

## 부산 금정산화강암체의 암석학 및 Rb-Sr 전암 등시선 연대

윤성호<sup>1</sup> · 고정선<sup>2,\*</sup> · 박광순<sup>3</sup> · 안효찬<sup>3</sup> · 김용일<sup>3</sup> · 유성현<sup>3</sup> · 이동한<sup>3</sup> · 윤기영<sup>3</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 과학교육학부(지구과학교육전공), <sup>2</sup>부산대학교 과학교육연구소, <sup>3</sup>부산 장영실과학고등학교

## Rb-Sr Whole-rock Isochron Age and Petrology of the Mt. Geumjeong Granite, Busan

Sung-Hyo Yun<sup>1</sup>, Jeong-Seon Koh<sup>2,\*</sup>, Kwang-Sun Park<sup>3</sup>, Hyo-Chan Ahn<sup>3</sup>, Young-Il Kim<sup>3</sup>,  
Sung-Hyeon Yoo<sup>3</sup>, Dong-Han Lee<sup>3</sup> and Gi-Young Yun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2</sup>Institute of Science Education, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>3</sup>Jang Young Sil Science High School, Busan 611-089, Korea

**요약:** 부산 금정산화강암체를 구성하는 화강암류는 암상별로 화강섬록암, 각섬석화강암, 아다멜라이트, 토날라이트, 흑운모화강암 및 미문상화강암으로 구성된다. 금정산화강암의 지화학적 특성은 이들 화강암류가 칼크-알칼리암계열, I-형 화강암에 속하며, 화강섬록암질 마그마로부터 사장석의 분별 결정화작용에 의해 각섬석화강암, 아다멜라이트 및 흑운모화강암, 미문상화강암으로 진화하였음을 잘 보여준다. 화강암의 최저용융조성의 결정화 압력과 온도는 1~5 kbar와 720~700°C로 계산된다. 금정산화강암체의 각 암상에서 측정된 Rb-Sr 전암 연대는  $69.6 \pm 1.9$  Ma이며, Sr 동위원소의 초생비는  $0.70503 \pm 0.00015$ 이다. 미량원소와 희토류원소의 조성 변화에서 높은 LILE/HFSE 비와 LREE의 부화 경향을 나타내는 데, 이는 금정산화강암체가 백악기말 섭입대 환경에서 생성된 대륙연변호 칼크-알칼리암의 전형적인 화강암 계열의 특성이다.

**주요어:** 금정산화강암, 사장석, 분별결정화작용, 69.6 Ma

**Abstract:** The granitoids in the Mt. Geumjeong, Busan can be divided into granodiorite, hornblende granite, adamellite, tonalite, biotite granite and micrographic granite. The geochemical characteristics of the Mt. Geumjeong granites indicate that they were crystallized from a calc-alkaline series and that they belong to I-type granitic rocks which evolved from granodioritic magma into hornblende granite, adamellite, biotite granite, and finally micrographic granite through fractional crystallization of plagioclase. The crystallization pressures and temperatures of the minimum melt compositions of the granitic rocks were estimated to about 1~5 kbar and 720~700°C. The trace element composition and REE patterns, characterized by a high LILE/HFSE ratio and enrichments in LREE, indicate typical continental margin arc calc-alkaline rocks produced in the subduction environment. The Rb-Sr isotopic data for the Mt. Geumjeong granites define a well-defined isochron yielding as age of  $69.6 \pm 1.9$  Ma with an initial Sr isotopic ratio of 0.70503.

**Key words:** Mt. Geumjeong granite, Plagioclase, Fractional crystallization, 69.6Ma

## 서론

우리나라에서는 후기 백악기에서 제3기초까지 화산암류와 화강암류가 시간과 공간적으로 매우 밀접하게 관련되어 분포하는 대규모의 화산-심성활동이 단속적

으로 계속되었다. 한반도의 동남부에서는 이 화성활동에 의해서 불국사화강암류가 형성되었으며, 경상분지 동남부 부산지역에는 금정산화강암체(차문성, 1976; 손치무 외, 1978; Lee, 1980; 이윤중 외, 1999)가 북북동-남남서 방향의 양산단층과 동래단층에 규제를 받으면

\*Corresponding author: jskoh812@pusan.ac.kr

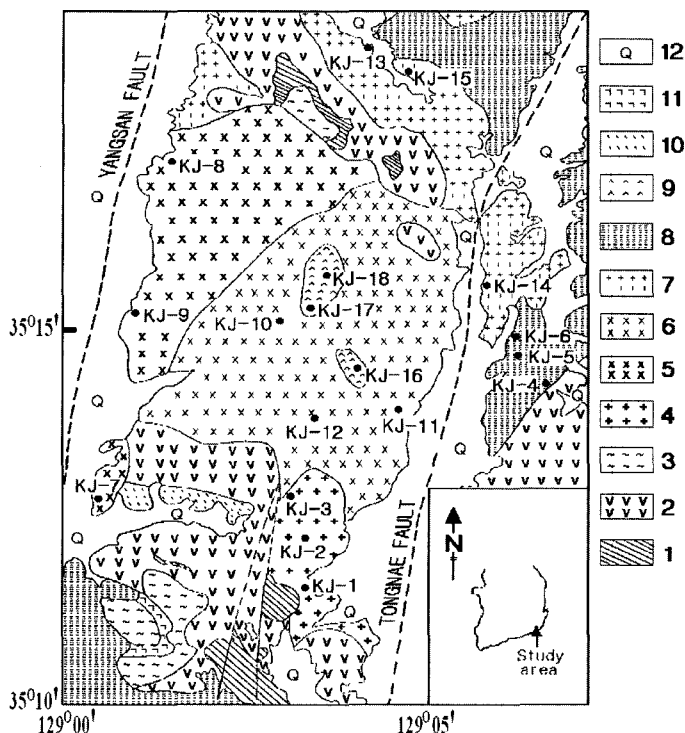


Fig. 1. Geological map of the Busan area showing various lithologies of the Mt. Geumjeong Granite (Modified from Son *et al.*, 1978). (Legend) 1. Cretaceous Sedimentary Formation (Icheonri Formation), 2. Andesitic rocks, 3. Rhyolite tuff, 4. Granodiorite, 5. Hornblende granite, 6. Adamellite, 7. Biotite granite, 8. Micrographic granite, 9. Tonalite, 10. Felsite, 11. Granite porphyry, 12. Alluvium. Dot and numbers in the figure represent sampling sites.

서 관입 정치되었다. 금정산 화강암체의 전암 K-Ar 연대는 71 Ma(김옥준, 1971)와 77 Ma(Lee, 1980)로 알려져 있다.

이 연구에서는 부산 금정산화강암체를 구성하는 화강암류에 대한 각 암상별로 암석화학적 특징을 파악하고, Rb-Sr 전암 연대를 측정하여 금정산화강암체의 관입 정치시기 및 진화과정을 알아보려고 한다.

### 지질개요 및 암석기재

본 역은 한반도 동남부에 위치하고 있으며, 1:50,000 동래도폭의 중서부 지역을 점하고 있다(Fig. 1). 본 역의 지질은 경상누층군의 퇴적암류를 관입 또는 분출한 화산암류와 이들을 관입한 화강암류로 구성되어 있다(손치무 외, 1978; Lee, 1982).

본 연구의 대상인 화강암류는 1:50,000 동래·월래도폭에서, 초기의 불국사 화강암류와 그 후기의 마산암류로, 분화상이 서로 다른 것으로 기재해 놓았다(손치무 외, 1978). 즉, 불국사화강암류는 화강섬록암, 각

섬석화강암 및 흑운모화강암으로, 마산암류는 토날라이트, 아다펠라이트 및 미문상화강암으로 분류하고, 분화과정이 다른 암상들이 함께 존재하는 것으로 해석하고 있다. 황병훈(2004)은 금정산화강암체를 그룹I의 포유체(enclave) 함량이 적은 반상화강암으로 분류하고, 59~58 Ma에 하부지각 물질이 부분용융으로 형성된 화강암질 마그마에 염기성 마그마의 주입으로 마그마 혼합의 영향을 받았으며, 각 암상간의 차이는 산성마그마와 염기성 마그마간의 상대적 물성에 기인하는 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 각 암상의 분류 및 명명은 동래·월래도폭(손치무 외, 1978)에 근거하였으며, 화강섬록암, 각섬석화강암, 흑운모화강암, 토날라이트, 아다펠라이트 및 미문상화강암의 순으로 고찰하고자 한다.

### 화강섬록암

본 암상은 금정산화강암체의 남부 사적동 일원에 분포한다. 암회색 세립질이나 부분적으로 길이 2 mm 정도의 사장석 결정을 가지면서 반상조직을 나타내기도

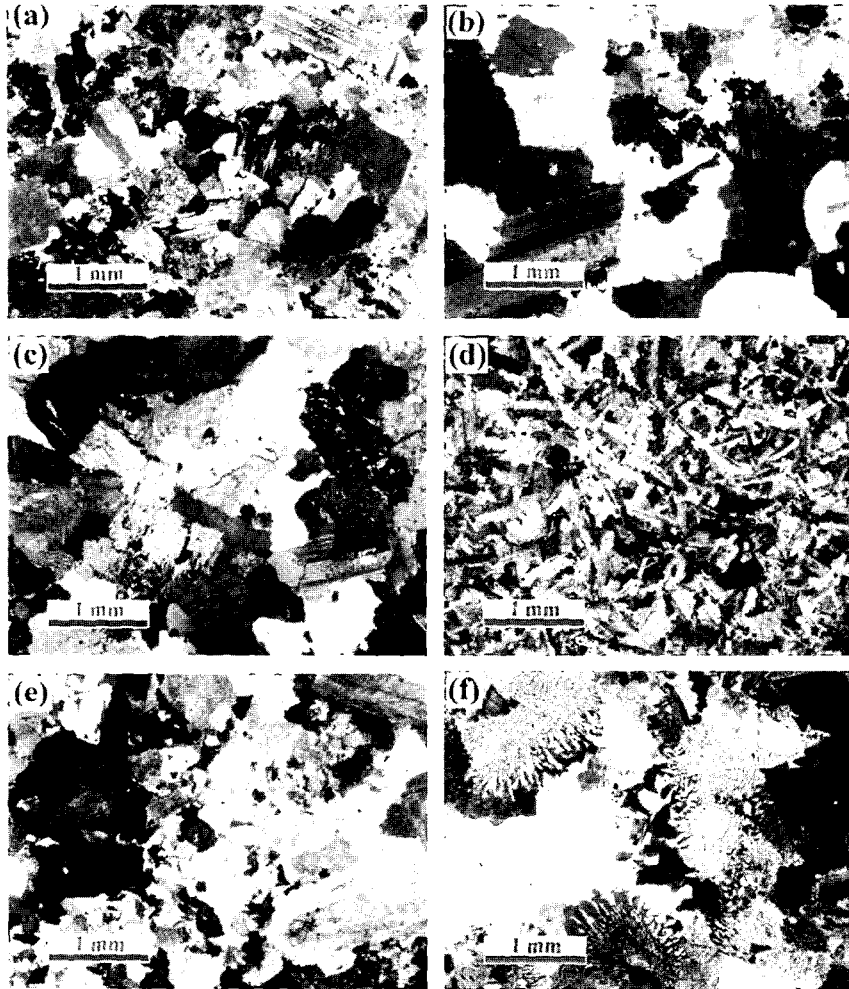


Fig. 2. Photomicrographs of the thin section of the Mt. Geumjeong Granite. (a: Granodiorite, b: Hornblende granite, c: Biotite granite, d: Tonalite, e: Adamellite, f: Micrographic granite. Crossed nicols. Scale bar=1 mm)

하며, 직경 2 cm 정도의 염기성포획체(mafic clots)를 포함한다. 구성광물은 석영, 칼리장석, 사장석, 흑운모, 각섬석이다.

경하에서, 사장석의 반정이 발달한 반상조직을 보이는 본 암의 석기는 반자형 입상조직을 보여 준다(Fig. 2a). 주 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 흑운모 등으로 되어 있고 부성분광물로서 각섬석, 녹니석, 자철석으로 구성된다. 석영은 본 암의 약 20%를 차지하며 타형으로 나타나고 정장석과 공생하여 미문상조직을 보여 주기도 한다. 사장석은 본 암의 약 35%로 정장석보다 더 많이 함유되어 있다. 알바이트쌍정을 보이며 누대구조를 나타내기도 한다. 사장석의 성분은 올리고클레이스(An 13~20)에 해당하여 부분적으로 견운모화 되

어 있다. 녹니석, 각섬석, 스펀 등과 같은 미립의 광물을 보유하고 있어서 포이키리틱조직을 흔히 보여 주기도 한다. 흑운모는 다색성이 강하다(X = 담녹색, Y = 연녹색, Z = 황녹색).

#### 각섬석화강암

본 암상은 금정산 화강암체의 북서부에서 서단을 접하여 구포 화명동에서 금곡동에 이르기까지 넓게 분포하며, 매우 균질하고 중립질이며(Fig. 2b) 칼리장석이 특히 다량으로 함유되어 있으며, 유색광물로는 녹색의 각섬석이 함유되는 것이 특징이다.

경하에서 반자형 입상조직을 보여 준다. 주 구성광물로는 석영, 정장석, 사장석, 각섬석 및 흑운모 등이

며 부 성분광물로는 스펀, 인회석, 저어콘, 녹니석, 백운모 및 자철석 등이 나타난다. 정장석은 대개 퍼어사이트로 나타나며 부분적으로 석영광의 접촉부에 미문상조직을 발달시키기도 한다. 흑운모는 다색성이 현저하다( $X = \text{적갈색}$ ,  $Y = \text{담황색}$ ). 각섬석은 녹색 또는 담녹색으로 다색성이 있고 주상의 큰 결정으로 나타나거나 미립의 집합체를 이루기도 한다. 저어콘은 흑운모 또는 각섬석 중에 내포물로 들어 있다.

### 흑운모화강암

본 암상은 금정산 화강암체의 동북부 일원을 점하여 분포하며, 일반적으로 중립질의 입상조직을 보여 주며 석영, 장석 및 흑운모 등이 육안으로 식별된다. 안산암 또는 혼펠스의 포획암을 가지는 경우가 흔히 나타난다.

경하에서, 석영, 정장석, 퍼어사이트, 사장석 및 흑운모 등으로 주 구성되고 녹니석, 스펀, 견운모, 저어콘 및 인회석 등이 수반광물로서 나타난다. 반자형 입상조직을 보이며(Fig. 2c) 부분적으로는 반상조직을 띄기도 한다. 석영은 본 암의 약 20%로 타형이고 0.8 mm 정도인 것이 보통이다. 부분적으로 모자이크조직을 보여 주기도 하며 장석 중에 포획물로도 함유되어 있다. 정장석은 견운모화작용에 의해서 약간 오염되어 있지만 뚜렷한 칼스반드쌍정은 볼 수 있으며 보통 퍼어사이트조직을 보여 준다. 정장석과 접하고 있는 석영은 그 주변부에 가끔 미문상조직이 발달해 있고 알바이트 화작용을 받아 표백되어 있기도 하다. 흑운모는 본 암의 약 6%를 차지하며 적갈색을 띠고 다색성이 현저하다( $X = \text{적갈색}$ ,  $Y = \text{담황색}$ ).

### 토날라이트

본 암상은 금정산 화강암체의 중심부의 금정산 정상부 일원에 소규모로 분포하며, 회색의 세립질의 암상을 나타낸다.

경하에서, 주로 사장석, 석영 및 각섬석으로 되어있고 녹니석, 흑운모, 스펀, 티탄철석, 자철석 및 저어콘 등이 나타난다. 사장석은 알바이트쌍정을 보이거나 누대구조를 보여 주는 것이 보통이며 약간 오염되어 있는 것이 보통이다. 사장석의 성분은 올리고클레이스에 해당한다. 석영은 다른 암석에 비해 소량이며 사장석 중에 함유되어 있기도 한다. 각섬석은 주상 또는 침상으로 나타나며 부분적으로 녹니석화 되어 있다(Fig. 2d).

### 아다멜라이트

본 암상은 금정산 화강암체의 주체를 이루어 분포하며, 신선한 것은 회색 중립질이나 암체의 주변부에서

는 담홍색 반상조직을 갖는다. 반정의 크기는 3~5 mm 이고, 석기는 석영, 정장석, 사장석, 흑운모와 각섬석로 구성된다. 간혹 염기성포획체를 함유하며, 마이아로리틱조직을 보이기도 한다.

경하에서 반자형 입상조직을 보여주며 국부적으로는 파쇄되어 있어 불규칙적인 깨어짐이나 석영의 불규칙 소광현상 등을 관찰할 수 있다. 본 암은 주로 석영, 정장석, 사장석 및 흑운모 등으로 구성되고 수반광물로서는 견운모, 녹니석, 각섬석, 자철석, 적철석 및 저어콘 등이 나타난다. 석영은 본암의 25%가량 차지하며 모자이크상 또는 정장석과 인터그로스스로 나타나며 장석 입자들의 간극을 채우기도 한다(Fig. 2c). 정장석은 약 38%로서 대체로 팻취 혹은 맥상의 퍼어사이트로 나타나는 것이 보통이고 사장석의 작은 결정을 포함하기도 한다. 사장석은 누대구조를 보이는 것이 많고, 그 성분은 알바이트 내지 올리고클레이스( $An 7\sim 15$ )이다. 사장석과 정장석은 본 암중에 함유되어 있는 양이 대체로 대등하며 둘 다 어느 정도 심한 견운모화작용 내지 카오린화작용을 받았다. 흑운모는 약 5%가량 함유되어 있으며 황갈색이고 다색성이 현저하다( $X = \text{갈색}$ ,  $Y = Z = \text{암갈색}$ ).

### 미문상화강암

본 암상을 금정산 화강암체의 동연부 회동수원지와 두구동 일원에 분포하며, 담홍색 세립질화강암이며, 부분적으로 중립질 또는 마이아로리틱조직을 보여 주기도 한다.

경하에서, 특징적인 미문상조직이 전체적으로 발달해 있으며, 미문상조직은 알칼리 장석의 바탕에 타형의 미립인 석영이 상형 문자상 또는 국화꽃무늬같이 함유되어 있는 형태이다(Fig. 2f). 본 암의 거의 대부분은 이러한 칼리장석과 석영이 인터그로스된 형태로 구성되어 있지만 석영의 큰 입자가 단독으로 나타나기도 한다. 이 석영 결정은 인접한 미문상 석리층의 석영 용정(熔晶)들과 결정학적인 방향이 일치되는 경우가 많다. 이외에 사장석, 견운모, 흑운모, 자철석 및 저어콘 등이 수반광물로서 함유되어 있다.

### 암석화학적 특성

각 암상들의 특징을 잘 반영하는 신선한 시료를 선별하여 각 암상별로 3개씩 총 18개의 시료에 대하여 한국기초과학지원연구원 부산분소에서 X-선형광분광분석기(XRF)로 측정 분석하였으며, 강도를 얻기 위한 전압, 전류 조건은 40 kV, 30 mA이다. 분석치의 검정(calibration)에 이용된 표준물질은 미국지질조사소(USGS)

**Table 1. Major element composition (wt.%) and CIPW norm of the Mt. Geumjeong granite, Busan.**

Sample	KJ-1	KJ-2	KJ-3	KJ-4	KJ-5	KJ-6	KJ-7	KJ-8	KJ-9
SiO <sub>2</sub>	67.77	67.57	66.35	77.71	76.31	76.52	72.81	73.46	73.08
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.52	0.55	0.06	0.07	0.08	0.13	0.18	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.47	14.72	14.41	12.02	12.30	12.25	13.28	13.39	13.69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	4.05	3.97	4.47	1.12	1.16	1.28	1.92	1.71	1.84
MnO	0.11	0.13	0.14	0.04	0.05	0.03	0.03	0.08	0.10
MgO	1.21	1.18	1.34	0.07	0.08	0.07	0.22	0.28	0.29
CaO	3.09	3.19	3.33	0.26	0.47	0.36	1.07	0.94	0.97
Na <sub>2</sub> O	3.61	3.64	3.54	4.34	4.48	4.42	4.59	4.77	4.93
K <sub>2</sub> O	4.01	3.99	3.81	4.14	4.12	4.18	3.87	3.94	3.84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.12	0.15	0.01	0.01	0.02	0.02	0.05	0.05
LOI	0.82	0.88	1.03	0.30	0.27	0.24	0.32	0.30	0.18
Total	99.76	99.90	99.11	100.05	99.31	99.45	98.26	99.09	99.16
Q	22.90	22.50	22.20	35.72	33.53	33.95	28.93	28.32	27.09
or	24.04	23.90	23.05	24.56	24.62	24.94	23.40	23.02	23.09
ab	30.92	31.15	30.60	36.79	38.26	37.69	39.66	40.86	42.37
an	11.55	12.15	12.41	1.06	1.26	1.22	4.26	3.50	3.91
Di	2.71	2.62	2.97	0.15	0.90	0.41	0.90	0.79	0.59
Hy	4.71	4.60	5.31	1.07	0.74	1.02	1.66	1.69	2.37
mt	1.85	1.81	2.06	0.51	0.53	0.59	0.89	0.76	0.10
il	0.96	1.00	1.07	0.11	0.13	0.15	0.25	0.35	0.37
ap	0.27	0.27	0.33	0.02	0.02	0.04	0.04	0.11	0.11
Sample	KJ-10	KJ-11	KJ-12	KJ-13	KJ-14	KJ-15	KJ-16	KJ-17	KJ-18
SiO <sub>2</sub>	74.85	73.30	75.38	75.85	77.69	74.45	64.67	62.02	59.68
TiO <sub>2</sub>	0.11	0.22	0.13	0.16	0.05	0.14	0.63	0.85	0.82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.67	13.82	12.70	12.88	12.11	13.86	15.93	16.31	16.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	1.73	2.13	1.43	1.50	0.91	1.60	5.02	5.82	6.85
MnO	0.04	0.15	0.06	0.04	0.04	0.04	0.16	0.18	0.22
MgO	0.16	0.34	0.12	0.28	0.07	0.27	1.75	2.09	2.32
CaO	0.94	1.00	0.41	1.05	0.30	1.34	4.28	4.95	5.48
Na <sub>2</sub> O	4.39	4.87	4.53	4.60	4.33	4.59	4.58	4.58	4.64
K <sub>2</sub> O	3.85	3.79	4.26	3.47	4.11	3.81	2.36	2.28	2.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.05	0.02	0.03	0.01	0.03	0.21	0.34	0.54
LOI	0.32	0.51	0.24	0.30	0.40	0.43	0.93	1.00	1.31
Total	99.08	100.18	99.30	100.17	100.02	100.55	100.50	100.42	100.50
Q	32.46	27.31	31.61	33.01	35.89	29.55	17.11	13.53	10.04
or	23.08	22.53	25.46	20.58	24.42	22.53	14.06	13.47	12.39
ab	37.61	41.36	38.69	38.97	36.76	38.78	39	38.66	39.68
an	3.51	4.64	1.72	4.23	1.44	5.92	16.02	17.15	18.48
Di	0.9	0.04	0.19	0.68	0	0.46	3.41	4.38	4.81
Hy	1.37	2.64	1.37	1.47	0.96	1.67	6.45	6.23	8.57
mt	0.79	0.96	0.66	0.68	0.41	0.75	2.28	4.21	3.27
il	0.21	0.42	0.25	0.3	0.1	0.27	1.21	1.61	1.58
ap	0.07	0.11	0.04	0.07	0.02	0.07	0.46	0.74	1.19

에서 제작된 국제공인표준물질(Standard Reference Material) 12개와 상용으로 시판되는 표준물질(MBH analytical) 12개이다. 미량원소는 한국기초과학지원연

구원 대전본소에서 ICP-AES와 ICP-MS를 이용하여 분석하였다.

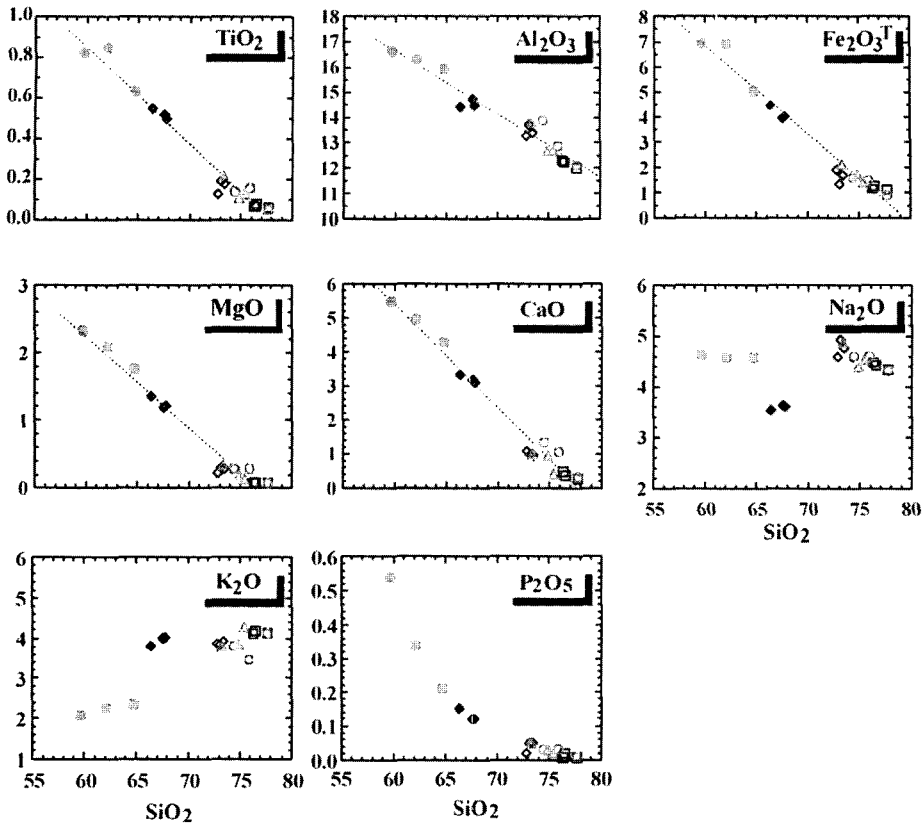


Fig 3. Harker variation diagrams for the Mt. Geumjeong Granite. (Symbols) ●: Tonalite, ◆: Granodiorite, ◇: Hornblende granite, △: Adamellite, ○: Biotite granite, □: Micrographic granite.

### 주성분

부산 금정산지역 화강암류의  $\text{SiO}_2$  함량은 토날라이트 59~64wt%, 화강섬록암 66~68wt%, 기타 화강암류는 72~78wt%이며, 전체적으로 59~78wt%로 중성암에서 산성암에 이르는 다소 폭 넓은 변화폭을 가진다(Table 1).

$\text{SiO}_2$  함량이 증가함에 따라  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ 는 직선상으로,  $\text{P}_2\text{O}_5$ 는 다소 완만하게 점진적으로 감소하는 부(-)의 경향을 보인다. 알칼리 함량은 다소 교란되어 나타난다(Fig. 3). 다만 화강섬록암에서 다른 화강암류로 갈수록  $\text{Na}_2\text{O}$ 는 정(+)의 상관관계를 보이며,  $\text{K}_2\text{O}$ 는 별다른 변화 경향을 보이지 않는다. 이러한 뚜렷한 완만하게 선상(linear)을 이룬 정과 부의 상관관계와 야외에서의 점이적인 암상 변화로 미루어 보아, 금정산 화강암체의 각 암상들은 단일 화강암질 마그마 기원의 분화산물일 것으로 해석된다. 특히, 화강섬록암과 다른 화강암류(각섬석화강암, 아다멜라이트, 흑운모화강암 및 미문상화강암) 사이에 약간의 갭(gap)을 가지면서 이의 반대 쪽 직선상에 토날라이트

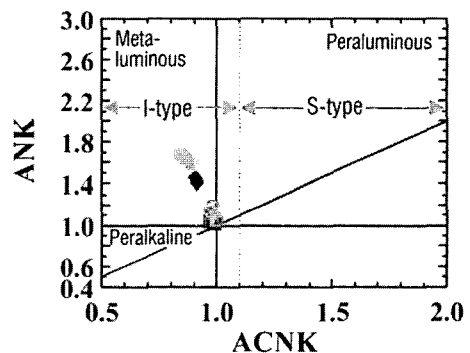


Fig 4. Molar  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  diagram (Maniar and Piccoli, 1989). Symbols are same as those in Fig. 3.

가 분포하는 것으로부터 화강섬록암질 마그마로부터 화강암질암류로 분화되면서 잔류물이 토날라이트를 형성하였을 가능성도 있으며, 또는 화강암질 마그마에 토날라이트질 마그마가 혼합되면서 화강섬록암을 형성하

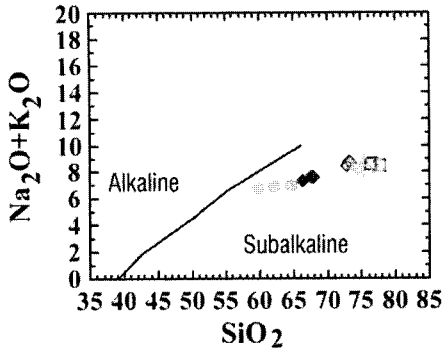


Fig. 5. TAS diagram. The granitic rocks belongs to a subalkaline rock series. Symbols are same as those in Fig. 3.

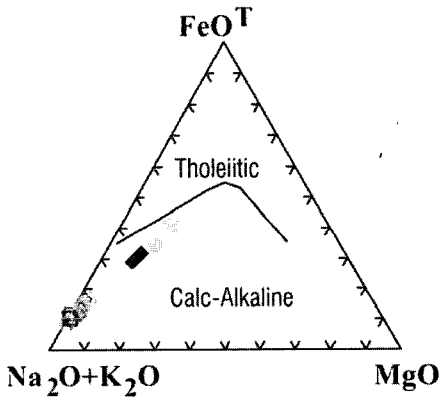


Fig. 6. AFM diagram. The granitic rocks shows a typical calc-alkaline trend. Symbols are same as those in Fig. 3.

였을 가능성도 배제할 수 없다.

ACNK[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)의 몰비]는 평균 1.0 이하의 값을 가지며 I-형 화강암류임을 나타내고(Chappell, 1999), ANK는 1.0~1.7로서 메타알루미늄(metaluminous) 화강암류로 분류된다(Fig. 4).

SiO<sub>2</sub>에 대한 Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O 성분도(Irvine and Baragar, 1971)에서는 모두 서브알칼리암 계열에 해당되며(Fig. 5), AFM 성분도에서는 전형적인 칼크-알칼리암 계열의 변화 경향을 보이며, 화강섬록암 → 각섬석화강암, 아다멜라이트 → 흑운모화강암 → 미분산화강암에로의 분화 경향을 뚜렷이 보인다(Fig. 6).

화강암질암의 분화지수(D.I.)가 80% 이상인 화강암류에 적용 가능한 Q-Ab-Or 성분도(Tuttle and Bowen, 1958)에서 금정산화강암체를 구성하는 화강암류들은 모두 1~5 kbar에서 정치된 것으로 나타나며(Fig. 7), 2 kbar의 포화수증기압 하에서의 Q-Ab-Or 성분도에서는 약 700~720°C에서 정출된 것으로 해석된다(Fig. 8).

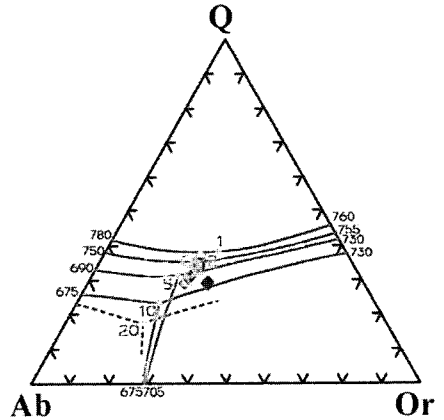


Fig. 7. Normative Q-Ab-Or triangular diagram showing cotectic lines and compositions of H<sub>2</sub>O-saturated minimum and eutectic melts at given pressures. Symbols are same as those in Fig. 3.

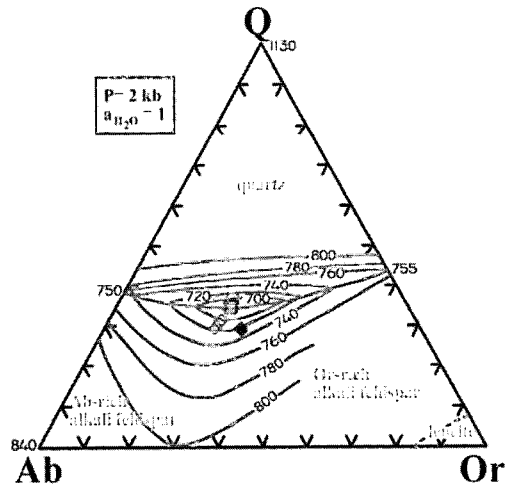


Fig. 8. 2 kbar isobaric equilibrium diagram showing phase relationships for the system Q-Ab-Or-H<sub>2</sub>O projected onto the anhydrous base of the tetrahedron Q-Ab-Or-H<sub>2</sub>O. Symbols are same as those in Fig. 3.

미량성분 및 희토류원소

금정산 화강암체를 구성하는 각 암상별로 희토류원소의 함량(Table 2)을 운석값(Nakamura, 1974)으로 표준화하여 그 변화 경향을 알아보면, 전체적으로 경희토류원소가 중희토류원소에 비하여 부화되어 있는 특성을 보이며, 토날라이트(a)에서 화강섬록암(b), 각섬석화강암(c), 흑운모화강암(e) 및 미분산화강암(f)로 감에 따라 Eu의 부(-)상이 증가함을 잘 보여준다(Fig. 9).

또한, 일부 희토류원소를 포함하여 미량원소(Table 2)의 변화 경향을 MORB 값으로 표준화하여 고찰해

Table 2. Some trace and rare earth element analyses (ppm) of the Mt. Geumjeong granite, Busan.

	KJ-1	KJ-2	KJ-3	KJ-4	KJ-5	KJ-6	KJ-7	KJ-8	KJ-9
Li	9.88	10.80	14.32	4.04	6.24	5.95	22.91	18.53	17.96
P	631	736	787	66	67	57	201	86	291
S	191	202	246	23	84	22	41	95	99
Sc	7.59	8.53	9.77	4.60	4.76	3.68	3.12	2.87	3.89
V	47.56	54.01	62.79	0.69	2.27	0.81	4.52	9.18	5.05
Cr	0.89	2.39	7.81	<0.5	0.79	0.43	1.01	1.16	0.98
Co	68	74	74	173	113	96	180	117	121
Ni	8.3	6.3	6.6	2.4	3.8	3.4	5.8	5.1	4.9
Cu	14.4	11.7	13.8	2.7	2.8	1.8	2.0	4.1	2.3
Zn	58.4	146.4	208.3	40.1	53.7	38.1	25.3	51.0	59.3
Ga	30.8	38.1	42.6	35.2	36.8	38.3	41.9	41.2	43.3
As	2.7	3.9	4.0	1.4	1.1	1.1	1.1	1.8	1.1
Rb	133.0	145.9	158.2	134.5	135.9	132.9	97.0	134.3	94.0
Sr	184.7	221.0	227.3	20.1	29.4	26.2	80.5	109.7	70.5
Y	21.8	25.2	28.5	23.8	33.8	22.7	31.2	27.8	20.3
Zr	102.0	139.3	141.6	94.8	102.1	85.2	117.8	102.8	117.1
Nb	2.3	4.1	3.4	3.2	2.2	6.2	4.2	5.7	3.9
Mo	1.0	1.0	0.7	0.9	1.6	0.8	0.9	1.0	3.4
Cd	0.4	0.5	0.5	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
Sn	2.16	1.83	2.12	1.45	2.16	2.01	1.16	1.86	2.91
Sb	0.45	0.60	0.59	0.31	0.11	0.14	0.10	0.31	0.36
Cs	6.88	6.31	4.44	1.69	2.34	1.88	2.77	5.77	3.95
Ba	443.5	585.8	549.0	502.9	560.5	558.5	648.3	635.0	657.7
La	23.3	27.7	31.0	19.7	29.1	18.8	16.4	18.6	10.9
Ce	47.9	59.4	65.0	40.3	66.9	35.9	35.6	38.8	24.4
Pr	5.9	7.2	8.0	5.6	7.9	5.2	4.5	5.1	3.2
Nd	21.9	25.2	28.5	20.6	27.8	18.8	16.9	19.0	12.7
Sm	4.62	5.36	5.86	4.41	5.70	4.08	3.99	4.38	3.11
Eu	0.79	0.86	0.91	0.29	0.42	0.31	0.37	0.77	0.48
Gd	4.28	4.94	5.75	4.46	5.91	4.12	4.37	4.53	3.24
Tb	0.63	0.71	0.84	0.71	0.91	0.64	0.73	0.73	0.55
Dy	3.93	4.52	5.25	4.61	6.06	4.15	5.08	5.02	3.59
Ho	0.84	0.96	1.07	1.00	1.31	0.91	1.12	1.09	0.80
Er	2.41	2.80	3.22	3.06	4.04	2.60	3.57	3.26	2.50
Tm	0.37	0.40	0.47	0.48	0.59	0.39	0.57	0.51	0.42
Yb	2.41	2.74	3.09	3.29	4.02	2.84	4.12	3.43	2.86
Lu	0.35	0.41	0.43	0.48	0.58	0.41	0.64	0.53	0.44
Hf	3.42	4.24	4.27	3.59	4.00	3.21	4.94	3.36	3.57
Ta	0.44	0.56	0.38	0.62	0.25	0.79	0.59	0.57	0.41
Pb	25.1	25.6	18.5	15.9	15.6	17.0	10.1	20.0	42.1
Th	15.8	16.5	17.8	9.8	11.8	8.7	20.7	12.3	5.3
U	3.5	4.5	4.5	2.0	4.1	2.1	4.3	2.8	1.9

보면, 전체적으로 LIL 원소가 부화되어 있고, 섭입대에 연관된 대륙연변호나 도호에서 특징적으로 나타나는 Nb, P, Ti의 부(-) 이상이 잘 나타난다(Fig. 10). 토날라이트에서 화강섬록암, 각섬석화강암, 흑운모화강암 및

미분상화강암으로 감에 따라 이들의 부(-) 이상은 커지고, 이와 함께 Sr의 부(-) 이상도 증가한다. 이는 사장석의 분별정출작용이 금정산화강암체의 진화에 기여하였음을 암시하는 것이다.



Table 2. Continued.

KJ-10	KJ-11	KJ-12	KJ-13	KJ-14	KJ-15	KJ-16	KJ-17	KJ-18
22.06	11.06	9.06	7.28	3.53	9.67	12.61	18.43	17.35
187	269	105	64	67	100	1139	1612	2496
34	64	18	32	34	125	342	350	363
2.49	4.69	1.82	2.05	3.49	2.72	10.09	11.83	9.83
3.20	4.72	1.06	5.25	1.27	7.46	68.26	94.42	77.98
0.78	0.97	<0.5	<0.5	0.92	1.37	2.03	2.02	2.58
147	273	130	161	164	180	88	60	59
4.4	5.3	1.5	5.0	2.7	4.9	4.5	3.2	2.5
1.8	3.7	1.7	2.6	1.3	2.5	7.2	8.3	14.0
32.5	70.1	39.6	28.1	28.7	18.0	72.8	60.7	119.5
41.3	42.5	37.6	36.6	36.1	38.2	37.6	40.5	38.0
1.4	2.1	2.2	1.0	1.4	0.7	2.6	5.7	4.1
111.8	129.6	121.3	78.3	134.0	109.6	78.7	78.7	82.6
49.1	98.0	19.9	68.3	22.6	100.2	348.8	403.5	533.7
17.7	36.1	9.8	15.2	20.1	25.5	24.0	25.4	24.1
96.6	127.9	122.5	81.4	86.5	104.4	134.8	163.8	96.2
2.2	4.3	0.8	2.4	3.0	1.9	2.0	2.4	7.2
0.7	1.1	0.8	0.4	0.9	0.7	1.2	1.2	1.1
0.2	0.3	0.3	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3
1.27	2.15	1.34	1.37	1.11	0.78	1.74	3.99	2.81
0.27	0.46	0.52	0.10	0.15	0.03	0.26	0.48	0.51
3.13	3.50	7.11	1.42	1.72	1.07	5.04	2.80	6.10
684.2	671.3	559.2	572.4	570.5	715.4	352.5	398.7	362.0
16.3	21.4	4.7	10.2	19.0	23.7	20.7	19.9	22.6
28.2	45.5	11.1	20.9	38.9	46.9	44.2	42.0	49.5
4.4	5.8	1.4	2.7	5.0	5.8	5.7	5.8	6.5
15.4	21.7	5.5	9.6	17.1	19.3	21.3	22.1	25.8
3.09	5.21	1.32	2.14	3.45	3.95	4.52	5.01	5.29
0.17	0.89	0.09	0.38	0.34	0.52	1.20	1.41	1.67
2.96	5.83	1.41	2.30	3.52	4.05	4.61	5.06	5.19
0.46	1.00	0.24	0.39	0.56	0.62	0.71	0.73	0.73
3.04	6.09	1.75	2.69	3.66	4.19	4.37	4.47	4.48
0.67	1.36	0.38	0.60	0.82	0.93	0.92	0.94	0.93
2.11	4.03	1.25	1.81	2.57	3.00	2.75	2.74	2.66
0.34	0.64	0.20	0.32	0.41	0.46	0.38	0.39	0.38
2.48	4.10	1.60	2.11	2.79	3.37	2.67	2.58	2.33
0.40	0.63	0.25	0.33	0.41	0.54	0.40	0.39	0.35
3.60	4.02	4.41	2.65	3.42	3.35	3.43	3.91	2.21
0.27	0.74	0.13	0.32	0.46	0.26	0.13	0.14	0.59
9.8	19.2	15.0	10.4	12.2	10.9	15.8	10.8	15.5
5.2	12.1	1.8	5.2	11.3	12.0	8.4	5.4	4.5
1.1	3.2	0.5	1.5	2.3	3.0	2.3	1.4	1.3

## 조구적 위치

금정산화강암체를 형성한 마그마의 지체구조 위치를 알아보기 위하여 화강암류에 적용하는 Nb-Y관별

도(Fig. 11a)와 Rb-(Y + Nb) 관별도(Fig. 11b)에 도시하여 알아보면, 각 화강암류들은 모두 VAG(화산도호 화강암) 영역에 도시된다. 이는 금정산화강암체를 포함하는 한반도 남동부 지역에 분포하는 백악기 화강

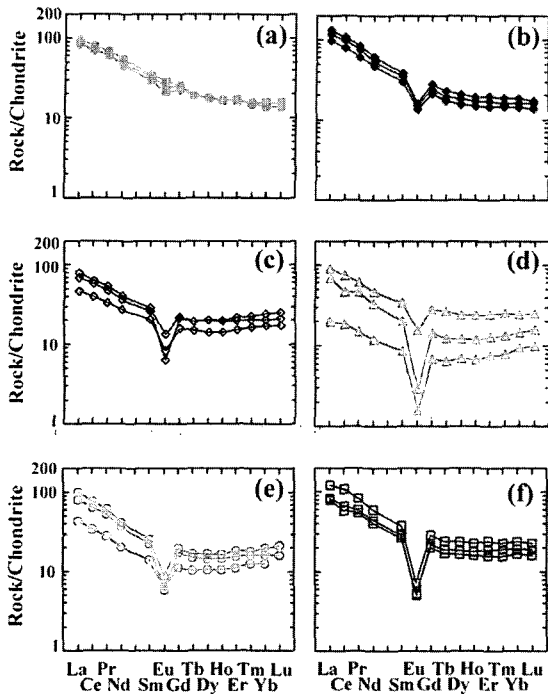


Fig. 9. REE/chondrite-normalized diagram. Symbols are same as those in Fig. 3.

암류가 판구조론과 관련있는 호상열도나 압축응력장이 작용하는 대륙주변부 대륙연변호 환경하에서 형성되었음을 시사한다.

### Rb-Sr 전암 등시선 연대

금정산화강암체를 구성하는 각 암상을 대표하는 화강암류에 대하여 Sr 동위원소 조성을 한국기초과학지원연구원에서 열이온화질량분석기(TIMS)를 이용하여 분석하였다.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값은 0.1194로 보정되었으며, 표준시료 NBS987의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비는  $0.710216 \pm 0.000012$  ( $2\sigma$  standard error)이었으며, Sr의 바탕값은 0.1 ng 이하이다. 분석 결과는 Table 3과 같다.

금정산화강암체의 각 암상별로 전암 Rb-Sr 분석치를 Rb-Sr 등시선 그림에 도시해 보면, 비교적 깨끗한 등시선을 형성하며, 전암 등시선 연대는  $69.6 \pm 1.9$  Ma로 계산되었으며,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초생비는  $0.70503 \pm 0.00015$ 로 계산되었다(Fig. 12). 각 암상별 화강암류가 깨끗한 등시선을 형성하는 것은 이들이 동일기원마그마로부터 분별정출작용을 통하여 진화하였음을 암시한다. 금정산화강암체를 구성하는 화강암류는 백악기말(69.6 Ma 경) 대륙연변호에서 해양판의 섭입작용에 수반된 마그

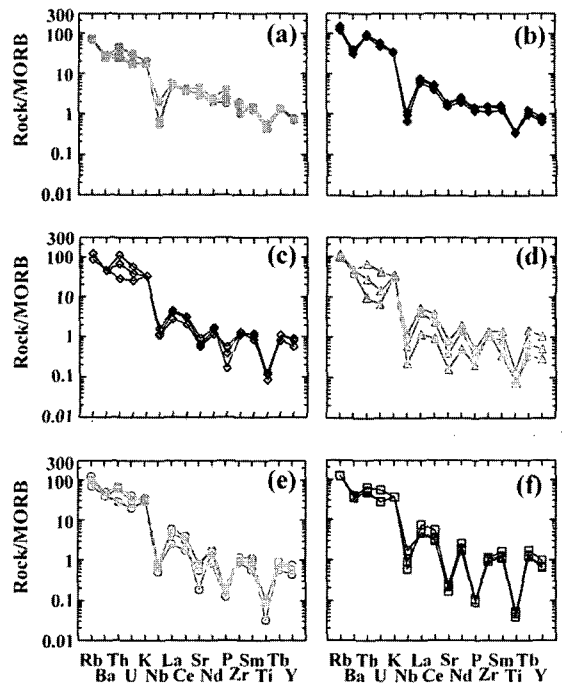


Fig. 10. Spider diagram. Symbols are same as those in Fig. 3.

마작용에 기인하여 형성된 화강섬록암질 마그마로부터 사강석의 분별정출작용을 경험하면서 각섬석화강암, 아다멜라이트, 흑운모화강암, 미문상화강암으로 분화된 것으로 사료된다.

### 토의 및 결론

부산 금정산화강암체는 Rb-Sr 전암 등시선 연대 측정 결과  $69.6 \pm 1.9$  Ma로 백악기말 유라시아대륙 동연부의 대륙연변부를 따라 형성되었던 도호에서의 마그마 작용으로 형성되었음을 보여준다.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초생비는  $0.70503 \pm 0.00015$ 로 맨틀 또는 하부지각의 화성암의 부분용융으로 만들어진 I-type의 마그마로부터 유래되었음을 보여준다. 금정산화강암체내의 흑운모의 K-Ar 연대가 66.7~59.9 Ma, 알칼리장석의 K-Ar 연대가 53.0~50.5 Ma로 보고되어 있으므로, 금정산화강암체는 약 70 Ma에 양산단층과 동래단층 사이에 관입 정지된 후 비교적 빨리 냉각된 것으로 판단된다.

금정산화강암체는 화강섬록암질 마그마로부터 사강석의 분별정출작용을 경험하면서 각섬석화강암, 아다멜라이트, 흑운모화강암, 미문상화강암으로 분화된 것으로 사료된다.

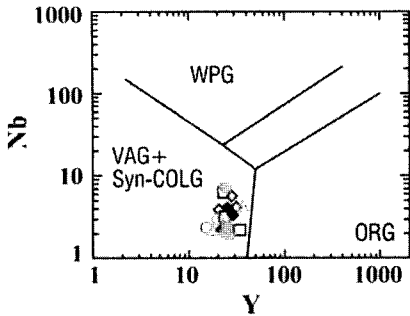


Fig. 11a. Y versus Nb tectonic discriminant diagram for the Mt. Geumjeong granites. Symbols are same as those in Fig. 3.

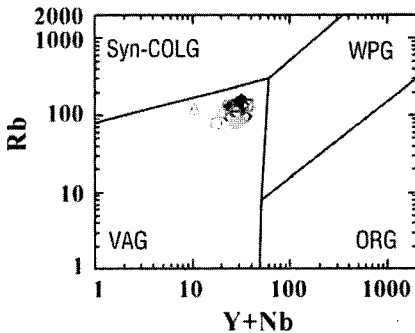


Fig. 11b. (Y+Nb) versus Nb tectonic discriminant diagram for the Mt. Geumjeong granites. Symbols are same as those in Fig. 3.

전암화확조성에 기초하여 계산된 노움광물로부터 구한 마그마의 온도는 화강암류들이 모두 1~5 kbar(평균 2 kbar)에서 정치된 것으로 나타나며, 2 kbar의 포화수 증기압 하에서 약 700~720°C에서 정출된 것으로 해석된다.

SiO<sub>2</sub>에 대한 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 초생비의 상관도(Fig. 13)에서도 금정산화강암체의 각 암석들은 지각물질의 동화에 의한 혼합작용(assimilation)이 거의 없이 화강섬록암으로부터 각섬석화강암, 아다멜라이트 및 흑운모화강암, 미문상화강암으로 사장석의 분별결정화작용(fractional

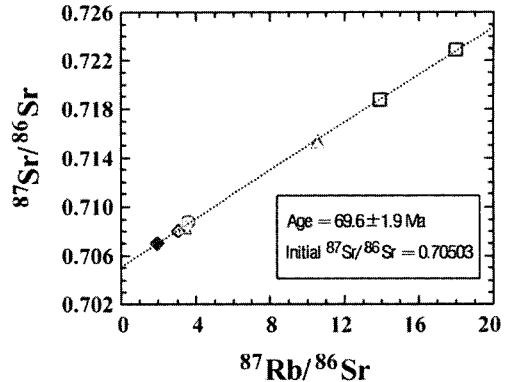


Fig. 12. <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr-<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr diagram for the Mt. Geumjeong granites.

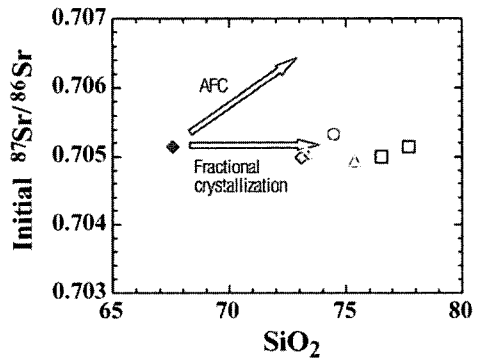


Fig. 13. SiO<sub>2</sub>-initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr diagram for the Mt. Geumjeong granites.

crystallization)에 의해 진화하였음을 잘 보여준다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 2004년도 과학고 영재교육 내실화지원사업 R&E 프로그램과제 지원을 받아 수행되었다. 이 논문 심사과정에 원고를 읽고 자세히 지적 및 보완해 주신 박계현 교수와 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드린다.

Table 3. Sr-isotope compositions of the Mt. Geumjeong granite, Busan.

Sample	KJ-2	KJ-4	KJ-6	KJ-9	KJ-11	KJ-12	KJ-15
Rb (ppm)	153.3	133.7	138.2	120.0	129.2	140.1	121.7
Sr (ppm)	229.9	21.6	28.7	113.5	110.3	38.5	99.1
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.707041	0.722915	0.718773	0.708007	0.708401	0.715372	0.708836
<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	1.929586	17.979290	13.931880	3.059699	3.388257	10.551990	3.554270
2σ	0.000012	0.000014	0.000012	0.000012	0.000011	0.000011	0.000011
Initial Sr	0.705133	0.705137	0.704997	0.704982	0.705051	0.704938	0.705322

## 참고문헌

- 김옥준, 1971, 남한의 신기 화강암류의 관입 시기와 지각 변동, 광산지질, 4, 1-9.
- 손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월래 (1:50,000) 지질도폭 설명서, 1-27. 한국자원개발연구소.
- 이윤중, 윤성효, 김상욱, 고인석, 황상구, 정원우, 김중욱, 이철락, 하야시 마사오, 1999, 부산 금정산 지역 화강암류의 저어론에 대한 형태학적 연구, 암석학회지, 8(2), 71-80.
- 차문성, 1976, 부산지역의 불국사 산성 화성암류의 암석학적 연구, 광산지질, 9, 85-106.
- 황병훈, 2004, 경상분지 남부지역의 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인, 부산대학교 박사학위논문(미발행), 309 p.
- Chappell, B.W., 1999, Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites, Lithis, 46, 535-551.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the common volcanic rocks. Canadian Jour. Earth Sci. 8. 532-548.
- Lee, Y.J., 1980, Granitic rocks from the southern Gyeong-sang basin, southeastern Korea, Part I. General geology and K-Ar ages of granitic rocks. Jour. Min. Petr. Econ. Geol., 75, 105-116 (in Japanese).
- Lee, Y.J., 1982, Granitic rocks from the southern Gyeong-sang Basin, southeastern Korea, Part II. Petrography and modal composition. Jour. Min. Petr. Econ. Geol., 77, 171-180 (in Japanese).
- Maniar, P.D. and Piccoli, P.M., 1989, Tectonic discrimination of granitoids, Geol. Soc. Am. Bull., 101, 1023-1052.
- Nakamura, M., 1974, Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites, Geochim. Cosmochim. Acta, 38, 757-773.
- Tuttle, O.F. and Bowen, N.L., 1958, Origin of granite in the light of experimental studies in the system of  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ . Geol. Soc. Am. Memoir, 74, 153 p.

(2005년 2월 17일 접수; 2005년 3월 10일 채택)