

## 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구: 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제 3기 화강암류와의 비교 고찰

정창식 · 권성택 · 김정민 · 장병욱

기초과학지원연구소 동위원소분석그룹, '연세대학교 지구시스템과학과

**요 약:** 경상분지 북부에 위치한 온정리 화강암의 암석화학적, 동위원소 지구화학적 특징으로부터 암체의 성인과 기원물질의 특징 등을 고찰하였다. 온정리 화강암의 연대에 대해 선백악기, 또는 백악기라는 상반된 견해가 있었으나 야외지질학적인 특징과 K-Ar 자료로 볼 때 백악기 말(87 Ma 내외)로 판단된다. 각섬석 지압계를 적용시켜 보았을 때 온정리 화강암의 정치 압력은 2 kbar 이하로 계산된다. 온정리 화강암의 암석화학적, 동위원소적 특징은 비교적 미 성숙된 호 환경에서 생성되었음을 지시한다. 온정리 화강암의  $\text{SiO}_2$  함량과  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기치는 부(-)의 직선관계를 잘 보이며  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  초기치는 정(+)의 상관관계를 보여 두 단성분 사이의 불완전한 혼합, 또는 동화작용의 가능성을 지시한다. 그러나 현재 노출되어 있는 암체 중 오염체로 고려할 만한 단성분을 찾기는 어려우며 따라서 혼합이나 동화작용을 일으킨 오염체가 하부지각에 위치할 가능성이 높다. 경상분지 내에 분포하는 백악기-제 3기 화강암의 연대와 지화학적, 동위원소적 특징을 정리하고 온정리 화강암의 특징과 비교해 보면 다음과 같은 결론이 얻어진다. 1) 화강암류의 연대는 특정 시기에 집중되는 경향성을 보여 경상 분지에서의 백악기 이후 화성 활동이 불연속적인 사건에 의해 일어났을 가능성이 높다. 2) 화강암류는 젊은(9억년 이내) 하부지각에서 유래되었으며 그 동위원소적 특징은 기원물질의 불균질성을 반영한다고 보아진다. 전반적으로 경상분지 화강암류의 동위원소적 특징과 화학조성은 상부지각 혼염에 의해 조화적으로 설명되지 않는다. 3) 경상분지 화강암류의 암상과 연대, 그리고 동위원소적 특징은 서남 일본 산인 벨트에 분포하는 화강암의 특징과 잘 일치한다. 4) 온정리 화강암의 Sr-Nd 동위원소비는 경상분지와 서남 일본 내대에 분포하는 백악기 이후 암체 중 비교적 초생적인 영역에 해당된다.

**핵심어:** 온정리 화강암, 백악기 말, 미 성숙된 호 환경, 불연속적인 사건, 하부지각

## 서 언

캄차카반도 북부에서 연해주, 서남 일본, 한반도 동남부와 중국 동남부를 잇는 지역은 백악기-제 3기의 심성암과 화산암이 광범위하게 분포하는 유라시아 대륙 활동성 연변부(active continental margin)이다. 활동성 대륙 연변부는 화강암질 마그마가 가장 흔하게 생성되는 지판 경계이며 전 세계 코디레라 형(Cordilleran-type) 조산체의 약 60% 이상이 환태평양지역에 노출되어 있다(Roddick, 1983). 일본은 약 15 Ma에 동해의 확장이 완료되기 이전 유라시아 대륙과 연결되어 있었던 것으로 생각되며(Otofugi and Matsuda, 1984), 일본의 중앙 구조선(Median Tectonic Line) 이북의 서남 내대(Inner Zone)와 남한의 경상분지에는 I-형(Chappell and White, 1974), 칼크 알칼리 계열의

화강암류가 노출되어 있다(김상욱, 1986; 이상만 외, 1987; Jin, 1985; Nakajima, 1996과 포함된 참고문헌). 경상분지와 서남 일본에 분포하는 백악기-제 3기의 화강암류는 대륙호(continental arc)에서의 마그마 생성과정과 기원물질의 섞임, 그리고 대륙지각 및 맨틀암석권의 지화학적 구조 등에 대한 정보를 줄 수 있는 좋은 자연적 실험대상으로 볼 수 있다.

경상분지에 분포하는 화강암류는 전형적인 I-형, 자철석 계열(Ishihara, 1977)의 광물학적, 암석화학적 특징을 보이며(김상욱, 1986; 이상만 외, 1987; Jin, 1980, 1985), 경상분지 밖의 남한지역에 분포하는 화강암에 비해 특징적으로 낮은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비와 높은  $\epsilon_{\text{Nd}}$  값, 덜 방사기원적인(less radiogenic) Pb 동위원소비를 가져(권성택, 1991, 1992; Jin, 1988; Kim *et al.*, 1996; Chang, 1997, Kwon and Sa-

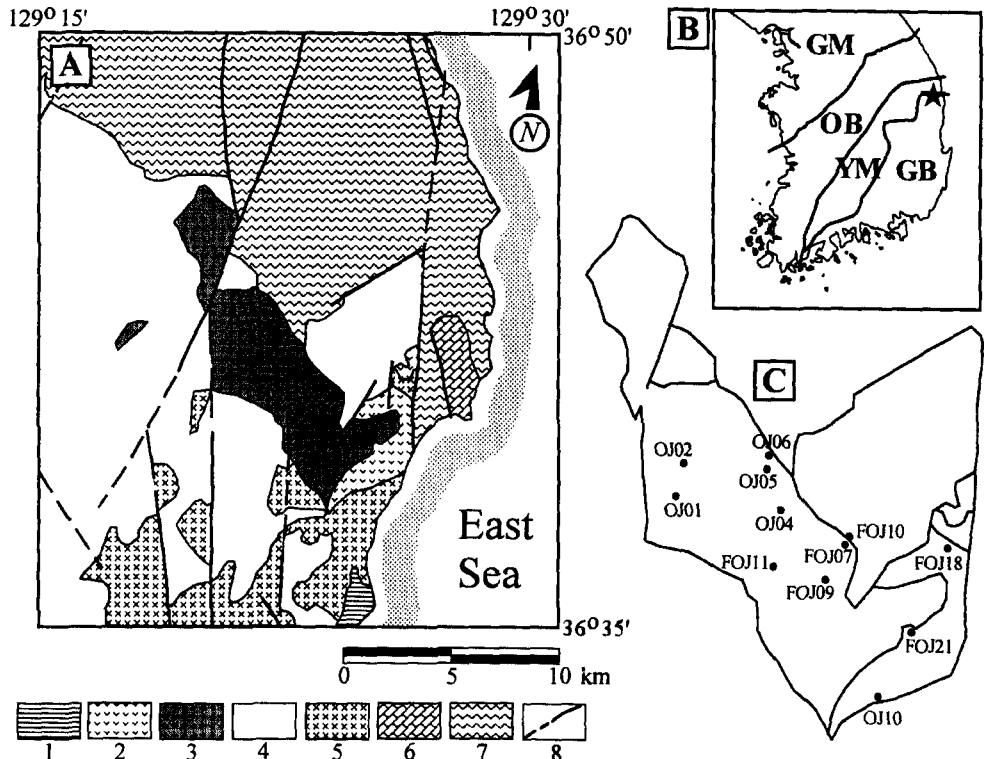
gong, 1997) 맨틀 내지 하부지각에서 기원한 비교적 초생적인 마그마에서 유래된 것으로 판단된다. 경상분지 내 화강암의 Nd 모델연령은 7억 내지 9억년 정도로 경상분지 밖의 화강암에 비해 특징적으로 젊어서(권성택, 1991; Kim *et al.*, 1996) 경상분지 안팎의 기반암 생성시기가 서로 달랐음을 시사한다.

경상분지 북부지역의 경우 경상분지 내에서 일반적으로 산출되지 않는 고생대 말 내지 중생대 초기의 화강암류가 노출되어 있고(Shin and Nishimura, 1993; Cheong *et al.*, 1997) 영남육괴의 선캠브리아기 편마암과 인접해 있어서 백악기 화성활동에 있어 기반암이 준 영향을 평가하기 적합한 지역이다. 이 논문에서는 경상분지 북부에 분포하는 백악기 온정리 화강암의 암석화학적, 광물화학적, Sr-Nd-Pb 동위원소 지구화학적 조성으로부터 암체의 성인, 정치 환경과 기원물질의 특징 등을 고찰한다. 그리고 기존에 발표된 경상분지와 서남 일본 화강암류의 연대

와 동위원소적 특징을 정리하고, 경상분지와 서남 일본의 화성활동 사이의 시, 공간적 및 성인적 관계를 논의한다.

## 경상분지 북부의 지질 개요

이번 연구의 대상이 되는 온정리 화강암은 경상분지와 영남육괴가 접하는 경상분지 북부에 위치한다(Fig. 1). 온정리 화강암에 대해 김옥준 외(1963)는 경상누층군의 퇴적암류에 의해 부정합으로 덮이는 선백악기 암체로 생각하였고 주승환 외(1982)는 280 Ma 내외의 Rb-Sr 전암연대를 보고한 바 있다. 또 영양 도폭(김상욱과 박봉순, 1970)에서는 선백악기 영덕 화강암체의 일부를 온정리 화강암으로 취급하였다. 그러나 김중욱(1989)은 온정리 화강암이 온정리 남부 지역에서 하양층군의 기저역암인 울련산층을 관입하며 열변성 시켰다고 기술하였으며 이번 연구에서도 온정리 화강암과 경상누층군



**Fig. 1.** A) Geologic map of the study area (modified after Kim(1989) and Hwang *et al.*(1996)). Legends (1; Yeonil group, 2; Aplite and porphyry, 3; Onjeongri granite, 4; Gyeongsang supergroup, 5; Pre-Cretaceous granites, 6; Hupori formation, 7; Precambrian basement, 8; Fault(dashed line; inferred fault)). B) Index map. The star indicates the location of the study area (GM; Gyeonggi Massif, OB; Ogcheon Belt, YM; Yeongnam Massif, GB; Gyeongsang Basin). C) Sample locations.

퇴적층사이의 접촉부를 조사해 본 결과 퇴적층이 열변성을 받아 호온펠스화된 것을 확인할 수 있었다(온정리 남동부 지역 양천 마을 인근 하상; FOJ 10 지점, Fig. 1). Shin and Nishimura(1993)는 온정리 화강암의 저어콘, 스피넬, 인회석 피선티랙 연대(85.5~44.3 Ma)와 각섬석 K-Ar 연대(87.1±2.1 Ma)를 보고한 바 있다. 이 연대와 이번 연구의 야외조사 결과 및 후술할 흑운모 광물연대를 종합해 볼 때 온정리 화강암의 관입시기는 백악기로 처리하여야 할 것으로 판단된다. 온정리 화강암의 암상은 대개 중립 내지 조립질의 각섬석-흑운모 화강섬록암이며 때때로 0.5 내지 1 cm 크기의 담홍색 K-장석 반정이 성장해 있다. 경하관찰에 의하면 석영, 사장석, K-장석, 흑운모, 각섬석으로 주구성되며 그 외 인회석, 스피넬, 갈염석, 저어콘과 불투명광물이 부수적으로 함유된다. K-장석 반정은 퍼다이트(perthite)이며 사장석의 광학적 분대(zoning)가 잘 관찰된다.

온정리 화강암의 분포 지역 동쪽 금음리, 삼울리 일대에는 운모가 거의 보이지 않는 애플라이트(aplite)와 반암류가 분포한다. 이 암체에 대해 평해도폭(김옥준 외, 1963)에서는 온정리 화강암의 연장부로 처리했고 김중욱(1989)은 선백악기의 영덕 화강암으로 취급하였다. 그러나 이 암체의 암상과 암석화학적 특징은 연구지역의 남쪽에 위치하는 영덕 화강암과 전혀 다르며, 각섬석 K-Ar 연대가 170~189 Ma인(김상중, 1997; Cheong *et al.*, 1997) 조립질의 영해 섬록암을 관입하며 열수변질시킨 것이 금곡 초등학교-산가을 마을 사이 채석장(OJ10 지점, Fig. 1)에서 잘 관찰되므로 영덕 화강암의 일부로는 취급될 수 없다. 이 암체와 온정리 화강암 사이의 관계는 야외에서 확인하지 못하였으나 후술할 지구화학적 자료를 검토해 볼 때 별개의 암체로 구분되어야 할 것으로 생각된다.

온정리 북부 평해 지역에는 선캠브리아기의 변성 퇴적암류인 평해층군과 원남층군이 분포하고 이를 우백질의 반상변정질 편마암이 주를 이루는 평해편마암이 관입하고 있다(김옥준 외, 1963).

온정리 지역 남쪽 영덕, 영해 지역에는 고생대 말 내지 중생대 초로 생각되는(Shin and Nishimura, 1993; Cheong *et al.*, 1997) 화강암류가 분포하는데 암상과 지구화학적 특징에 따라 영덕 화강암과 영해 섬록암으로 나눌 수 있다(김중욱, 1989; Cheong *et al.*, 1997). 이들 선백악기 화강암류는 경상누층군의 퇴적암류에 의해 부정합 관계로 덮인다.

연구지역 전반에 걸쳐 남북방향의 단층대가 발달

해 있는데 대부분의 단층들은 구조선의 동측이 함몰된 정단층의 양상을 보이며 경사는 70° 내지 수직에 가깝다(김중욱, 1989).

### 시료 및 분석방법

온정리 화강암 8개 시료와 장석 반암, 애플라이트 각 1개 시료에 대해 주성분원소, 미량원소 조성을 분석하였고 그 중 온정리 화강암 5개 시료에 대해 Sr-Nd-Pb 동위원소비를 분석하였다. 온정리 화강암 한 시료(OJ04)의 흑운모에 대해 Rb-Sr, K-Ar 연대측정이 실시되었고 4개 시료의 각섬석에 대해 전자현미분석을 시행하였다. 주성분 원소 조성은 기초과학지원연구소 서울 분소와 서울대학교 기초과학 교육연구 공동기공원에서 측정되었고 미량원소, 동위원소 분석과 전자현미분석, K-Ar 연대측정은 기초과학지원연구소 대전 분소에서 실시되었다. 시료 채취 위치와 각 시료의 암석학적인 특징은 Fig. 1과 Table 1에 표시되어 있다. 채취된 전암 시료는 표면의 풍화된 부분을 제거한 후 텅스텐 카바이드 재질의 분쇄기를 사용하여 분말시료로 만들었다. OJ04 시료의 흑운모는 자력분리기를 사용한 다음 실체 현미경 하에서의 수작업(hand-picking)으로 분리하였으며 초순수(MilliQ water)와 아세톤으로 2~3회 세척하였다.

주성분원소는 X선형광분석기에 의해 측정되었다. 미량원소 조성은 최만식 외(1994)의 방법으로 암석분말 시료를 산분해 시킨 후 유도결합플라즈마 분광분석기(ICP AES)와 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP MS)로 측정되었다. 미국지질조사소의 표준물질(RGM-1)을 같은 방법으로 분석해 보면 추천치와 비교해서 주성분원소의 경우 5%, 희토류원소를 제외한 미량원소는 15%, 희토류원소는 10% 이내의 차이를 보인다.

Sr-Nd-Pb 동위원소비는 양이온교환칼럼화학과 음이온교환칼럼화학으로 시료를 전처리한 후 열이온화 질량분석기(VG 54-30 모델)로 측정되었다. 동위원소비 측정과 동시에 동위원소희석법으로 Rb, Sr, Sm, Nd의 농도를 정량하였다. Sr, Pb 동위원소비는 NBS987, NBS981 표준물질의 분석 평균치(NBS987의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71006\pm 0.00003$ ,  $N=23$ ,  $2\sigma$  표준오차, NBS981의  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=16.902\pm 0.005$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.466\pm 0.009$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=36.63\pm 0.02$ ,  $N=14$ ,  $2\sigma$  표준오차)와 추천치(NBS987의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710250$ , NBS981의 경우 Todt *et al.*(1996)의 값)를 기준으로 보정하여 보고하며 Nd 동위원소비는

**Table 1.** Location and petrography of analyzed samples.

sample	location (latitude/longitude)	petrography <sup>1</sup>
OJ01	36°42'13" / 129°20'39"	c.g. Hbl-Bt granite, pinkish Kfs as phenocryst.
OJ02	36°42'50" / 129°20'55"	c.g. Hbl-Bt granite, pinkish Kfs as phenocryst.
OJ04	36°41'59" / 129°22'45"	m.g. Hbl-Bt granite
OJ05	36°42'41" / 129°22'28"	c.g. Hbl-Bt granite
OJ06	36°43'01" / 129°22'40"	m.g. Hbl-Bt granite
FOJ07	36°41'27" / 129°23'55"	m.g. Hbl-Bt granite
FOJ09	36°40'50" / 129°23'23"	c.g. Hbl-Bt granite
FOJ11	36°41'04" / 129°22'38"	m.g. Hbl-Bt granite
FOJ18	36°41'26" / 129°25'58"	feldspar porphyry
FOJ21	36°39'56" / 129°25'15"	aplite

1. m.g.(medium-grained), c.g.(coarse-grained). Hbl(hornblende), Bt(Biotite), Kfs(K-feldspar)

보정 없이 보고한다. 연구기간 중 La Jolla 표준물질의  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비 분석 평균치는  $0.511872 \pm 0.000010$  ( $N=15$ ,  $2\sigma$  표준오차) 이었다. 실험과정의 총 바닥값은 Rb, Sr, Sm, Nd의 경우 0.5 ng 이하, 그리고 Pb의 경우 1 ng 이하로 시료내 이들 원소의 농도를 고려할 때 무시할 만한 수준이었다. 흑운모의 Rb-Sr 연대는 Ludwig(1994)의 ISOPLOT 프로그램을 사용하여 계산하였다.

각섬석의 화학조성은 CAMECA SX51 모델 전자현미분석기를 사용하여 구하였다. 분석시 가속전압은 15 kV, 빔(beam) 직경은 1  $\mu\text{m}$ , 그리고 빔 전류는 20 nA 였다. 분석결과에 보정은 PAP 방법에 의했다.

K-Ar 연대측정시 K의 함량은 "K 스파이크를 이용하여 동위원소희석법으로 측정하였으며 그 오차는 1% 이내로 평가된다(박계현 외, 1996). Ar 동위원소비는 Ar 추출라인과 연결된 VG 5400 모델 불활성기체 질량분석기(static vacuum mass spectrometer)로 측정되었다. K-Ar 연대계산에 사용된 붕괴상수는 Steiger and Jäger(1977)를 참조하였다.

## 분석결과 및 해석

### 화학조성

#### 주성분원소

Table 2에 전암 시료의 화학분석 결과를 종합하였다. 온정리 화강암 8개 시료는 좁은 범위의  $\text{SiO}_2$  함량변화(66.53 wt.%~69.67 wt.%)를 보인다. 장석반암과 애플라이트 시료는 온정리 화강암에 비해 높은  $\text{SiO}_2$  함량을 가진다. 하커 그림(Harker variation diagram)에 점시킬 경우(Fig. 2) 온정리 화강암 시료

와 장석 반암, 애플라이트 시료 사이에서 성분 차이가 잘 인지된다. 즉  $\text{SiO}_2$  성분이 증가하면서  $\text{P}_2\text{O}_5$ , MgO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  (total Fe),  $\text{TiO}_2$ , CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  성분은 감소하며  $\text{K}_2\text{O}$  성분은 증가한다. 애플라이트 시료의 경우 특징적으로 낮은  $\text{Na}_2\text{O}$  함량을 가진다. 온정리 화강암만 볼 경우  $\text{SiO}_2$  함량변화가 작아서 경향성이 뚜렷하지는 않으나 고철질 암석에 주로 농집되는  $\text{P}_2\text{O}_5$ , MgO,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$ ,  $\text{TiO}_2$ , CaO 함량에서  $\text{SiO}_2$  성분의 증가에 따른 감소경향이 비교적 잘 인지된다.

온정리 화강암의 주성분원소 조성을 AFM 도에 점시해 보면(Fig. 3) 칼크 알칼리 계열에 해당되며 장석 반암, 애플라이트 암석은 분화의 최말기 영역에 해당된다.  $\text{SiO}_2$ -알칼리 관계도(Fig. 4)에서 분석된 시료는 모두 서브 알칼라인(subalkaline) 영역에 해당되며 온정리 화강암은 화강섬록암의 영역에 점시되고 장석 반암, 애플라이트는 화강암의 영역 밖에 찍힌다. 온정리 화강암의 Al 포화지수는 0.99에서 1.05 정도로(Table 2의 A/CNK) 메타알루미너스(metaluminous)와 퍼알루미너스(peraluminous) 영역 경계에 해당되며 Chappell and White(1974)의 I-형, S-형 화강암 구분경계인 1.1을 넘지 않는다(Fig. 5). 장석 반암과 애플라이트 시료의 Al 포화지수는 온정리 화강암과 비슷하지만 상대적으로 높은 알칼리 함량을 보인다.

온정리 화강암 시료의 주성분원소 조성을 Batchelor and Bowden(1985)이 분류한 구조조도에 점시해 보면(Fig. 6) 해양지각의 섭입과 연관된 pre-plate collision 영역, 또는 대륙 충돌과 연관된 syn-collision 영역에 해당된다. 하지만 동시 충돌형 화강암은 대륙 충돌과 동시에 상부지각의 부분융융에 의해 만들어지는 우백질 화강암으로 대표되며 특징적으로 높은 운모 함량과 높고 제한적인  $\text{SiO}_2$  wt.%를 보이는 전형

**Table 2.** Chemical compositions of analyzed samples. Major elements are given in weight % oxides, trace elements in ppm.

	OJ01	OJ02	OJ04	OJ05	OJ06	FOJ07	FOJ09	FOJ11	FOJ18	FOJ21
SiO <sub>2</sub>	69.67	67.95	68.70	68.36	66.53	67.14	67.98	67.13	73.15	76.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.80	15.48	15.37	15.49	15.44	15.25	15.23	15.12	13.43	12.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	3.21	3.57	3.23	3.44	4.36	3.78	3.45	3.31	1.34	0.85
TiO <sub>2</sub>	0.36	0.39	0.37	0.38	0.50	0.42	0.36	0.38	0.12	0.10
MnO	0.08	0.08	0.07	0.08	0.10	0.09	0.07	0.07	0.03	0.04
CaO	2.67	2.91	2.90	3.04	3.34	3.13	3.02	2.97	1.05	0.65
MgO	1.03	1.20	1.10	1.18	1.64	1.20	1.05	1.08	0.03	0.08
K <sub>2</sub> O	3.48	3.55	3.74	3.60	3.22	3.59	3.59	3.84	4.96	5.67
Na <sub>2</sub> O	3.40	3.41	3.50	3.57	3.42	3.59	3.56	3.50	4.02	2.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.13	0.12	0.13	0.14	0.13	0.13	0.13	0.02	0.01
L.O.I. <sup>2</sup>	0.99	1.11	0.55	0.56	1.24	0.56	0.91	0.79	0.55	0.25
total	99.80	99.78	99.65	99.83	99.93	98.88	99.35	98.32	98.70	99.58
A/CNK <sup>3</sup>	1.04	1.05	1.02	1.01	1.02	0.99	1.00	0.99	0.97	1.07
Ba	596	613	567	528	567	632	595	639	1212	732
Sr	321	363	340	354	387	392	346	355	321	207
Ga	13	11	13	14	15	18	18	18	18	13
V	42	49	42	46	72	56	50	49	7	7
Ni	2.4	2.3	2.4	2.8	2.9	1.7	1.3	1.5	0.1	0.3
Nb	7.1	3.9	4.4	5.1	5.4	0.6	5.6	5.6	1.4	4.3
Rb	105	104	113	107	88	94	94	97	125	107
Y	19	14	15	15	17	14	13	12	3	3
Cs	2.3	2.7	2.4	2.3	2.1	1.8	2.3	2.6	2.4	1.1
U	4.2	2.6	3.8	2.9	3.4	3.2	2.6	2.5	4.4	0.7
Th	11.7	10.7	13.3	11.6	13.9	10.7	13.9	9.5	15.6	4.9
Pb	9.5	9.3	9.6	9.9	8.6	8.7	8.3	8.3	21.6	40.8
La	25.58	26.35	20.47	19.64	28.08	20.62	24.35	11.87	26.37	8.56
Ce	46.79	45.16	39.11	38.50	51.34	39.84	48.11	24.36	47.62	19.78
Pr	5.54	5.35	4.37	4.29	5.91	4.47	5.09	2.77	4.26	1.88
Nd	19.45	18.54	15.70	15.39	21.00	15.96	17.36	10.68	12.38	6.01
Sm	3.74	3.32	3.16	3.03	3.93	3.04	3.04	2.32	1.51	0.92
Eu	0.84	0.93	0.86	0.82	0.98	0.87	0.77	0.76	0.45	0.46
Gd	3.69	3.21	3.09	3.17	3.86	2.81	2.64	2.09	0.91	0.62
Tb	0.57	0.45	0.46	0.46	0.54	0.45	0.41	0.34	0.13	0.10
Dy	3.45	2.73	2.71	2.74	3.18	2.62	2.32	2.03	0.60	0.53
Ho	0.70	0.52	0.53	0.54	0.62	0.49	0.44	0.40	0.10	0.11
Er	2.18	1.58	1.67	1.65	1.89	1.47	1.36	1.16	0.31	0.39
Tm	0.35	0.24	0.26	0.26	0.29	0.23	0.19	0.18	0.05	0.07
Yb	2.42	1.61	1.75	1.83	1.94	1.59	1.43	1.24	0.38	0.48
Lu	0.39	0.25	0.27	0.29	0.30	0.23	0.22	0.19	0.06	0.09
Eu/Eu*	0.69	0.87	0.84	0.81	0.77	0.91	0.83	1.06	1.18	1.85
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.12	11.04	7.90	7.23	9.76	8.75	11.48	6.46	47.24	12.09
ΣREE	115.69	110.23	94.40	92.62	123.85	94.68	107.73	60.39	95.12	39.99

1) Total Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2) Loss on ignition, 3) Molar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O).

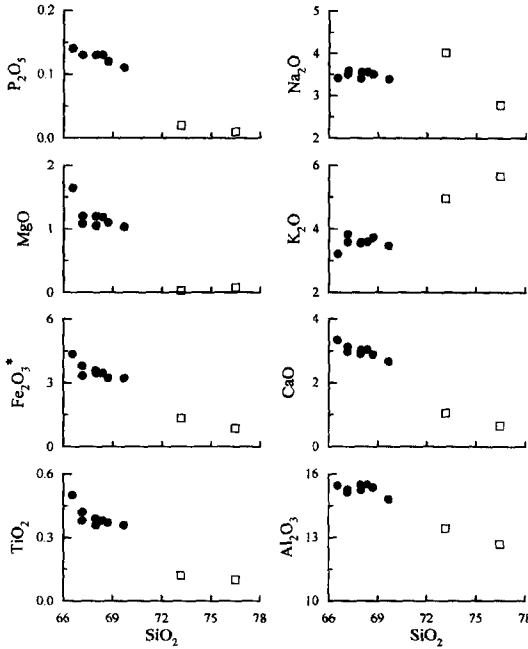


Fig. 2. Major element variation diagrams. Solid circles represent the Onjeongri granite samples, and open squares the aplite and porphyry samples.

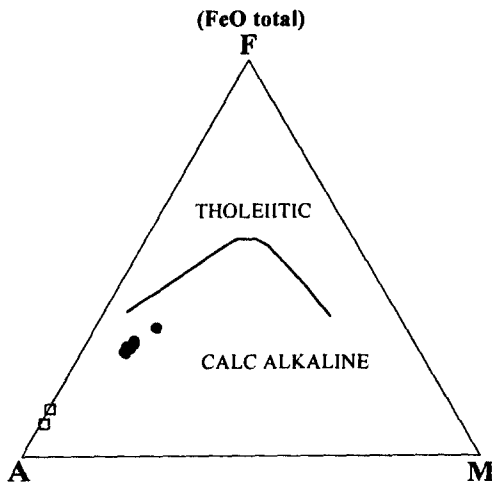


Fig. 3. The AFM diagram. The boundary between tholeiitic and calc-alkaline fields is from Irvine and Baragar(1971). Symbols are the same as those in Fig. 2.

적인 S형 화강암체로서(Pearce *et al.*, 1984; Harris *et al.*, 1986) 온정리 화강암의 특징과는 전혀 다르다. 따라서 Fig. 6에서 온정리 화강암의 위치는 분화가 진행된 pre-collision 화강암임을 의미하는 것으로 생각된다.

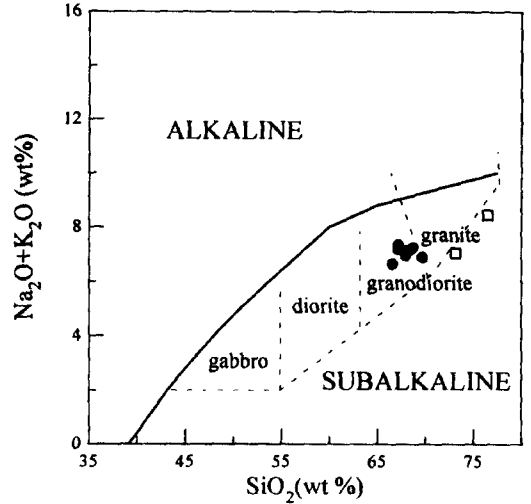


Fig. 4. The subdivision(Irvine and Baragar, 1971) and classification(Wilson, 1989) of the granite samples using total alkali versus silica diagram. Symbols are the same as those in Fig. 2.

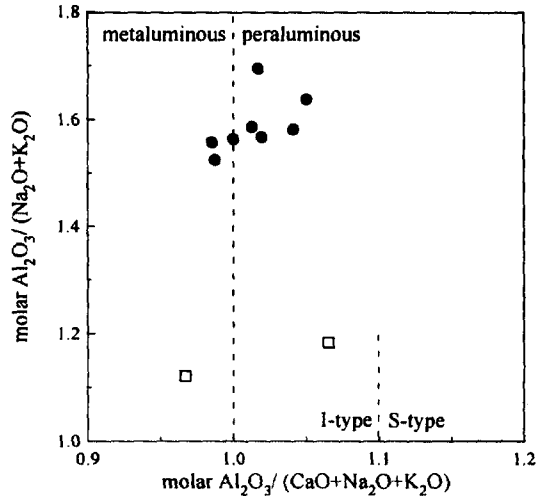


Fig. 5. Molar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) vs. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) diagram. Symbols are the same as those in Fig. 2.

**미량원소와 희토류원소**

하커 그림상에 미량원소 조성을 점시해 보면 Fig. 7과 같다. 장석 반암과 애플라이트는 온정리 화강암에 비해 Ni, V, Sr, Y의 함량이 낮고 Ba, Pb, Rb의 함량이 높은 편이다. 장석 반암의 Ba, Rb 함량은 분석된 시료 중에서 제일 높은데 이는 K-장석의 정출과 연관된 현상으로 생각된다. 온정리 화강암에서는 SiO<sub>2</sub> 성분의 증가에 따른 V, Sr의 감소 경

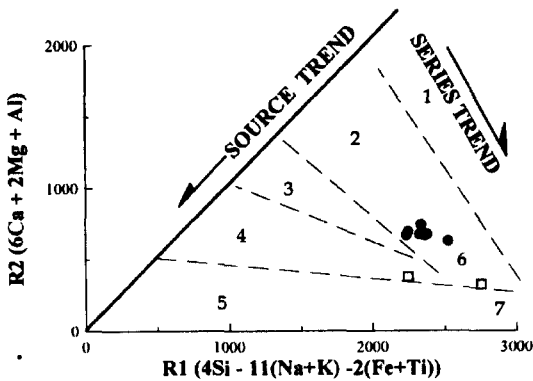


Fig. 6. The R1-R2 multicationic diagram. Symbols are the same as those in Fig. 2. Tectonic discrimination fields are after Batchelor and Bowden(1985) (1; Mantle fractionates, 2; Pre-plate collision, 3; Post-collision uplift, 4; Late-orogenic, 5; Anorogenic, 6; Syn-collisional, 7; Post-orogenic).

향성과 Rb의 증가 경향성이 뚜렷하며 나머지 원소들은 함량 변화가 별로 없거나(Ba, Pb) SiO<sub>2</sub> 성분과 관련된 규칙적인 변화 경향성을 보이지 않는다(Nb, Ga, Th, U, Cs, Y).

미량원소 조성을 Pearce *et al.*(1984)의 조구조 판별도에 도시해 보면 분석된 시료 모두 화산호 화강암 영역에 해당된다(Fig. 8). 이는 주성분원소 함량을 이용한 해석과도 일치하며(Fig. 6), 거미 그림(Fig. 9)에서도 확인된다. 분석된 시료의 함량을 중앙해령현무암의 농도(Pearce, 1983; Bevins *et al.*, 1984)로 표준화 시켰을 때 친석원소(LILE; large ion lithophile elements)의 부화과 Nb, P, Ti의 결핍이 두드러지게 나타나는데(Fig. 9), 이는 모두 화산호 환경에서 만들어진 산성 마그마의 전형적인 특징이다(Condie, 1989; Wilson, 1989).

콘드라이트 값(Boynton, 1984)에 표준화 시킨 희토류원소 분포양상은 Fig. 10과 같다. 온정리 화강암 시료의 경우 (La/Yb)<sub>N</sub> 비가 6.46~11.48로 비교적 일정하며 1 시료(FOJ11)를 제외하고는 약한 Eu (-) 이상치를 보인다. 남한에 분포하는 백악기 화강암류의 일반적 특징((La/Yb)<sub>N</sub>=9.7±7.5, Eu/Eu\* = 0.48±0.26; Kwon and Sagong, 1997)과 온정리 화강암의 자료를 비교해 보면 LREE/HREE 비는 유사하지만 Eu (-) 이상은 뚜렷하지 않다. 온정리 화강암의 REE 분포양상은 SiO<sub>2</sub> 함량과 별 관계를 보이지 않는다. 장석 반암과 애플라이트 시료의 REE 분포양상은 온정리 화강암과 잘 구별된다. 두 시료 모두 온정리 화강암 보다 높은 LREE/

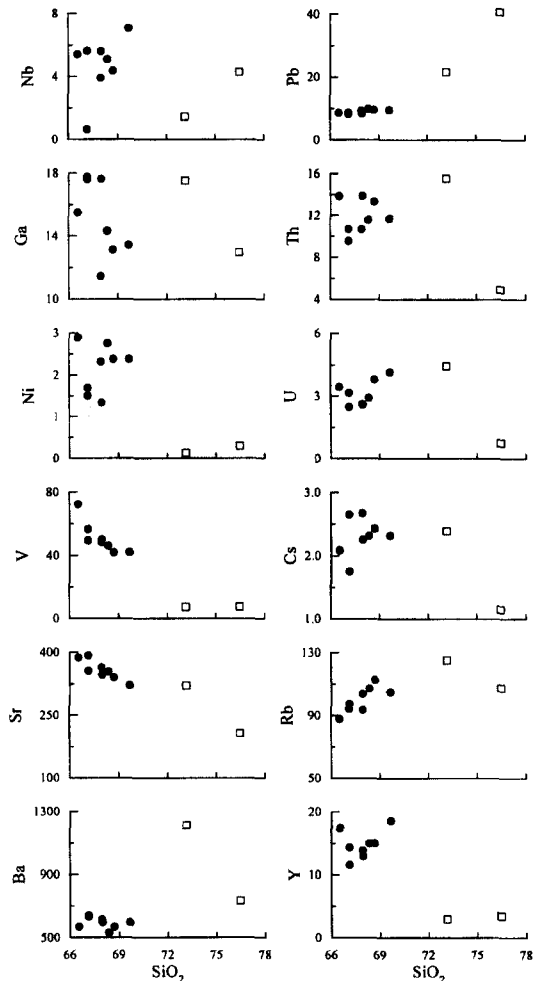
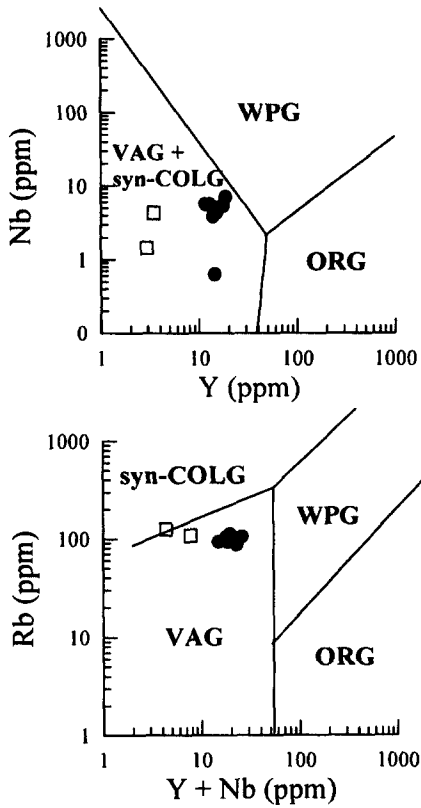


Fig. 7. Trace element variation diagrams. Symbols are the same as those in Fig. 2.

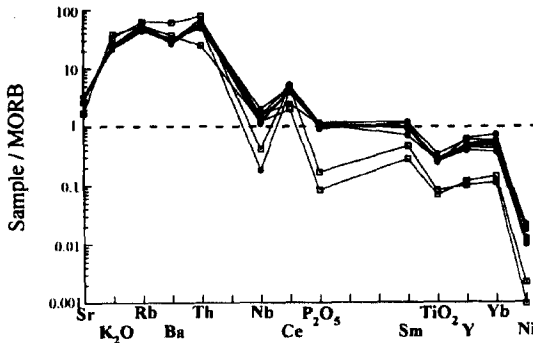
HREE 비를 보이며 Eu (+) 이상치를 보여 온정리 화강암과 다른 마그마기원일 가능성을 시사한다. 만약 그 두 시료가 온정리 화강암의 분화말기 암석이라면 온정리 화강암에서 흔히 보이는 장석에 의한 분별 효과가 보여야 하지만 두 시료의 Eu (+) 이상치는 그와 비조화적이기 때문이다.

### Sr-Nd-Pb 동위원소 조성

Table 3에 동위원소 분석결과를 요약하였다. 전암의 현재 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 비는 일정하며 (0.706309~0.706458) <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr 비는 비교적 좁은 범위에서 변해서(0.63~0.97) 전암에 의한 Rb-Sr 등시선은 정

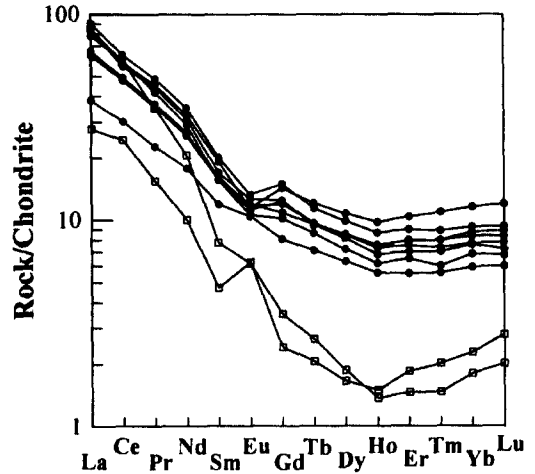


**Fig. 8.** Tectonic discrimination diagrams(Pearce *et al.*, 1984). Abbreviations : VAG(volcanic arc granite), syn-COLG(syn-collisional granite), ORG(oceanic ridge granite), WPG(within plate granite). Symbols are the same as those in Fig. 2.



**Fig. 9.** Multi-element spider diagram of analysed samples. Mid-oceanic-ridge-basalt normalization factors are those of Pearce(1983) and Bevins *et al.*(1984). Symbols are the same as those in Fig. 2.

의되지 않는다(Fig. 11). Fig. 11에서 보는 바와 같이 280 Ma 내외로 보고된 주승환 외(1982)의 자료



**Fig. 10.** Chondrite normalized REE patterns of analysed samples. Chondrite values are those of Boynton(1984). Symbols are the same as those in Fig. 2.

역시 재검토해 보면 분산정도가 심해 연대의 의미가 있는 등시선으로 보기 어렵다. 87 Ma(Shin and Nishimura, 1993의 K-Ar 각섬석 연대)로 계산된  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소비 초기치는 0.7051~0.7056 범위이다. OJ04 시료 전암과 흑운모의 Rb-Sr 동위원소 조성으로부터  $82 \pm 1$  ( $2\sigma$ ) Ma의 전암-흑운모 연대가 구해진다.

전암의  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비와  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  비로부터 구해진 결핍맨틀 모델연령( $T_{DM}$ )은 0.78~0.81 Ga 범위이며, 87 Ma로 계산된  $\epsilon_{Nd}(t)$  값은 -1.17~-0.05 정도이다. 모델연령 계산시 결핍맨틀의 Sm-Nd 동위원소 조성은 Michard *et al.*(1985)의 값으로 가정하였다.

온정리 화강암 전암의  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  관계와  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  관계를 Fig. 12에 나타내었다.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  관계도에서 3 시료(OJ01, OJ05, OJ06)는 Zartman and Doe(1981)의 플룸보텍토닉 모델(plumbotectonic model) 조산체(orozone) 진화선 위쪽에 접시되지만 2 시료(OJ02, OJ04)는 아래쪽에 찍힌다.  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  관계도에서는 모든 시료가 조산체 진화선 위쪽에 접시된다. 상대적으로 덜 방사기원적인 Pb 동위원소비를 가지는 두 시료(OJ02, OJ06)는 다른 시료에 비해  $\text{SiO}_2$  함량이 낮고 상대적으로 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  동위원소비 초기치를 갖는다. 경상분지 다른 지역에 분포하는 백악기 화강암류의 Pb 동위원소비(Chang, 1997)와 비교해 볼 때(Fig. 12) 온정리 화강암은 상대적으로 높은  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  비를 가진다. 그러나 지각에 의



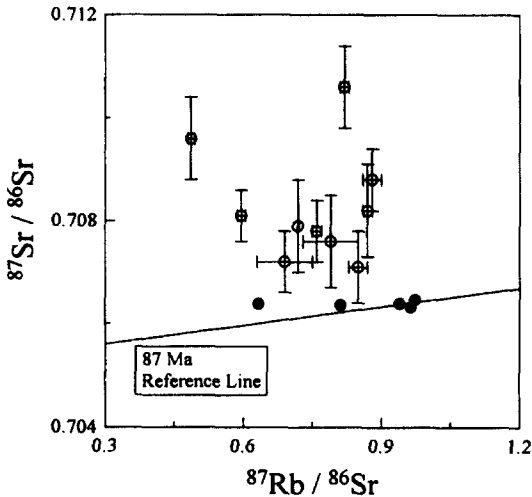
**Table 3.** Sr-Nd-Pb isotopic composition of the Onjeongri granite sample.

Sample	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sup>1</sup>	Rb (ppm)	Sr (ppm)	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr (87 Ma)	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd <sup>1</sup>	Nd (ppm)
OJ01	0.706309 (6)	111.3	334.0	0.9641	0.7051	0.512557 (4)	18.69
OJ02	0.706359 (7)	105.2	374.9	0.8118	0.7054	0.512529 (6)	17.34
OJ04	0.706458 (8)	121.2	360.2	0.9733	0.7053	0.512592 (9)	15.94
OJ04 Bt <sup>3</sup>	0.805648 (52)	379.4	12.89	86.0			
OJ05	0.706388 (8)	114.6	352.5	0.9402	0.7052	0.512583 (4)	15.97
OJ06	0.706376 (8)	87.7	400.6	0.6332	0.7056	0.512553 (7)	20.08

Sample	Sm (ppm)	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	T <sub>DM</sub> <sup>2</sup> (Ga)	ε <sub>Nd</sub> (t) (87 Ma)	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb
OJ01	3.63	0.1176	0.81	-0.71	18.912	15.631	39.160
OJ02	3.15	0.1100	0.80	-1.17	18.675	15.533	38.730
OJ04	3.15	0.1197	0.78	-0.05	19.029	15.624	38.997
OJ04 Bt <sup>3</sup>							
OJ05	3.14	0.1190	0.79	-0.20	18.782	15.616	38.958
OJ06	3.71	0.1119	0.78	-0.73	18.757	15.559	38.857

1) Errors in parenthesis refer to least significant digits and ±2σ mean. 2) T<sub>DM</sub>=1/λ \* ln {1+[(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>sample</sub>-0.513114]/[(<sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd)<sub>sample</sub>-0.222]}}, λ = 6.54 × 10<sup>-12</sup> / y. 3) Bt=biotite, whole rock-biotite Rb-Sr age is 82 ± 1 Ma calculated after Ludwig(1994).



**Fig. 11.** <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr vs. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr diagram for the Onjeongri granite. Solid circles represent samples analyzed during this study, open circles are after Choo *et al.*(1982). Error bars are shown for the data of Choo *et al.*(1982). Errors of data analyzed during this study are similar to the size of symbols. Reference line for 87 Ma is also shown.

한 혼열 정도에 더 민감한(Tilton, 1983) <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 비는 전반적인 경상분지 내 화강암의 영역과 중첩된다.

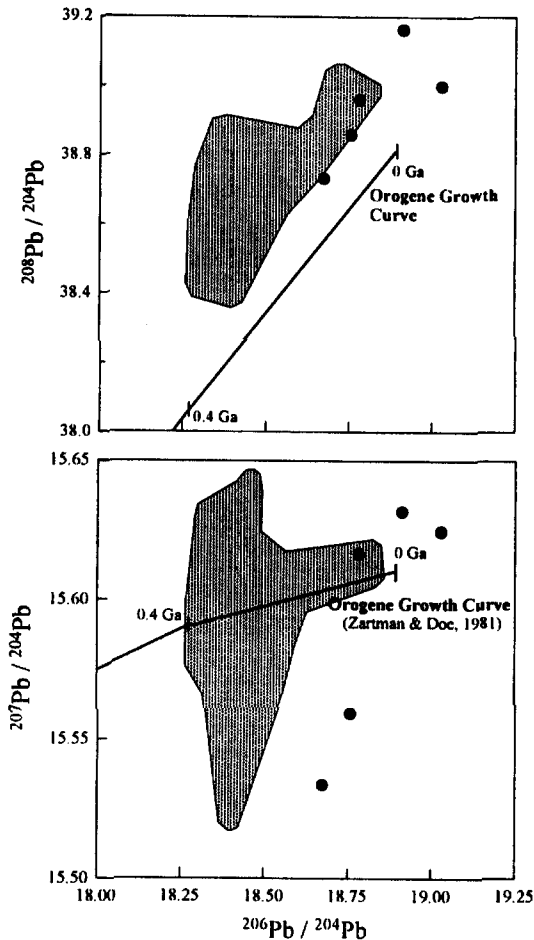
### 흑운모 K-Ar 연대

Table 4에 OJ04 시료 흑운모의 K-Ar 연대 측정 결과를 나타내었다. 흑운모의 K-Ar 연대는 80.2 ± 0.8 Ma로 Rb-Sr 광물연대(82 ± 1 Ma)와 오차범위 내에서 일치한다. 흑운모의 Rb-Sr, K-Ar 계에 대한 폐쇄온도는 300 ± 50°C로 비슷하게 고려된다(Jäger, 1979; Harrison *et al.*, 1985). 80 Ma 내외의 흑운모 Rb-Sr, K-Ar 연대는 Shin and Nishimura(1993)의 K-Ar 각섬석 연대(87.1 ± 2.1 Ma)에 비해 젊다. 이는 각섬석의 K-Ar 계에 대한 폐쇄온도가 500°C 내외(Dallmeyer, 1978; Harrison, 1981)로 흑운모에 비해 높게 고려되는 사실과 부합되며 온정리 화강암의 500~350°C 사이의 냉각속도는 약 30°C/Ma로 계산될 수 있다.

### 각섬석 지압계

온정리 화강암의 경우 노름(norm) Qz+Or+Ab 함량이 80% 이하이고 노름 An 함량이 10%를 넘어 노름 Qz-Ab-Or 관계에서 정치 압력을 추정하기 어렵다(Day and Fenn, 1982). 온정리 화강암의 관입 압력 조건을 알아보기 위해 각섬석 지압계를 적용시켜 보았다.

Table 5에 온정리 화강암의 각섬석에 대한 전자



**Fig. 12.** Pb isotopic composition of the Onjeongri granite. The shaded area represents the composition of granitic rocks in the other part of the Gyeongsang Basin(Chang, 1997). The growth curve of "orogene" (Zartman and Doe, 1981) is shown for comparison.

현미분석 결과를 요약하였다. 4개의 표본에서 산출하는 각섬석의 Al 양을 이용해 화강암의 정치 압력을 구하였다. 칼크-알칼리 계열의 화강암질암에서 산출하는 각섬석 내 전체 알루미늄 양( $Al_T$ )은 이 광물이 생성된 압력과 단변이적 관계가 있다는 것이 야외지질학적 증거와 실험을 통하여 알려져 있다 (Hammerstrom and Zen, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Schmidt,

1992). 각섬석 지압계를 적용하기 위해서는 흑운모, 사장석, 알칼리장석, 석영, 인회석, 및 Fe-Ti 산화물의 광물 조합이 있어야 하며 각섬석이 정출단계 마지막까지 계속 정출하여 용융액(melt)에서 분리된 유체와 공존하여야 한다. 계산에 이용된 시료는 이들 광물조합을 가지고 있으며 각섬석이 후기까지 정출했음을 현미경 관찰을 통해 확인할 수 있다. 이 연구에서는 경험적인 관계식과 잘 일치하는 것으로 알려진 Schmidt(1992)의 식을 이용하였다. 각섬석 결정의 중심부보다 가장자리의 조성을 우선적으로 고려하였다.

연구 지역의 각섬석 내 Al 양은 일정한 경향을 갖지 않는다. 결정의 중심부와 가장자리의 Al 양은 체계적인 변화를 보이지 않으며 암체 내의 상대적인 위치와 상관없는 변화를 보인다. 전체적으로 Al의 양은 작아 각섬석들이 비교적 얇은 깊이에서 형성되었음을 알 수 있다(Table 5). 각섬석의 가장자리 조성을 Schmidt(1992)의 식에 적용하면 대략 1.1~2.0 kbar의 압력이 계산되나 각섬석 지압계는 2 kbar 이상의 압력에서만 성공적으로 이용될 수 있으므로 계산된 압력이 실제의 압력을 정량적으로 나타낸다고 볼 수는 없다.

조등룡과 권성택(1994)은 각섬석 지압계를 이용하여 남한지역에 분포하는 불국사 화강암이 대보 화강암에 비해 얇은 깊이에서 정치되었음을 정량적으로 확인하였다. 이번 연구에서 구한 온정리 화강암의 정치 압력은 그들이 구한 경상분지 내 다른 불국사 화강암(연양 화강암; 0.9 kbar, 팔공산 화강암; 0.8 kbar) 보다 약간 크다. 이러한 비교는 비록 정량적인 의미를 갖지는 못하나 불국사화강암이 경상분지 전체에 걸쳐 비교적 얇은 깊이에서 정치되었음을 다시 확인시킨다.

온정리 화강암이 지하 천부에서 관입 정치하였다는 사실은 각섬석 K-Ar 연대가 화강암의 정치시기와 큰 차이가 없음을 지지할 수 있기 때문에 이후에서는 온정리 화강암의 관입시기를 87 Ma(Shin and Nishimura, 1993)로 보고 논의를 진행한다.

## 토의

### 온정리 화강암의 마그마 과정

**Table 4.** K-Ar data of biotite in the Onjeongri granite.

sample	sample weight (mg)	K (wt.%)	$^{36}Ar$ ( $10^{-10}ccSTP/g$ )	$^{40}Ar_{rad}$ ( $10^{-8}ccSTP/g$ )	uncertainty	Air fraction (%)	Age(Ma)
OJ04 Biotite	15.8	5.9464	14.69	1892.45	0.40	2.24	80.2±0.8

**Table 5.** Representative hornblende composition and estimated pressure of the Onjeongri granite.

	OJ01		OJ02		OJ04		OJ05	
	#31 core	#38 rim	#70 rim	#71 core	#2 core	#14 rim	#46 core	#56 rim
SiO <sub>2</sub>	44.953	47.248	47.283	47.839	45.473	48.230	47.914	46.743
TiO <sub>2</sub>	1.915	1.094	0.904	0.849	1.897	0.972	0.884	1.053
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.238	5.993	5.183	4.901	7.158	4.861	4.809	5.903
FeO	14.158	14.590	15.442	15.672	15.696	16.373	16.008	16.355
MgO	13.359	13.905	13.291	13.107	12.454	12.722	12.991	12.247
MnO	0.430	0.850	1.085	1.021	0.489	1.338	0.984	1.094
CaO	11.249	11.101	11.354	11.112	11.279	10.985	11.027	11.280
Na <sub>2</sub> O	1.516	1.476	1.108	1.154	1.674	1.200	1.192	1.246
K <sub>2</sub> O	0.811	0.507	0.472	0.475	0.795	0.455	0.417	0.573
Total	95.629	96.763	96.122	96.129	97.274	97.138	96.224	96.493
Si	6.814	7.055	7.142	7.217	6.817	7.225	7.227	7.072
Al(IV)	1.186	0.945	0.858	0.783	1.183	0.775	0.773	0.928
sum	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
Al(VI)	0.108	0.111	0.065	0.090	0.147	0.085	0.083	0.125
Ti	0.218	0.123	0.103	0.096	0.214	0.109	0.100	0.120
Fe	1.794	1.822	1.950	1.977	1.968	2.051	2.019	2.069
Mg	3.017	3.094	2.992	2.947	2.782	2.840	2.920	2.761
Mn	0.055	0.107	0.139	0.130	0.062	0.170	0.126	0.140
sum	5.193	5.257	5.249	5.240	5.173	5.255	5.248	5.215
Ca	1.827	1.776	1.837	1.796	1.812	1.763	1.782	1.828
Na	0.445	0.427	0.324	0.338	0.487	0.349	0.349	0.365
K	0.157	0.097	0.091	0.091	0.152	0.087	0.080	0.111
sum	2.429	2.300	2.253	2.225	2.450	2.198	2.211	2.304
Total	15.622	15.556	15.501	15.465	15.623	15.453	15.459	15.520
XFe <sup>1</sup>	0.373	0.371	0.395	0.402	0.414	0.419	0.409	0.428
Al(total)	1.294	1.056	0.924	0.872	1.330	0.859	0.856	1.054
Pressure (kbar)								
H & Z <sup>2</sup>	2.59	1.39	0.73	0.47	2.77	0.40	0.39	1.38
H <sup>2</sup>	2.54	1.20	0.45	0.16	2.74	0.09	0.07	1.18
J & R <sup>2</sup>	2.02	1.01	0.45	0.23	2.17	0.17	0.16	1.00
S <sup>2</sup>	3.15	2.02	1.39	1.14	3.32	1.08	1.06	2.01

1) XFe=Fe/(Fe+Mg), 2) H & Z(Hammarstrom and Zen, 1986), H(Hollster *et al.*, 1987), J & R(Johnson and Rutherford, 1989), S(Schmidt, 1992).

Fig. 2와 7에서 보듯 온정리 화강암 전암의 일부 원소들은 SiO<sub>2</sub> 함량과 직선적인 상관관계를 보여준다. 그러한 상관관계는 분별정출작용, 부분용융정도의 체계적인 차이, 주변물질과의 동화작용, 성분이 다른 마그마 사이의 혼합, 잔류기원암 불혼합(restite unmixing) 등의 모델로 설명해 볼 수 있다.

온정리 화강암의 노두에서는 마그마 혼합을 지지

할 수 있는 미세 염기성 포획물(MME; micro mafic enclave) 및 그와 연관될 수 있는 염기성 화성암이 별로 보이지 않는다. 잔류기원암 불혼합 모델(restite unmixing model; White and Chappell, 1977; Chappell *et al.*, 1987)이 지지되기 위해서는 상대적으로 염기성인 암석에서 잔류기원암으로 의심될 수 있는 포획물이 더 많이 보여야 하지만 그런

증거는 발견되지 않는다. 따라서 마그마 혼합이나 잔류기원암 불혼합 모델은 일단 기각될 수 있다.

V, Ni과 같은 호정원소는 분별정출작용의 정도에는 민감하게 용융체내에서 농도가 변하지만 부분용융의 정도 차이에는 상대적으로 덜 민감하다 (Hanson, 1978). 온정리 화강암 전암의 경우 Fig. 7에서 보듯  $\text{SiO}_2$  함량의 증가에 따라 V의 함량이 급격히 변화한다. 따라서 온정리 화강암에서 보이는 화학조성의 변화는 주로 분별정출작용에 기인된 것으로 보인다.

단순분별정출작용의 경우 전암시료는 분화 정도와 관계없이 일정한 Sr-Nd-Pb 동위원소비 초기치를 가질 것이다. 그러나 온정리 화강암의 경우 Table 3에서 보듯 각 시료별로 불균질한 동위원소비 초기치를 가져 그 성인에 있어서 2개 이상 기원물질의 불완전한 혼합이나 기원지역에서의 오염, 또는 부분적으로 불균질한 기원물질을 고려해야 한다. Fig. 13에서 보듯 온정리 화강암의  $\text{SiO}_2$  함량이 증가하면서  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초기치는 감소하는 경향성을 잘 보이며  $\text{SiO}_2$  함량이 낮은 두 시료(OJ02, OJ06)의 Pb 동위원소비는 상대적으로 덜 방사기원적이다.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  값과  $\text{SiO}_2$  함량은 별 관계를 보이지 않는다. 만약 이러한 변화를 단순 혼합, 또는 분화와 동시에 진행되는 동화작용(AFC)의 결과로 해석한다면 Pb에 대해 방사기원적이고  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비가 상대적으로 낮은 오염체를 고려해야 한다. 연구지역 인근에 노출되어 있는 암석 중 오염체로 고려할 수 있는 암석으로는 선캠브리아기 편마암, 선백악기 현생 화강암, 경상누층군의 퇴적층 등을 들 수 있다. 평해 지역에 분포하는 선캠브리아기 편마암은 온정리 화강암에 비해 특징적으로 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비(현재 값은 0.73~0.77)와 낮은  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  비 ( $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = -29 \sim -18$ ), 그리고 더 방사기원적인 Pb 동위원소비( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.8 \sim 23.9$ )를 가지며(정창식 외, 준비중), 선백악기 현생 화강암류는 전체적으로 온정리 화강암과 유사한 Sr-Nd-Pb 동위원소비를 보이기 때문에(Cheong *et al.*, 1997) 둘 다 온정리 화강암에 대한 오염체로 고려되기 어렵다. 한편 경상누층군의 퇴적암들은 전체적으로 경상분지에 분포하는 화강암과 거의 유사한 Pb 동위원소비를 가져(Chang, 1997) 역시 온정리 화강암의 성인과 관련된 효과적인 오염체로 보기 어렵다. 야외에서 온정리 화강암과 경상누층군 퇴적층 사이의 접촉부를 보더라도 화강암 내에 동화작용과 관련된 퇴적암 포획암이 관찰되지 않으며 퇴적암이 부분용융된 흔적도 보이지 않는다. 따라서 현재 노출되어 있는 암석 중 온정리 화강암의 성인과 관련된 오염체,

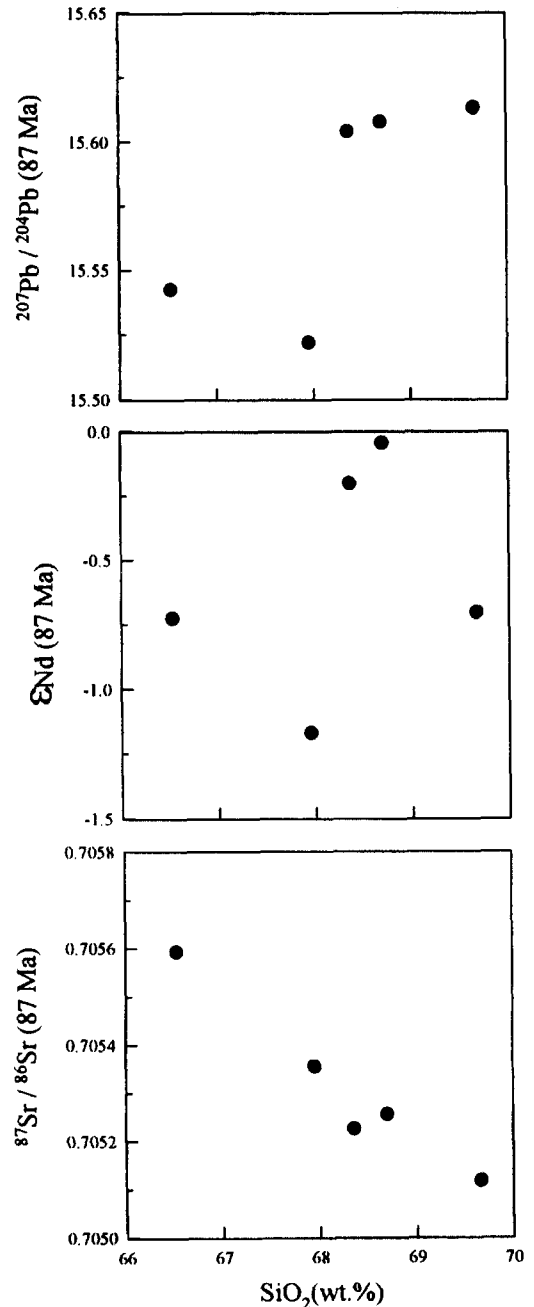


Fig. 13. The relations between  $\text{SiO}_2$  content and initial Sr-Nd-Pb isotope ratios for the Onjeongri granite.

주 Pb에 대해 방사기원적이고  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비가 상대적으로 낮은 암석을 찾기는 어렵다. 연구지역에 노출되어 있지 않은 하부지각물질의 지구화학적 특징은

화강암 내에 포획암의 형태로 산출되지 않는 한 알아내기 어렵다. 다만 경상분지 내 화강암의 지화학적 특징으로 볼 때 경상분지 하부의 기반암이 경상분지 밖의 기반암에 비해 상대적으로 더 친석원소가 결핍되어있고 생성시기가 젊을 것이라는 추정은 가능하다. 연구지역의 남쪽에 위치하는 선백악기의 청송 화강암 내에는 비교적 염기성인 편마암이 포획암의 형태로 산출된다. 그들의 Nd 모델연대는 11억 내지 12억년 정도로(Cheong *et al.*, 1997) 경상분지 밖의 편마암에 비해 특징적으로 젊으며 온정리 화강암과 비교해 볼 때에는 다소 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비(0.717 내외)와 더 방사기원적인 Pb 동위원소비( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}=19.0$  정도)를 가진다.

이상에서 살펴본 바와 같이 현재 자료로 온정리 화강암의 동위원소적 변화를 설명할 수 있는 오염체를 규정하기는 어렵다. 그러나 온정리 화강암의  $\text{SiO}_2$  함량과 Sr, Pb 동위원소비 초기치가 밀접한 상관관계를 보인다는 점으로 볼 때 두 성분 혼합에 대한 가능성을 배제하기는 어려우며 현재 연구 지역의 지각 하부에 대한 자료가 대단히 제한적이라는 점도 고려해야 할 것이다. 다만 온정리 화강암의 동위원소적 변화가 상부지각 물질에 의한 전형적인 지각 혼염(crustal contamination)에 기인된 것으로는 보기 어렵다. 또 뒤에서 논의하겠지만 온정리 화강암의 동위원소적, 암석화학적 특징이 비교적 초생적인 점을 고려한다면 하부지각에 의한 오염이 있었다 하더라도 오염정도가 크지 않았거나 오염체의 지화학적 특징이 원 마그마와 별로 다르지 않았을 가능성이 인정된다.

온정리 화강암의 성인에 대한 다른 가능성은 분화와 동화작용이 다른 시기에 진행되었거나, 마그마가 생성되는 지역에서의 섭입된 퇴적물에 의한 오염(source contamination; James, 1981)이지만 그런 경우 화강암의 동위원소비 초기치와  $\text{SiO}_2$  함량이 Fig. 13에서 볼 수 있는 체계적인 변화를 보이지 어렵다.

온정리 화강암의 동위원소적 특징에 대한 또 다른 가능성은 기원물질의 고유한 불균질성인데 전적으로 그 가능성을 배제하기는 어렵지만 온정리 화강암의 규모(동서 6 km, 남북 13 km 정도)가 작고 비교적 균질한 지화학적 특징을 보여 하나의 마그마 덩어리일 것으로 생각되기 때문에 그 가능성은 희박할 것이다.

결국 온정리 화강암의 동위원소비 초기치 변화는 원 마그마와 지각 하부 물질 사이의 불완전한 혼합관계를 시사하지만 현재 노출된 암체 중 오염체로

고려할 만한 단성분을 찾기는 어렵다.

### 조구조 환경과 기원물질의 특징 : 서남 일본 및 경상분지 다른 지역 화강암류와의 비교

일반적으로 대륙호 환경에서 유래된 화강암류의 경우 해구에서 멀어지면서 호의 성숙도(arc maturity)에 따른 지구화학적 특징이 달라진다고 알려져 있다(Brown *et al.*, 1984). 즉 호가 미성숙된 단계에서는 초생적인 칼식(calcic) 마그마가 만들어지고 호의 성숙도가 증가하면서 대륙지각에서 주로 유래되는 친석원소의 부화를 겪게 되며 더 성숙되게 되면 대륙지판 내 맨틀암석권(lithospheric mantle)으로부터의 고장력원소(HFSE; high field strength elements)의 부화를 겪게 된다. 따라서 친석원소와 고장력원소의 농도와 그 비는 호의 성숙도, 즉 기원물질의 특징을 반영할 수 있다는 것이다. Fig. 14에 Brown *et al.*(1984)이 제시한 거미그림을 나타내었다. 온정리 화강암 시료의 특징을 경상분지 내 다른 지역의 화강암류(Hong, 1987)와 비교해 보았을 때 Nb의 (-) 이상이 더 뚜렷하고 Sr, P, Ti의 (-) 이상은 보이지 않거나 덜 뚜렷한 편이다. 그 외 Rb, Th, K 함량은 상대적으로 낮다. 이러한 지화학적 특징은 온정리 화강암이 상대적으로

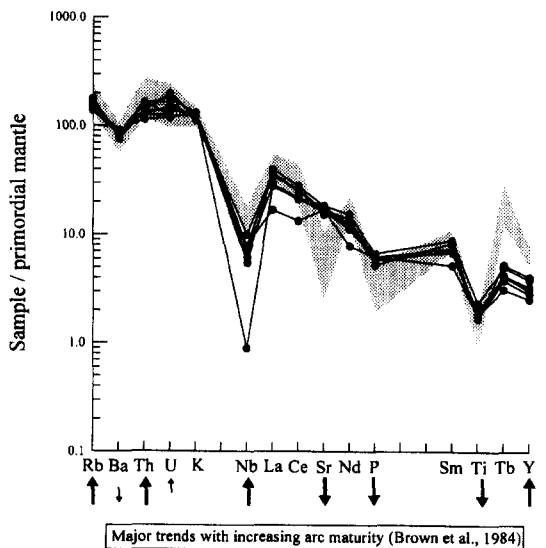


Fig. 14. Primordial mantle-normalized trace element patterns for the Onjeongri granite. Major trends with increasing arc maturity are after Brown *et al.*(1984). The shaded area represents the composition of some Cretaceous granites in the other part of the Gyeongsang Basin(Hong, 1987).

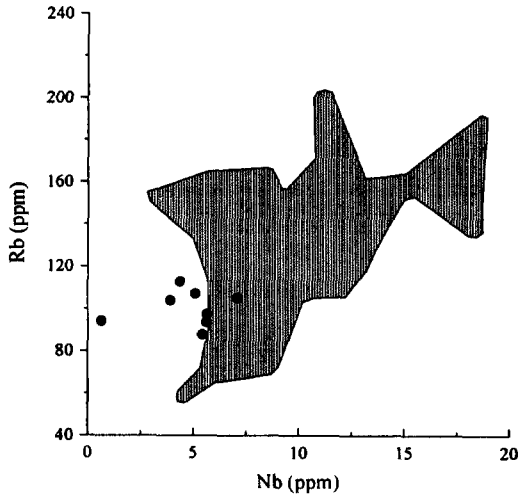


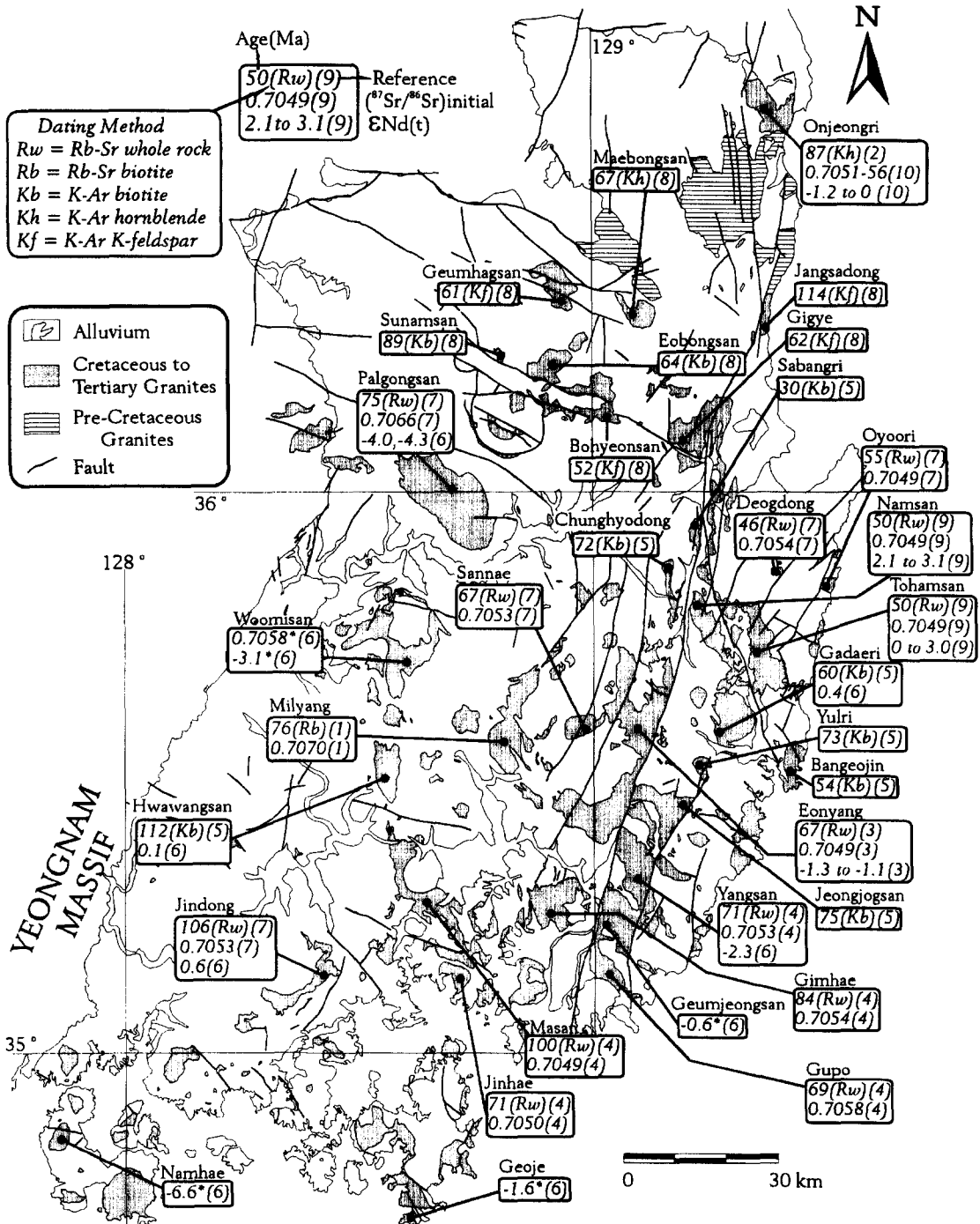
Fig. 15. Rb-Nb relation of the Onjeongri granite. The shaded area represents the composition of some Cretaceous granites in the other part of the Gyeongsang Basin (Hong, 1987; Lee, 1997).

덜 성숙된 호 환경에서 형성되었음을 지시할 수 있는데 이는 대표적인 친석원소와 고장력원소인 Rb-Nb 관계(Fig. 15)에서도 확인된다. 온정리 화강암의 Rb과 Nb 함량은 Fig. 15에서 보듯이 경상분지 내 다른 화강암류(Hong, 1987; Lee, 1997)에 비해 특징적으로 낮다. 이와 같은 점은 온정리 화강암을 형성시킨 마그마가 호 환경에서 생성될 때 대륙각이나 맨틀암석권으로부터의 물질 공급이 상대적으로 적었음을 의미하며 온정리 화강암이 경상분지 내 화강암류 중 상대적으로 볼 때 가장 미 성숙된 호 환경에서 유래하였음을 지시할 수 있는 것이다.

이때까지 발표된 경상분지 내 백악기-제 3기 화강암류의 Rb-Sr, K-Ar 연대,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초생치와  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  값을 정리해 보면 Fig. 16과 같다. 연대 자료를 정리할 때 최근에 발표된 Rb-Sr 전암연대와 K-Ar 각섬석 연대를 우선하였고 다른 방법으로 재확인되지 않는 분산된 Rb-Sr 전암연대와 같은 암체에 대해 오차범위를 초과하는 상이한 결과를 보이는 K-Ar 연대는 정리 대상 암체에서 제외하였다. Fig. 16에 정리된 상당수 암체의 경우 Rb-Sr 전암연대와 K-Ar 광물연대가 5 Ma 이내의 차이를 보여 경상분지 내 불국사 화강암류가 비교적 지하 천부에 관입하여 빨리 냉각되었음을 확인할 수 있었다. 정리된 연대 자료를 보면 100 Ma 이상의 화강암은 마산(창원), 화왕산(창녕), 진동, 장사동 암체로서 서부 경남 지역과 경상분지 북부 지역에 국한된다. 60 Ma 보다 젊은 화강암은 방어진, 가대리, 토함산,

남산, 덕동, 오유리, 사방리, 보현산 암체로서 주로 경상분지의 동쪽 좁은 지역에 국한되어 산출된다. 동서 방향에서 볼 때 경상분지 중부 지역 암체의 경우 67~75 Ma의 좁은 연대 범위에 집중된다. 전반적으로 볼 때 경상분지에서의 심성활동은 100 Ma 내외와 67~75 Ma, 50 Ma 내외에 집중되어 불연속적인 연대 분포를 나타내며 지역적 특징을 가진다고 말할 수 있다. Rb-Sr 전암 연대와 K-Ar 각섬석 연대로 볼 때 규모가 비교적 큰 암체 중 연대가 위에서 언급한 범위에서 벗어나는 화강암은 김해 암체(84 Ma)와 온정리 암체(87 Ma) 정도로 많지 않다.

중앙 구조선 이북의 서남 일본 내대는 분포하는 화강암의 특징과 연대, 그리고 광상학적인 특징에 의해 대한해협 쪽에서 남동 방향으로 산인(San'in) 벨트, 산요(San'yo, 또는 히로시마) 벨트, 료케(Ryoke) 벨트로 나누어진다(Ishihara, 1971; Murakami, 1974). 각 벨트에 분포하는 화강암의 특징은 Kagami *et al.* (1992), Nakajima(1994), Nakajima(1996) 등에 요약되어 있다. 산인 벨트는 Mo 광화대로 특징지워지며 분포하는 화강암은 주로 I형, 자철석 계열의 천부 관입체이다. 제 3기의 화강암은 주로 산인 벨트에 국한되어 분포하는 것으로 알려져 있다. 산요 벨트는 W 광화대로 정의되며 I형, 티탄철석 계열의 괴상, 반상 화강암이 주로 분포한다. 료케 벨트에 분포하는 화강암은 광화작용을 거의 수반하지 않으며 I형, 티탄철석 계열이 주를 이루고 특징적으로 지하 심부(4.0~8.5 kbar)에서 정착하여 흔히 열리를 보인다. 서남 일본에 분포하는 화강암류의 연대는 동쪽으로 가면서 젊어지는 경향성을 보여 해령 섭입 모델(ridge subduction model)이 제시된 바 있다(Kinoshita and Ito, 1986; Nakajima *et al.*, 1990; Nakajima, 1994). 이 모델에 의하면 변환단층으로 잘린 해령이 유라시아판과 비스듬하게 만났고 지판과 만난 해령의 섭입이 주된 열원으로 작용하여 화성활동이 해령과 먼저 만난 서쪽으로부터 순차적으로 일어났다는 것이다. 이 모델은 화강암의 연대 분포를 단순하게 설명해 줄 수 있지만 제 3기의 화강암이 산인 벨트의 해안가 지역에만 분포하는 점과 몇몇 지역에서 퇴적학적인 증거로 추정되는 해령 섭입시기와 화성활동의 시기가 일치하지 않는 점, 그리고 해령섭입에 의해 만들어지는 마그마가 일반적으로 염기성이며 소규모라는 점 등을 설명해 주지 못한다(Terakado and Nohda, 1993). 무엇보다도 화강암의 연대분포 자체가 료케 벨트의 경우 동쪽으로 가면서 젊어지지 않는다는 주장도 제기되고 있어(Suzuki and Adachi, 1998) 해령 섭입 모델의 원래 가정 자체가 의심시되는 측면



**Fig. 16.** Summary of Rb-Sr and K-Ar age and initial isotope ratios of Cretaceous to Tertiary granitic rocks in the Gyeongsang Basin. Initial isotope ratios marked with stars(\*) were calculated using the age of 75 Ma(Woomisan), 70 Ma(Namhae and Geoje) and 63 Ma(Geumjeongsan) by Kim *et al.*(1996). Some initial isotope ratios of Kim *et al.*(1996) were recalculated based upon newly published age data. References (1: Jin, 1988, 2: Shin and Nishimura, 1993, 3: Na, 1994, 4: Lee *et al.*, 1995, 5: KIGAM, 1995, 6: Kim *et al.*, 1996, 7: Kim *et al.*, 1997, 8: Kim, 1997, 9: Kim and Kim, 1997, 10: this study).

도 있다.

경상분지 화강암류의 연대는 앞서 살펴본 바와 같이 지역적 분포를 비교적 잘 보이며 서쪽에 100 Ma 이상의 화강암이 주로 분포하고 동쪽에 제 3기의 화강암이 집중된다. 이러한 현상은 연속적인 판의 섭입(steady state subduction)으로는 설명하기 어려우며 적어도 부분적으로는 해령섭입과 같은 불연속적이며 우발적인 사건(episodic event)을 상정해야 할 것으로 생각된다. 그러한 관점에 따른다면 온정리 화강암(87 Ma)과 김해 화강암(84 Ma)의 연대는 그 당시 화성 활동을 유발시킨 사건의 규모가 상대적으로 작아 경상분지 전반에 걸친 효과는 나타내지 못했던 것으로 해석될 수 있다.

서남 일본 내대에 분포하는 화강암류는 각 벨트별로 특징적인 동위원소 조성을 보인다. 전반적으로 볼 때 산인 벨트의 화강암은 초생적인 특징을 보이거나 다소 부화되어 있으나( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705 \sim 0.711$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -6.9 \sim 1.2$ ;  $\delta^{18}\text{O} = 8 \sim 9$ ), 산요 벨트와 료케 벨트에는 부화되어 있는 화강암( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.706 \sim 0.715$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.9 \sim -4.1$ ;  $\delta^{18}\text{O} = 9 \sim 14$ )이 주로 분포한다(Kagami *et al.*, 1992의 정리 참조). 경상분지에 분포하는 화강암 중 가장 부화된 특징을 보이는 암체는 남해 암체( $\epsilon_{\text{Nd}} = -6.6$ ; Kim

*et al.*, 1996)와 밀양 암체( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7070$ ; Jin, 1988)이지만 전반적으로는 Fig. 17에서 보는 바와 같이 서남 일본의 산요, 료케 벨트 화강암에 비해 비교적 초생적이다. Fig. 17에 통상적인 화강암의 동위원소 조성을 가정할 때 30 Ma의 연대차이에 의해 달라질 수 있는 Sr, Nd 동위원소비 초기치의 변화 범위를 대략적으로 나타내었다.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  값의 경우 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 경상분지 내 백악기 화강암의 석영  $\delta^{18}\text{O}$  값은 3.7~9.8 범위로(Kim *et al.*, 1992) 산인 벨트 화강암의 영역과 일치한다. 그 외에 경상분지 내 백악기 화강암이 비교적 천부 관입체라는 점과 자철석 계열에 해당한다는 점, 그리고 일부 지역에서 제 3기의 연대가 보인다는 점도 산인 벨트 화강암의 특징과 일치한다. 이와 같이 경상분지 내 백악기-제 3기 화강암은 그 암석학적, 지구화학적 특징이 서남 일본의 산인 벨트 화강암과 잘 대비될 수 있다. 온정리 화강암의 Sr, Nd 동위원소 자료는 경상분지와 서남 일본 화강암의 영역을 모두 고려했을 때에도 가장 초생적인 영역에 해당되며(Fig. 17) 이는 대륙지각이나 판 내부 맨틀암석권에 의한 물질 공급이 별로 없었던 것을 지지하는 원소분석결과와 조화적이다.

경상분지 내에 분포하는 백악기-제 3기 화강암류의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초생치는 팔공산 암체와 밀양 암체가 각각 0.7066, 0.7070으로 상대적으로 높으며 남산, 오우리 화강암 등의 제 3기 암체와 언양, 마산, 진해 암체에서는 0.7050 내외로 낮은 편이다(Fig. 16). 이 중 마산 암체의 경우는 다른 암체에 비해 상대적으로 오랜 연대(100 Ma)에 의한 효과 때문이다.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  값의 경우 전반적으로  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  초생치의 변화를 따라 변화하며(Fig. 16) 남해 암체에서 제일 낮은 값을 보인다(-6.6). 동해안에 가까이 위치한 암체 중에서는 특징적으로 부화된 값이 보이지 않는다. 한가지 흥미로운 사실은 경상분지 내 백악기-제 3기 화강암류 중 가장 부화된 특징을 가지는 팔공산, 밀양, 남해 암체 중 연대가 알려져 있지 않은 남해 암체를 제외하고는 관입시기가 75 Ma 정도로 일정하다는 점이다. 또 제 3기의 화강암은 덕동 암체를 제외하고는 모두 초생적인 특징을 보이며 100 Ma 이상의 암체 역시 비교적 초생적인 특징을 가진다. 좀 더 많은 자료로 확인되어야 하겠지만 이와 같은 현상은 특정 화성 활동의 시기에 만들어진 화강암들의 기원 물질이 유사했을 가능성을 시사한다.

동위원소적 특징으로 볼 때 경상분지 내 화강암류가 경상분지 밖에 분포하는 오래된 기반암류(Nd 모델연령은 14억~38억년; Lan *et al.*, 1995)와 유사한

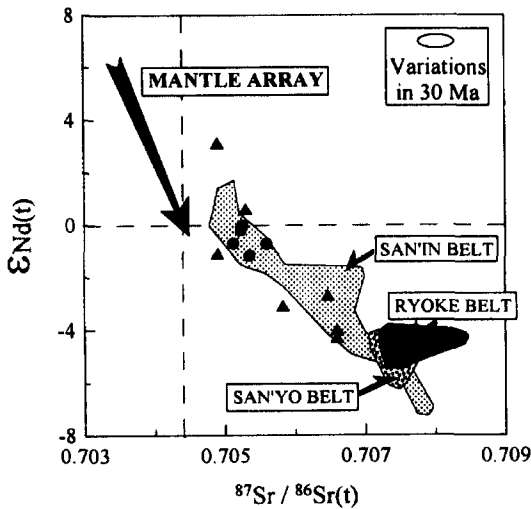


Fig. 17. Sr-Nd isotopic correlation of granitic rocks in the Gyeongsang Basin and the Inner Zone of Southwest Japan. The  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of the bulk earth (BE) is calculated as 0.7044 at 80 Ma. Approximate variations in initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios and  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of the granites in 30 Ma are also shown. Symbols: solid circles; Onjeongri granite, solid triangles; granites in the other part of the Gyeongsang Basin.



상부지각물질의 직접적인 용융에 의해 만들어졌을 가능성은 쉽게 부정된다. 그리고 경상분지와 서남 일본 내대에 분포하는 화강암류 중 비교적 초생적인 특징을 보이는 온정리 화강암의 경우에도  $\epsilon_{Nd}$  값은 -1.2~0 범위로 결핍맨틀( $\epsilon_{Nd}(87\text{ Ma}) = 9$  내외)에 비해서는 현저하게 낮다. 물론 맨틀웨지(mantle wedge)에 위치하는 대륙지각 하부 맨틀암석권(sub-continental lithosphere)이 동위원소적으로 결핍맨틀에 비해 부화되어 있다고 생각되지만(Wilson, 1989) 경상분지와 서남 일본 내대에 분포하는 광범위한 규모의 산성 암체가 맨틀의 직접적인 부분용융에 의해서 만들어지기는 어렵다(Kushiro, 1974). 따라서 경상분지 화강암류의 암석화학적, 동위원소적 특징은 젊은(Nd 모델연령으로 볼 때 9억년 이내) 하부지각, 또는 대륙호에서 마그마가 만들어지는 지역으로 생각되는 MASH(melting, assimilation, storage and homogenization) zone(지각과 맨틀의 경계면; Hildreth and Moorbath, 1988)의 특징을 반영한다고 생각된다. 비교적 초생적인 특징을 가지는 하부지각에서 유래한 마그마가 상대적으로 더 부화된 상부지각에 의해 혼염을 겪었다면 마그마의 동위원소적 특징뿐만 아니라 화학조성도 변할 것이다. 일반적으로 상부지각 물질은 하부지각에 비해 특징적으로 Rb, Th, U, K, Nb의 함량이 높다(Taylor and McLennan, 1981; Weaver and Tarney, 1984). 앞서 언급한 바와 같이 경상분지 내 화강암 중 팔공산 암체와 밀양 암체는 상대적으로 부화된 동위원소적 특징을 보인다. 만약 그 특징이 상부지각 혼염에 의한 것이라면 동위원소적으로 초생적인 암체에 비해 상부지각에 부화된 원소들의 상대적 농집이 기대된다. 하지만 팔공산 화강암과 밀양 화강암의 평균 화학조성(Hong, 1987)은 동위원소적으로 초생적인 특징을 보이는 연양, 마산 암체와 Rb, Th, U, K, Nb의 함량에서 별다른 차이가 없다. Rb, Th, U, K 등의 함량은 분화정도에 민감하게 변할 수 있지만 Hong(1987)의 자료는 평균 조성이며 주성분원소 함량으로 본 팔공산, 밀양, 연양, 마산 암체의 분화지수도 일정한 편이다. 따라서 팔공산, 밀양 암체의 화학조성은 상부지각에 의한 혼염 효과를 지지한다고 보기 어렵다. 그러한 점에서 본다면 경상분지 내 백악기-제 3기 화강암의 동위원소적 특징이 하부지각의 불균질성을 반영할 가능성이 높다고 판단되며 이는 서남 일본 산성 암체의 성인에 대한 일부 저자들(Terakado and Nakamura, 1984; Kagami *et al.*, 1992)의 제안과 일치한다. 하지만 아직 경상분지 화강암에 대한 연대 자료와 동위원소 자료는 확실한 결론을 내리기에는 부족하며 기원

물질의 불균질성과 관련된 지역적인 특징에 대해서는 더 많은 자료(특히 Nd 동위원소비)가 요구된다.

## 결 언

온정리 화강암은 백악기 말(약 87 Ma)에 정치한 천부 관입체이다. 온정리 화강암의 동위원소적, 암석화학적 특징은 비교적 미 성숙된 호 환경에서 생성되었음을 지지하며 Sr-Nd 동위원소비는 경상분지와 서남 일본 내대에 분포하는 화강암과 비교해서 비교적 초생적인 영역에 해당된다. 온정리 화강암의  $\text{SiO}_2$  함량과 Sr, Pb 동위원소비 초기치는 비교적 체계적인 변화를 보여 원 마그마가 하부지각 물질에 의해 혼화되었을 가능성을 보이지만 현재 노출되어있는 암체 중 오염체로 고려할 만한 단성분(end-member)을 찾기는 어렵다.

경상분지에 분포하는 화강암류의 암상, 연대와 동위원소적 특징은 서남 일본 내대에 분포하는 산인 벨트 화강암류와 잘 대비된다. 경상분지 화강암류의 연대는 특정 시기에 집중되는 경향을 보여 화성 활동이 불연속적인 사건에 의해 일어났을 가능성을 시사한다. 동위원소적 특징으로 볼 때 경상분지 내 화강암류는 불균질한 특징을 가지는 젊은 하부지각에서 유래되었다고 생각된다. 전반적으로 경상분지 화강암류의 동위원소적 특징과 화학조성은 상부지각 혼염에 의해 조화적으로 설명되지 않는다.

## 사 사

이 연구는 기초과학지원연구소의 자체연구개발 사업비와 전략광물자원연구센터(CMR)의 지원에 의해 수행되었다. 원소 분석과 EPMA 분석을 도와 준 기초과학지원연구소의 최만식 박사, 이석훈 연구원, 박찬수 박사, 신형선 연구원, 그리고 서울대학교 공동기기원의 고일원 씨께 사의를 표한다. 야외 조사시 연세대학교 사공희 석사의 도움이 있었다. 저자들은 최용주, 김용준, 박영석 교수님의 세심하고 사려 깊은 비평에 감사드린다.

## 참고문헌

- 권성택, 1991, 우리나라 현생이인 화강암질암에 대한 사마리움-니오디미움 동위원소 연구: 지각의 성인 및 구조 고찰 (요약문). 지질학회지, 27, 528-529.
- 권성택, 1992, 남한 현생이인 화강암질암에 대한 납 동위원소 연구: 예비보고서 (요약문). 지질학회지, 28, 514.

- 김근수, 김정진, 박맹언, 1997, 경상분지에 분포하는 화강암질암체에 대한 Rb-Sr 연대 (요약문). 한국암석학회 학술발표회 요약집, 20.
- 김상욱, 1986, 경상분지에서의 후기백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만 교수 송수기념논문집, 167-194.
- 김상욱, 박봉순, 1970, 한국지질도(1:50,000), 영양도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 25p.
- 김상중, 1997, 북부 경상분지의 화성활동과 다금속 광화작용에 관한 지화학 및 지질연대학적 연구. 충남대학교 박사학위논문, 276p.
- 김옥준, 홍만섭, 원종관, 박희인, 박양대, 김기태, 1963, 한국지질도(1:50,000), 평해도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 28p.
- 김중욱, 1989, 경상분지 북동부 영덕-온정지역 화강암질암류의 암석학 및 Fission Track 연대. 경북대학교 박사학위논문, 138p.
- 박계현 외 71인, 1996, 첨단기기 공동활용 지원사업 보고서, 기초과학지원연구소, 495p.
- 이상만, 김상욱, 진명식, 1987, 남한의 백악기-제 3기 화성활동과 지구조적 의의. 지질학회지, 23, 338-359.
- 조동룡, 권성택, 1994, 남한의 중생대 화강암에 대한 각섬석 지압계와 지각두께의 진화. 지질학회지, 30, 41-61.
- 주승환, 진명식, 윤현수, 김동학, 1982, Rb/Sr 연대 측정 연구 (서산화강편암 및 화강암, 평해 온정리화강암, 기타지역 화강암류). 조사연구보고 13호, 한국동력자원연구소, 193-208.
- 최만식, 정창식, 박계현, 1994, 암석 용해방법에 따른 미량원소 분석결과 비교. 암석학회지, 3, 41-48.
- 한국자원연구소(KIGAM), 1995, 한국 심성암 동위원소 연대 지도. 성지문화사.
- 황재하, 김동학, 조동룡, 송교영, 1996, 한국지질도(1:250,000), 안동도폭 및 설명서, 한국자원연구소, 67p.
- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985, Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. Chem. Geol., 48, 43-55.
- Bevins, R.E., Kokelaar, B.P. and Dunkley, P.N., 1984, Petrology and geochemistry of lower to middle Ordovician igneous rocks in Wales: a volcanic arc to marginal basin transition. Proc. Geol. Ass., 95, 337-347.
- Boynton, W.V., 1984, Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Rare earth element geochemistry(ed. P. Henderson), Elsevier, 63-107.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. Jour. Geol. Soc. London, 141, 413-426.
- Chang, B.U., 1997, A study on the lead isotopic compositions of ore deposits and igneous rocks in the Gyeongsang basin, Korea. Ph.D. dissertation, Seoul National Univ., 100p.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. Pacific Geol., 8, 173-174.
- Chappell, B.W., White, A.J.R. and Wyborn, D., 1987, The importance of residual source material (restite) in granite petrogenesis. Jour. Petrol., 28, 1111-1138.
- Cheong, C.S., Kwon, S.T., Park, K.H. and Sagong, H., 1997, Sr-Nd-Pb isotopic compositions of pre-Cretaceous granitic rocks in the northern Gyeongsang Basin, South Korea, Eos Trans. AGU, 78(46), Fall Meet. Suppl., F785.
- Condie, K.C., 1989, Plate tectonics and crustal evolution (3rd ed.). Pergamon Press, New York, 476p.
- Dallmeyer, R.D., 1978,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  incremental-release ages of hornblende and biotite across the Georgia Inner Piedmont: their bearing on Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonothermal history. Am. Jour. Sci., 278, 124-149.
- Day, H.W. and Fenn, P.M., 1982, Estimating the P-T- $X_{\text{H}_2\text{O}}$  conditions during crystallization of low calcium granites. Jour. Geol., 90, 485-507.
- Hammarstrom, J.M. and Zen, E-an., 1986, Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. Am. Min., 71, 1297-1313.
- Hanson, G.N., 1978, The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. Earth Planet. Sci. Lett., 38, 26-43.
- Harris, N.B.W., Pearce, J.A. and Tindle, A.G., 1986, Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Collision tectonics(ed. M.P. Coward and A.C. Reis), Spec. Publ. Geol. Soc., 19, 67-81.
- Harrison, T.M., 1981, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in hornblende. Contrib. Mineral. Petrol., 78, 324-331.
- Harrison, T.M., Duncan, I. and McDougall, I., 1985, Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in biotite: Temperature, pressure and compositional effects. Geochim. Cosmochim. Acta, 49, 2461-2468.
- Hildreth, W. and Moorbath, S., 1988, Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. Contrib. Mineral. Petrol., 98, 455-489.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H., and Sisson, V.B., 1987, Conformation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calcic-alkaline plutons. Am. Min., 72, 231-239.
- Hong, Y. K., 1987, Geochemical characteristics of Precambrian, Jurassic and Cretaceous granites in Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 20, 35-60.
- Irvine, T.N. and Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Can. Jour. Earth Sci., 8, 523-548.
- Ishihara, S., 1971, Modal and chemical composition of the granitic rocks related to the major molybdenum and tungsten deposits in the Inner

- Zone of Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 77, 441-452.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.*, 27, 293-305.
- Jäger, E., 1979, Introduction to geochronology. In : *Lectures in isotope geology*(ed. E. Jäger and J.C. Hunziker), Springer-Verlag, New York, 1-12.
- James, D.E., 1981, The combined use of oxygen and radiogenic isotopes as indicators of crustal contamination. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 9, 311-344.
- Jin, M.S., 1980, Geological and isotopic contrasts of the Jurassic and Cretaceous granites in South Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 16, 205-215.
- Jin, M.S., 1985, Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in southern Korea. pt. I : Major element geochemistry. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 21, 297-316.
- Jin, M.S., 1988, Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in southern Korea. pt. II : Trace element geochemistry. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 24, 168-188.
- 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*, 17, 837-841.
- Kagami, H., Iizumi, S., Tainosho, Y. and Owada, M., 1992, Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-Paleogene granitoid rocks, Southwest Japan Arc. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 112, 165-177.
- Kim, C.S. and Kim, G.S., 1997, Petrogenesis of the early Tertiary A-type Namsan alkali granite in the Kyongsang Basin, Korea. *Geosci. Jour.*, 1, 99-107.
- Kim, K.H., Park, S.S. and Na, C.K., 1996, Nd and Sr isotopic signatures of Mesozoic granitoids in South Korea. *Resource Geol.*, 46, 215-226.
- Kim, K.H., Satake, H. and Mizutani, Y., 1992, Oxygen isotopic compositions of Mesozoic granitic rocks in South Korea. *Mining Geol.*, 42, 311-322.
- Kinoshita, O. and Ito, H., 1986, Migration of Cretaceous igneous activity in Southwest Japan related to ridge subduction. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 92, 723-735.
- Kushiro, I., 1974, Melting of hydrous upper mantle and possible generation of andesite magma : an approach from synthetic systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 22, 294-299.
- Kwon, S.T. and Sagong, H., 1997, Geochemical and Rb-Sr isotopic study of Phanerozoic granites in South Korea : temporal and spatial differences (abstract). *Second International Symposium on Granites and Associated Mineralizations, Extended Abstract and Programs*, 209-210.
- Lan, C.Y., Lee, T., Zhou, X.H. and Kwon, S.T., 1995, Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea : Evidence for Early Archean crust? *Geology*, 23, 249-252.
- Lee, J.I., 1997, Trace and rare earth element geochemistry of granitic rocks, southern part of the Kyongsang Basin, Korea. *Geosci. Jour.*, 1, 167-178.
- Lee, J.I., Kagami, H. and Nagao, K., 1995, Rb-Sr and K-Ar age determinations of the granitic rocks in the southern part of the Kyeongsang basin, Korea : Implications for cooling history of granitic magmatism during late Cretaceous. *Geochem. Jour.*, 29, 363-376.
- Ludwig, K.R., 1994, ISOPLOT - A plotting and regression program for radiogenic isotope data, version 2.71. *USGS Open File Rep.*, 91-445.
- Michard, A., Gurriet, P., Soundant, M. and Albarede, F., 1985, Nd isotopes in French Phanerozoic shales : external vs. internal aspects of crustal evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 601-610.
- Murakami, N., 1974, Some problems concerning late Mesozoic to early Tertiary igneous activity on the inner side of Southwest Japan. *Pacific Geol.*, 8, 139-151.
- Na, C.K., 1994, Genesis of granitoid batholiths of Okchon zone, Korea and its implications for crustal evolution. *Ph.D. dissertation, Univ. Tsukuba*, 154p.
- Nakajima, T., 1994, The Ryoke plutonometamorphic belt : crustal section of the Cretaceous Eurasian continental margin. *Lithos*, 33, 51-66.
- Nakajima, T., 1996, Cretaceous granitoids in SW Japan and their bearing on the crust-forming process in the eastern Eurasian margin. In : *The third Hutton symposium on the origin of granites and related rocks* (ed. M. Brown *et al.*), *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, 315, 183-191.
- Nakajima, T., Shirahase, T. and Shibata, K., 1990, Along-arc lateral variation of Rb-Sr and K-Ar ages of Cretaceous granitic rocks in Southwest Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 104, 381-389.
- Otofugi, Y. and Matsuda, T., 1984, Timing of rotational motion of Southwest Japan inferred from paleomagnetism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70, 373-382.
- Pearce, J.A., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In : *Continental basalts and mantle xenoliths* (ed. C.J. Hawkesworth and M.J. Norry), *Shiva, Nantwich*, 230-249.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour.*

- Petrol., 25, 956-983.
- Roddick, J.A., 1983, Circum-Pacific plutonic terranes: an overview. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 159, 1-3.
- Schmidt, M.W., 1992, Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110, 304-310.
- Shin, S.C. and Nishimura, S., 1993, Thermal and uplift histories of Mesozoic granites in Southeast Korea: new fission track evidences. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 2, 104-121.
- Steiger, R. and Jäger, E., 1977, Submission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmo- chronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 359-362.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1998, Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Jour. Metamorphic Geol.*, 16, 23-37.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1981, The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Phil. Trans. R. Soc.*, A301, 381-399.
- Terakado, Y. and Nakamura, N., 1984, Na and Sr isotopic variations in acidic rocks from Japan: significance of upper-mantle heterogeneity. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 87, 407-417.
- Terakado, Y. and Nohda, S., 1993, Rb-Sr dating of acidic rocks from the middle part of the Inner Zone of southwest Japan: tectonic implications for the migration of the Cretaceous to Paleogene igneous activity. *Chem. Geol.*, 109, 69-87.
- Tilton, G.R., 1983, Evolution of depleted mantle: The lead perspective. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1191-1197.
- Todt, W., Cliff, R.A., Hanser, A. and Hofmann, A. W., 1996, Evaluation of a  $^{202}\text{Pb}$ - $^{205}\text{Pb}$  double spike for high-precision lead isotope analysis. In: *Earth process: Reading the isotopic code* (ed. A. Basu and S. Hart), *Geophy. Monograph Series*, 95, 429-437.
- Weaver, B. and Tarney, J., 1984, Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, 310, 575-577.
- White, A.J.R. and Chappell, B.W., 1977, Ultrametamorphism and granitoid genesis. *Tectonophysics*, 43, 7-22.
- Wilson, M., 1989, *Igneous petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Zartman, R.E and Doe, B.R., 1981, Plumbotectonics-the model. *Tectonophysics*, 75, 135-162.

(책임편집: 좌용주)

(1998년 7월 6일 접수, 1998년 9월 1일 수리)

## Geochemical and Isotopic Study of the Onjeongri Granite in the Northern Gyeongsang Basin, Korea : Comparison with Cretaceous to Tertiary Granitic Rocks in the Other Part of the Gyeongsang Basin and the Inner Zone of Southwest Japan

Chang Sik Cheong, Sung Tack Kwon<sup>1</sup>, Jeong Min Kim and Byung Uck Chang

*Isotope Research Group, Korea Basic Science Institute  
52 Eoeun Dong, Yusong Ku, Taejeon, Korea 305-333  
<sup>1</sup>Department of Earth System Science, Yonsei University  
134 Shinchon Dong, Seodaemun Ku, Seoul, Korea*

**ABSTRACT** : We analyzed geochemical and radiogenic isotope data to investigate the genesis and source characteristics of the Onjeongri granite in the northern part of the Gyeongsang Basin. Field observation and K-Ar ages confirm late Cretaceous intrusion (ca. 87 Ma) of the Onjeongri granite. The hornblende geobarometry gives less than 2 kbar for the emplacement pressure of the Onjeongri granite. Geochemical and isotopic compositions suggest that the Onjeongri granite was formed in a relatively immature arc system. SiO<sub>2</sub> contents show a negative linear relationship with initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios, and an apparent positive correlation with <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb ratios, suggesting an incomplete mixing or assimilation. However, the isotopic data known for any exposed rocks of the study area do not fit as an endmember, implying that the contaminant might reside in the lower crust. A review of published isotopic ages, geochemical, and Sr and Nd isotopic data for the Cretaceous to Tertiary granites in the Gyeongsang Basin indicates the followings. 1) Granitic magmatism in the Gyeongsang Basin were episodic. 2) Granitic rocks in the basin were derived from young (<0.9 Ga) lower crust, and their isotopic signatures reflect heterogeneous source region. Geochemical and isotopic signatures of granitic rocks in the basin are difficult to explain by upper crustal contamination. 3) Granites in the Gyeongsang Basin have closely related to those in the San'in Belt of the Inner Zone of Southwest Japan in terms of age, petrography, and isotopic and geochemical composition. 4) Sr-Nd isotopic signatures of the Onjeongri granite are relatively primitive compared with granitic rocks in the other parts of the Gyeongsang Basin and in the Inner Zone of Southwest Japan.

**Key words** : Onjeongri granite, Late Cretaceous intrusion, Immature arc system, Episodic, Lower crust