions in quartz of the Bulguksa granite (Sample No. YO3), F; Type III solid phase bearing inclusions in quartz phenocryst of the Bulguksa granite (Sample No. 25).

고 있다. 이런 떨광물이 가지는 포유물의 균일화 온도는 암염이 사라지는 온도로서 $371 \pm 5 \sim 538 \pm 8^\circ\text{C}$ 이다. 이 온도는 I형이나 II형에 비해서 상당히 높다 (Fig. 7). 가열시 용

액과 암염이 비조화적으로 녹는 경우가 대부분인데, 이 암염의 영향으로 염농도는 42~63 wt.% NaCl 상당 염농도의 범위로 상당히 높게 나타났다 (Fig. 8). 높은 균일화 온

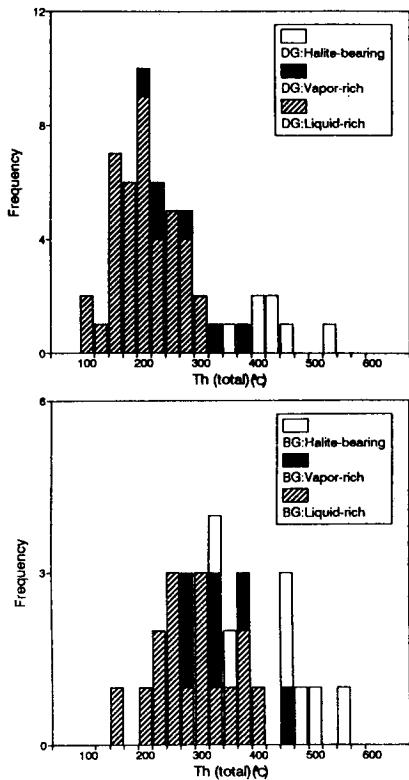


Fig. 7. Homogenization temperature (Th) for the halite-bearing, vapor-rich and liquid-rich inclusions. DG: Daebo granites, BG: Bulguksa granites.

도는 보통 화강암의 결정화 온도에 근사하며 포유물 내의 높은 염농도를 가지는 유체는 마그마 기원의 유체의 잔류 물로 추정된다.

불국사화강암 내의 유체포유물

대보화강암의 석영에 비해 불국사화강암의 석영은 현미경에서 투명성이 다소 낮다. 석영반정 내에서 관찰되는 포유물의 크기는 대략 $5.0 \sim 32.5 \mu\text{m}$ 로 대보화강암에서 보다 대체로 더 큰 경향이 있다. Shoji *et al.* (1990)에 의하면 불국사화강암 내의 포유물은 화강암 관입 활동과 매우 밀접한 관계를 가지며 고온의 열수 용액으로부터 형성된 것으로 추정하였다. 양경희, 김정진 (1993b)에 의하면 불국사화강암류의 균일화 온도가 $150 \sim 520^\circ\text{C}$ 이상까지 변화폭이 크고 염농도는 $0.5 \sim 10 \text{ wt.\% NaCl}$ 로 변화폭이 큰 이유는 포유물이 생성 시기가 다양하기 때문으로 추정하였다. 또한 그들은 염농도가 높은 포유물은 마그마원이거나 마그마 조건에 가까운 조건에서 형성된 것으로 추정하였다.

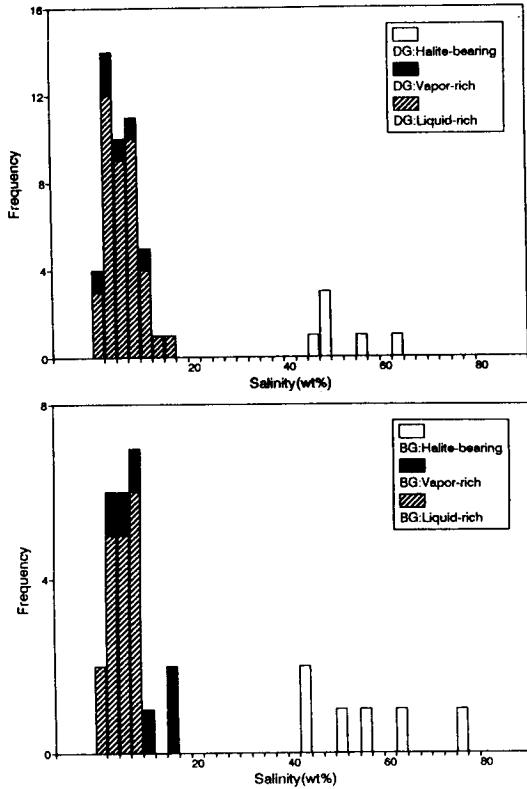


Fig. 8. Salinity histogram for the halite-bearing, vapor-rich and liquid-rich inclusions.

I형 포유물은 가장 일반적인 형태로 포유물의 모양은 다양하며 독립적으로 분포하거나 불규칙하게 분포하고 있다. 균일화 온도는 $159 \sim 407^\circ\text{C}$ 로 나타났다 (Fig. 7). 이 같은 균일화 온도는 Yang, Bodnar (1992)의 측정 결과인 $<380^\circ\text{C}$ 와도 유사하다. 대보화강암에 비하면 균일화 온도가 다소 높은 경향을 보여준다. 이의 NaCl 상당 염농도는 $0.4 \sim 8.7 \text{ wt.\%}$ 의 범위를 가진다 (Fig. 8). 대보화강암에서와 유사하게 II형포유물은 I형보다 적은 수가 관찰된다. II형 포유물은 형태가 부정형이 많다 (Fig. 6C, D). II형 포유물의 균일화 온도는 $288 \sim 462^\circ\text{C}$ 이다. I형에서보다 균일화 온도가 다소 높다. 이의 염농도는 $4.6 \sim 15.6 \text{ wt.\% NaCl}$ 이다 (Fig. 8). 10 wt.\% NaCl 당량 미만인 I형에 비해서 약간 높은 염농도 값을 갖는다.

III형 포유물 (Fig. 6E, F)은 유천 지역 화강암 (시료번호 Y03)에서 다량 관찰되었으며, 문경 지역의 운달산 지역 화강암 (시료번호 25)에서도 소량 관찰되었다. 암염이 소멸되는 온도는 $336 \pm 9 \sim 556 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 I형 포유물과 II형 포유물에서 보다 다소 높다. 또한 대보화강암에서 측정된 동일 유형의 포유물의 균일화 온도보다 높은 분포 경향을

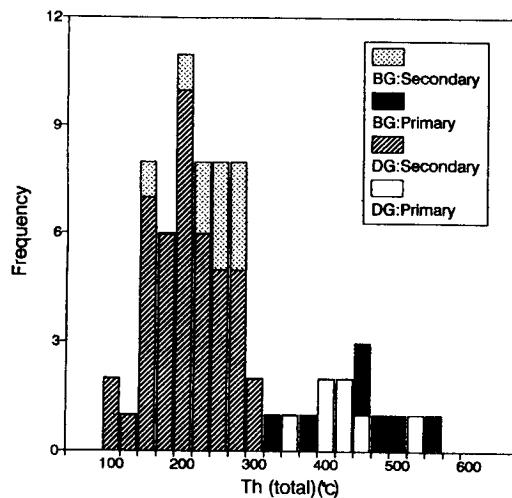


Fig. 9. Homogenization temperature (Th) of the halite-bearing, vapor-rich and liquid-rich inclusions in the Mesozoic granitic rocks, South Korea.

보여준다 (Fig. 7). 대부분 기상의 체적이 적지 않고 염농도의 값이 40~77 wt.% NaCl당량으로 상당히 높고 넓은 범위의 값을 갖는다 (Fig. 8).

대보화강암류와 불국사화강암류의 생성 환경

이상에서 보면 동일한 유형의 포유물의 균일화 온도는 불국사화강암류가 대보화강암류보다 다소 높다. 대보화강암류와 불국사화강암류에서 균일화 온도는 암염딸광물 함유포유물 (III형), 기상우세 포유물 (II형), 액상우세 포유물 (I형) 순으로 낮아진다. III형 포유물의 최고 균일화 온도 ($540\sim 560^{\circ}\text{C}$)는 화강암의 subsolidus 최저 결정화 온도와 유사하다.

또한, 유체포유물의 1차 포유물 및 2차 포유물의 특징에 따라 대보화강암류와 불국사화강암류를 비교하면 Fig. 9와 같다. 일반적으로 대보화강암류보다는 불국사화강암류의 균일화 온도가 높은 분포를 보인다. Fig. 5에서 각 화강암류에서 1차 포유물의 균일화 온도가 2차 포유물에서 보다 높게 나타나고 있다. Kim *et al.* (1992)의 산소동위 원소 지질온도계에 의해 대보화강암 $500\sim 630^{\circ}\text{C}$, 불국사화강암 $520\sim 660^{\circ}\text{C}$ 이 얻어졌으며 Lee *et al.* (1993)의 각 섬석-사장석 온도계에 의해 대보화강암류 $700\sim 790^{\circ}\text{C}$, 불국사화강암류 $670\sim 730^{\circ}\text{C}$ 로 추정하였다. 따라서 이들과 유체 포유물에 의해 얻어진 온도의 차이에서 다음 사실을 추정할 수 있다. 불국사화강암의 동위원소지질온도계에서 얻어진 온도와 유체포유물에 의해 얻어진 온도가 유사한

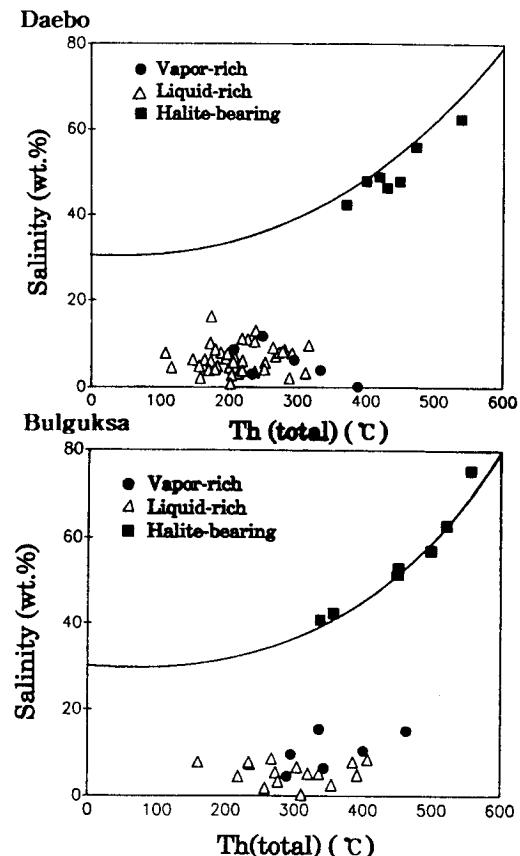


Fig. 10. Temperatures of homogenization versus salinity (expressed as equivalent wt.percent NaCl) for liquid-rich (Type I), vapor-rich (Type II) and halite-bearing (Type III) inclusions. The dashed line is the solubility curve of NaCl.

사실에서 불국사화강암이 천소관입암체임을 추정할 수 있다. 그리고 암염딸광물을 가지는 포유물의 약 500°C 이상의 고온의 균일화 온도는 subsolidus 하에서의 화강암의 결정화 온도를 의미하고 300°C 내외의 낮은 균일화 온도는 화강암류의 2차 열수 변질 온도로 추정된다.

대보화강암류와 불국사화강암류는 유사하게 III형 포유물의 NaCl 상당 염농도가 약 40 wt.% 이상으로 대단히 높다. 그러나 I형과 II형 포유물의 염농도는 그리 높지 않은 유사한 분포를 보인다.

균일화 온도-염농도 다이아그램에서 암염딸광물을 포함한 포유물은 대보화강암과 불국사화강암에서 공히 NaCl의 포화도선상이나 부근에 도시된다. 그러나, I형 포유물과 II형 포유물은 대보화강암과 불국사화강암 모두 포화도선에서 떨어져 도시되고 있다 (Fig. 10).

이같은 현상은 암염딸광물 함유 포유물은 마그마 스텝 이지의 포유물로 화강암의 형성과 밀접한 관련을 가지고

있으며 2차 기원 포유물의 I, II형 포유물은 화강암 형성 후 2차 열수 변질스테이지에 포획된 포유물임을 추정 할 수 있다. 낮은 온도와 낮은 염농도는 열수 변질시의 순환 수의 혼입에 기인한 것으로 해석된다. 이같은 결과는 Kim *et al.* (1992)의 화강암의 산소안정동위원소비 분석에서 전암의 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 낮은 결과에서 해석한 순환수 혼입에 수반된 열수 변질의 결과 해석과도 일치하고 있다.

결 론

남한의 중생대 화강암류 중에 포함된 가스의 특성과 유체포유물에 의해 얻어진 균일화 온도와 염농도 측정 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 화강암류 중의 가스 성분은 주로 H_2 , CH_4 , CO_2 , CO 등으로 구성되어 있으며 일부 시료에서 C_2H_6 가 분석되었다. 중생대 쥬라기의 대보 화강암 내 CH_4 이 우세하며 경상퇴적분지 내와 경상퇴적분지 밖의 백악기 불국사 화강암류는 CO_2 가 우세한 특징을 나타낸다.

(2) 쥬라기 화강암으로 대표되는 티탄철석계 화강암은 CH_4 이 우세하고 경상퇴적분지 내의 백악기 자철석계 화강암은 CO_2 가 우세하다.

(3) 쥬라기 화강암의 CH_4/CO_2 비의 변화폭이 크며 경상퇴적분지 내의 백악기 화강암의 CH_4/CO_2 비는 대단히 일정하다. 경상퇴적분지 내의 백악기 화강암이 쥬라기 화강암보다 마그마 진화시에 다소 높은 f_{O_2} 환경으로 추정된다. 이같은 가스 성분의 특성은 쥬라기 화강암의 마그마의 기원은 하부 지각의 환원성 물질을 함유한 퇴적변성암의 부분 용융 산물임을 의미한다. 한편 경상퇴적분지 내의 백악기 화강암의 균질한 가스 조성과 높은 f_{O_2} 조건은 맨틀 기원 화강암질 마그마에 기인하는 것으로 해석된다.

(4) 쥬라기 화강암류의 유체포유물의 균일화 온도 ($108\sim 539^\circ\text{C}$, 평균 324°C)가 백악기 화강암류의 온도 ($160\sim 556^\circ\text{C}$, 평균 358°C)보다 다소 낮다. 암염딸광물을 포함하고 있는 포유물을 제외한 2상 포유물의 NaCl 상당 염농도는 쥬라기 화강암류 ($0.2\sim 16.3 \text{ wt\% NaCl}$)와 불국사 화강암류 ($0.4\sim 15.6 \text{ wt\% NaCl}$)가 유사하다. 암염딸광물을 포함한 포유물은 주로 포화곡선상에 도시되며 기타 2상 포유물은 염농도가 낮게 나타나 전자는 화강암질 마그마 기원의 포유물로 추정되며 후자는 순환수 유입에 따른 후기 열수변질 기원의 포유물로 해석된다.

사 사

본 연구는 전략광물연구센터와 교육부 기초과학연구소

지원연구비에 의하여 수행되었다. 가스 분석시에 협력하여 준 나고야대학 兵條正美씨에게 감사한다. 그리고 원고 정리에 협력하여 준 이화여자대학교 교육대학원 서혜영, 최현정 양에게 고마움을 전한다.

참고문헌

- 권성택 (1991) 우리나라 현생 화강암질에 대한 사마리움-니오디미움 동위원소 연구: 지각의 성인 및 구조 고찰. 46차 대한지질학회 학술발표회 초록집, 528p.
- 김규한 (1992) 남한의 중생대 화강암류의 지화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 435-446.
- 김규한, 신윤수 (1990) 충주-월악산-제천 화강암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 23권, p. 245-259.
- 김규한, 이진수 (1993) 경상퇴적분지 내에 분포하는 백악기 화강암류의 암석지구화학적 연구. 지질학회지, 29권, p. 84-96.
- 김규한, 박성숙, 나춘기 (1994) 남한의 중생대 화강암류의 Nd, Sr 동위원소 및 유체포유물연구. 제 49차 대한지질학회 학술발표요약집, p. 32-33.
- 김옥준 (1971) 남한의 신기 화강암류의 관입 시기와 지각 변동. 광산지질, 4권, p. 1-9.
- 박성숙 (1995) 남한의 중생대 화강암류의 니오디미움-스트론튬 동위원소 및 유체포유물 연구. 이화여대 석사학위논문 84p.
- 양경희, 김정진 (1993) 경상 분지 남동부에 분포하는 화강암류 내의 규산염 용융 포유물. 지질학회지, 29권, p. 338-352.
- 이종익 (1994) 경상분지 남부의 천소관입 화강암류에 대한 주성분 원소의 지구화학. 지질학회지, 30권, p. 482-496.
- 조등룡, 권성택 (1994) 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각 두께의 진화. 지질학회지, 30권, p. 41-61.
- 조등룡 (1992) 남한에 분포하는 현생 화강암류의 기원에 대한 광물 및 암석화학적 연구. 연세대학교 박사학위논문, 189p.
- 진명식 (1995) 옥천 습곡대에서의 중생대 화강암류의 암석학적 및 지화학적 특징과 화성 활동, 서남 옥천대의 지질. 이종혁 교수 퇴임기념 논문집, p. 179-207.
- 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.
- Chang, K.H. (1975) Cretaceous stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 13, p. 76-90.
- Eggerle D.H. (1978) The effects of CO_2 upon partial melting of peridotite in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{CO}_2$ to 35 kb, with an analysis of melting in peridotite- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ system. Am. J. Sci., v. 278, p. 305-343.
- Eugster H.P. and Wones D.R. (1962) Stability relations of the ferruginous biotite, annite. J. Petrol., v. 3, p. 82-125.
- Hong, Y.K. (1985) Geochemistry of the Cretaceous Eonyang and Yoocheon granites in the Southern Korea. J. Geol. Soc. Korea, v. 21, p. 90-108.
- Hong, Y.K. (1987) Geochemical characteristics of Pre-cambrian, Jurassic, Cretaceous granites in Korea. J. Korean Inst. Mining Geol., v. 20, p. 35-60.

- Ishihara, S. (1984) Granitoid series and Mo/W-Sn mineralization in East Asia. *Rept. Geol. Surv. Japan*, No. 263, p. 173-208.
- 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.
- Jin, M.S. (1981) Petrology and geochemistry of the Cretaceous granitic rocks in Southern Korea. Ph.D. Thesis in Seoul National University, 144p.
- Jin, M.S. (1985a) A Relationship between tectonic setting and chemical composition of the Cretaceous granitic rocks in Southern Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 21, p. 67-73.
- Jin, M.S. (1985b) Geochemistry of the Cretaceous to Early Tertiary granitic rocks in Southern Korea Pt. 1, Major elements geochemistry. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 21, p. 297-316.
- Jin, M.S. (1986) Ca, Na, K, Rb, Zr, Nb and Y abundances of the Cretaceous to Early Tertiary granitic rocks in South Korea and their tectonic implication. Memoir for Prof. Lee, S.M.'s 60th Birthday, p. 195-209.
- Jin, M.S. (1988) Geochemistry of the Cretaceous to Early Tertiary granitic rocks in Southern Korea Pt. 2, Trace elements geochemistry. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 24 Spec. Issue, p. 168-188.
- Jin, M.S., Kim, S.Y. and Lee, J.S. (1981) Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang Basin, Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 31, p. 245-260.
- 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.
- Kim, K.H., Park, S.S and Na, C.K. (1996) Nd and Sr isotopic signatures of Mesozoic gneisses in South Korea. *Resource Geol.* (in print).
- Kim, O.J. (1975) Granites and tectonics of South Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 8, p. 223-230.
- Kim, O.J. and Lee, D.S. (1983) Summary of igneous activity in South Korea. *G.S.A. Memoir.*, v. 159, p. 87-103.
- Kwon, S.T. and Tilton, G.R. (1992) Nd-Sr Isotope study Phanerozoic granitoids in South Korea : Implications for basement structure and tectonics of East Asia. Abst. 3 (1), IGC 29th Kyoto, p.109.
- Lee, D.S. (1987) Geology of Korea. Kyohaksa Pub., Seoul, Korea.
- Lee, I.H. (1994) Mesozoic granitic rocks in South Korea, especially on the Wolagsan granite mass in the Ogcheon zone. Ph.D. thesis, Kumamoto University, Japan.
- Lee, I.H., Tsusue, A., Hory, T. (1993) Amphiboles of Jurassic and Cretaceous granitic rocks in South Korea. 43rd annual meeting of the Society of Resource Geol., v. 43, p. 225.
- Lee, I.H., Tsusue, A. and Honma, H. (1995) Mesozoic I-like granitic rocks of the Wolagsan mass in the Ogohon zone of South Korea. *Resource Geol.*, v. 45, p. 53-66.
- Lee, J.I. (1991) Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow depth emplaced granitic rocks, Southern part of the Kyongsang basin, Korea, Origin of micrographic granite. Ph.D. Thesis, The University of Tokyo, 1979. p. 487-510
- Lee, S.M. (1972) Granites and mineralization in Gyeongsang basin, *Memoirs in Celebration of the 60th birthday of Prof. C.M. Son*, p. 195-220.
- Madsen, J.K. (1979) Fluid inclusions in quartz from deep seated granitic intrusions, South Norway. *Lithos*. v. 12, p. 13-23.
- Na, C.K. (1994) Genesiss of granitoid batholiths of Okchon zone, Korea and its implications for crustal evolution. Ph.D. Thesis, Tsukuba University, 154p.
- Osborn E.F. (1959) Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma. *Am. J. Sci.* v. 257, p. 609-647.
- Osborn E.F. (1969) The complementariness of orogenic andesite and alpine peridotite.
- Potter, II, R.W. and Clyne, M.A. (1978) Solubility of highly soluble salts in aqueous media, part 1, NaCl , KCl , CaCl_2 , Na_2SO_4 , and K_2SO_4 solubilities to 100°C. *J. Rec. U.S. Geol. Survey*, v. 6, p. 701-705.
- Rankin A.H. and Alderton, D.H.M. (1983) Fluid inclusion petrography of a W.England granites and its potential in mineral exploration. *Mineral Deposits*, v. 18, p. 335-347.
- Ratajeski, K. and Campbell, A.R. (1994) Distribution of fluid inclusions in igneous quartz of the Capitan pluton, New Mexico, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 58, p. 1161-1174.
- Roedder, E. (1979) Origin and significance of magmatic inclusions. *Bull. Mineral.*, v. 102, p. 487-510.
- Shoji, T. and Zaw, T. (1990) Fluid inclusions of granitoids and their bearing on mineralization in South Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 23, p. 127-133.
- 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).
- Takenouchi, S. and Imai, H. (1975) Glass and fluid inclusions in Acidic igneous rocks from some mining areas in Japan. *Econ. Geol.*, v. 70, p. 750-769.
- Tsusue, A., Dai, K., Mizuta, T. and Tamai, T. (1990) A comparision of Jurassic granitoids between the Hida belt and South Korea. *Mining Geol.*, v. 40, p. 365-384.
- Tsusue, A., Mizuta, T., Watanabe, M. and Min, K.W. (1981) Jurassic and Cretaceous granitic rocks in South Korea. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 31, p. 216-238.
- 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.
- White, A.J.R., and Chappell B.W. (1977) Ultrametamorphism and Granitoid genesis. *Tectonophysics*, v. 43, p. 7-22.
- Yang, K., and Bodnar, R.J. (1992) Fluid inclusion study of the Bulgugsa group granites, Kyeongsang Basin, Southeast Korea. Fourth Biennial Pan-American Conference on research on Fluid Inclusions. Program with Abstracts, 96p.
- Yang, K.H. (1993) Fluid inclusions from the Cretaceous-early Tertiary granitoids in the Southeastern Gyeongsang basin, Korea. Ph.D. thesis, Pusan National University, 96p.
- Yang, K.H. and Kim, J.J. (1993a) Silicate melt inclusions from the granitoids in the southeastern Kyeongsang

basin. J. Geol. Soc. Korea., v. 29, p. 338-352.
Yang, K.H. and Kim, J.J. (1993b) Fluid inclusion study of
the granitoids in the southeastern Kyeongsang basin.

J. Geol. Soc. Korea., v. 29, p. 551-561.

1996년 5월 10일 원고접수