

## 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구 II. 미량원소 지구화학과 Rb-Sr 방사성 연대

좌 용 주\*

### Petrology of the Igneous Rocks in the Goseong area, Gyeongsang Basin II. Trace Element Geochemistry and Rb-Sr Radiometric Age

Yong-Joo Jwa\*

**ABSTRACT** : The igneous rocks in the Goseong area are composed of the volcanic rocks (andesitic lapilli tuff and rhyodacite), Bulgugsa granites (hornblende-biotite granite and two pyroxene granite) and intrusive andesites. In the variation diagrams of the trace and rare earth element contents and elemental ratios as well as the REE patterns, the three igneous rock types show different variational trends and patterns. The geochemical features represent that the igneous rocks in the area were formed from three different magmatic pulses. Two independently carried out Rb-Sr isotope experiments for the Goseong granites show that the whole rock ages and Sr initial ratios of the granites are  $66.4 \pm 6.2$  Ma,  $0.70517 \pm 22$  ( $2\sigma$ ) and  $71.3 \pm 6.8$  Ma,  $0.70506 \pm 18$  ( $2\sigma$ ), respectively. These results suggest that the granitic magma originated from the lower crustal materials of igneous origin intruded into the area during the late Cretaceous period. Masan hornblende-biotite granite emplaced at the vicinity of the Goseong area is very similar to the Goseong granite in its mineral compositions, major, trace and rare earth element contents and patterns. The intruding age (100 Ma) of the Masan granite is older than that of the Goseong granite, however. The similarity of the geochemical natures but the contrast of the intruding ages between the Masan and Goseong granites possibly indicate that the magma generation from the same source materials occurred at a temporal interval of ca. 30 Ma.

### 서 론

경상분지의 백악기 화성활동은 주로 안산암질 및 유문암질의 화산암류와 불국사 화강암류로 대표되며, 화산암류와 화강암류는 서로 성인적인 연관성이 있을 것으로 추정되기도 하였다 (Jin, 1981; 1985; 김상욱, 1986; 이상만 등, 1987). 그러나 동일지역에 산출되는 화산암류와 화강암류의 성인적 관련성을 방사성 연대와 지구화학 자료를 근거로 구체적으로 논의된 사례는 드물다. 고성지역은 화산암류와 화강암류가 함께 산출되는 지역으로 화산암류의 활동과 화강암류의 활동을 살피는데 적합한 지역이다. 좌용주, 박정미 (1996)는 이 지역 화산암류의 주성분원소에 대한 지구화학적 특징과 K-Ar 방사성 연대를 보고하

였다 (화산암류의 경우 51~59 Ma, 화강암류의 경우 61~64 Ma). 이들에 따르면, 고성지역의 화성활동은 대체로 백악기 말~제3기 초에 일어났으며, 화산암류, 화강암류 및 관입 안산암류는 주성분 원소의 변화에서 각각 서로 다른 경향을 보여 화성활동을 유발시킨 마그마는 세 종류의 서로 다른 펄스로 구분됨이 지적되었다.

이 논문에서는 미량원소 및 희토류원소 자료를 토대로 고성지역의 화산암류와 화강암류의 성인적 관련성을 검토하며, 또한 고성지역 화강암류와 인근지역 화강암류 사이의 지구화학적 유사성이 검토될 것이다. 한편, Rb-Sr법에 의한 고성지역 화강암류의 전암연대를 보고함으로써 보다 구체적인 화강암질 마그마의 관입시기를 제시할 것이다.

### 지질개요

고성지역의 지질은 하부로부터 하양층군의 진동층, 유천층군의 고성층과 옹희암층 및 불국사 관입암군으로 이

\* 경상대학교 자연과학대학 지구환경과학과 (Department of Earth & Environmental Sciences, Gyeongsang National University, Chinju 660-701, Korea), E-mail: jwayj@non-gae.gsnu.ac.kr.

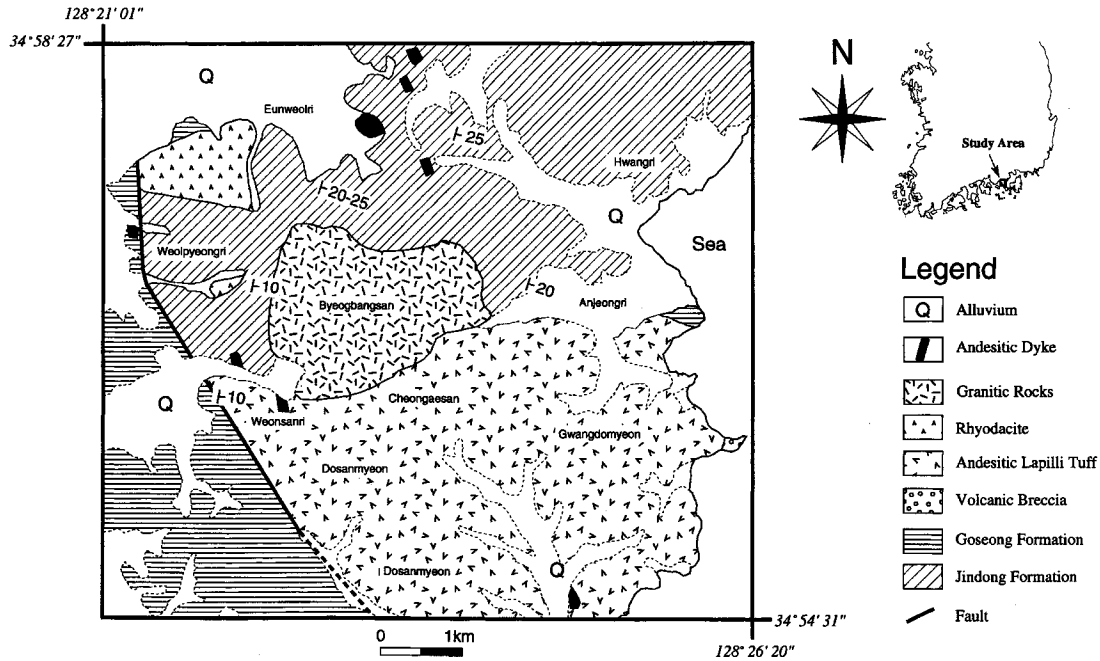


Fig. 1. Geologic map of the Goseong area.

루어져 있다 (Fig. 1). 진동층은 연구지역의 북동부에 넓게 분포하며 주로 흑색, 암회색 및 녹회색의 세일로 구성되나, 이암이 협재되어 산출되기도 한다. 화강암과의 접촉부에서는 혼펠스화되어 있다. 고성층은 연구지역의 서부 일대와 동부의 제한된 지역에 나타난다. 서부 일대에 나타나는 고성층은 역암, 사암, 세일, 이암 등으로 구성되는 반면 동부 지역의 암상은 주로 사암과 세일의 호층이지만 암회색의 세일이 우세하게 나타난다. 고성층과 하부의 진동층의 경계는 확인되지 않는 반면, 고성층과 상부의 래필리 응회암과의 경계는 연구지역 동쪽 해안에서 경사부 정합의 관계로 잘 나타난다.

넓은 분포 면적의 안산암질 래필리 응회암은 고성층을 피복하고 있다. 이 안산암질 래필리 응회암은 이 지역 화산암류들 중에서 최초의 분출물로 생각되며, 안산암과 화강암에 의해 관입 당하고 있다. 암회색 내지 녹회색의 안산암질인 이 암석은 대부분이 화성쇄설물이며, 입자의 크기로 볼 때 래필리 응회암으로 구분된다. 이 래필리 응회암은 안산암의 기질에 반상 안산암, 비현정질 안산암, 응회암 등의 래필리들이 다량 함유되어 있고, 사장석 등의 광물편들이 특징적으로 나타난다. 안산암질 래필리 응회암이 관입 안산암이나 화강암의 관입을 받고 있는 지역에서는 열변성에 의한 혼펠스화가 두드러지게 나타난다.

연구지역의 안산암류는 그 산상이 다양하다. 일부는 용

암류로서 분출하여 고성층의 최상부 및 래필리 응회암 중에 협재되어 있다. 그러나 대개의 경우 안산암류는 맥상 및 암주상으로 래필리 응회암을 관입하고 있다. 맥상으로 관입하고 있는 안산암류는 주로 치밀한 조직을 가지는 괴상을 나타내지만, 암주상으로 관입한 안산암류는 주로 반상조직의 특징을 지니며 주상절리가 발달해 있다. 이 관입 안산암류의 반정은 주로 사장석, 단사휘석으로 구성되는데, 사장석은 라브라도라이트의 조성을, 단사휘석은 보통휘석의 조성을 나타낸다.

연구지역의 북서부에는 유문암질 석영안산암이 분포하고 있다. 노두에서는 매우 뚜렷한 주상절리를 보이며, 반상조직이 현저한 암석이다. 반정은 주로 자형의 사장석과 융식된 석영으로 되어 있고, 석기는 세립의 사장석과 석영 그리고 일부 미정질 광물들로 이루어진다. 한편, 연구지역의 남동쪽에는 유문암의 용암류가 소규모로 분포하고 있다. 이 유문암은 회백색을 띠며, 유상구조를 잘 나타내나 그 방향은 일정하지 않다. 연구지역 화산암류의 분출순서는 먼저 안산암질의 래필리 응회암과 일부 안산암의 용암류의 분출이 있었고, 그 다음에 유문암질 석영안산암의 분출, 그리고 마지막으로 유문암의 분출이 있었을 것으로 보고되었다 (좌용주, 박정미, 1996).

화강암류는 연구지역의 중심부 (벽방산과 천개산 일대)에 분포하고 있으며, 기저의 진동층과 안산암질 래필리

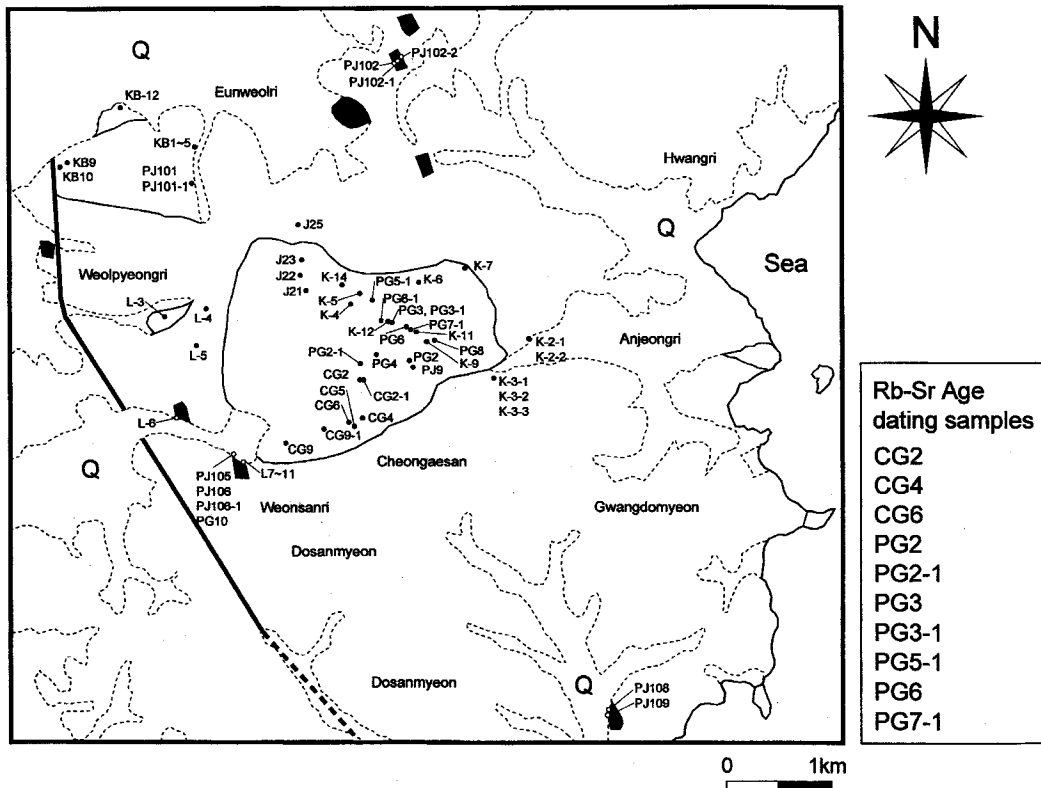


Fig. 2. Map of sample localities.

응회암층을 관입하였다. 화강암류는 그 대부분이 각섬석-흑운모 화강암이나 암체의 중앙부에서는 보다 매끈한 복회석 화강섬록암의 암상이 나타난다. 그러나 그 변화가 매우 점이적이고 분포 또한 불규칙하여 지질경계로 구분할 정도는 아니다. 이 화강암류에는 동원의 화강암질 포획암이 종종 나타나지만, 응회암류 및 안산암류 등의 이질 포획암은 관찰되지 않는다.

각섬석-흑운모 화강암은 중립질 내지 세립질이며, 구성 광물은 사장석, K-장석, 석영, 흑운모, 각섬석, 단사휘석, 불투명광물 등으로 되어 있다. 유색광물로 나타나는 흑운모, 각섬석, 단사휘석은 자형 내지 반자형을 나타낸다. 자형 내지 반자형의 사장석은 알바이트 쌍정과 칼스바드 쌍정을 잘 보여준다. K-장석은 주로 퍼사이트이다. 흑운모는 대체적으로 녹니석화되어 있다. 각섬석은 주로 자형 내지 반자형으로 단순쌍정을 잘 나타낸다.

중립질이며 우백질인 복회석 화강섬록암은 암체의 중앙부인 벽방산 정상부에 주로 분포한다. 각섬석-흑운모 화강암과 주구성광물은 유사하나 유색광물로서 단사휘석, 사방휘석 및 흑운모를 가지나 각섬석을 포함하지 않는 점

이 다르다. 또 단사휘석과 불투명광물의 함량이 높게 나타나는 점도 다르다. 사방휘석은 대개가 자형으로 나타나고 엔스테타이트 ( $En_{60}Fs_{40}$ )의 조성을 보이지만, 단사휘석은 자형 내지 반자형으로 투회석 ( $Di_{70}Hd_{30}$ )의 조성을 나타낸다.

연구지역 화강암류는 그 모드조성에서 주로 monozoned 화강암에서 석영몬조섬록암에 이르는 연속적인 조성을 나타낸다 (좌용주, 박정미, 1996). 연구에 사용한 시료의 채취 지점을 Fig. 2에 나타내었고, 시료채취 지점의 좌표는 좌용주, 박정미 (1996)의 Table 2에서 찾을 수 있다.

### 미량원소 지구화학

미량원소, 희토류원소에 대한 화학 분석은 기초과학지원연구소의 ICP-MS를 이용하여 실시하였으나, 일부 미량원소 (Rb, Sr, Zr)는 일본 지질조사소의 XRF를 사용하여 분석하였고, 분석의 결과를 Table 1에 나타내었다.

$SiO_2$ 의 함량을 분화지수로 사용하여 화산암류 (래필리 응회암과 유문암질 석영안산암), 화강암류 및 관입 안산

**Table 1.** Trace element and REE compositions (in ppm) of the igneous rocks in the Goseong area.

	Granitic rocks														
	CG2	CG2-1	CG4	CG5	CG6	PG2	PG2-1	PG3	PG3-1	PG4	PG5-1	PG6	PG6-1	PG7-1	
SiO <sub>2</sub>	66.91	66.58	65.97	64.20	65.61	68.91	61.83	68.74	60.49	68.85	69.01	68.20	65.90	65.47	
Ba	660	689	637	644	620	554	491	564	475	502	514	560	531	510	
Rb*	184	209	186	171	166	224	117	264	104	224	206	185	172	173	
Sr*	297	162	264	306	284	234	398	132	439	221	242	261	302	299	
Y	32.7	27.7	35.5	37.8	29.5	27	29.2	28.1	26.2	25.6	22.6	22.6	22	22.8	
Zr*	238	210	258	280	254	255	199	217	196	219	210	226	230	228	
Nb	4.3	10.9	12	12.1	11.2	16	8.8	9.2	7.5	8.5	8.4	8.1	7.2	7.9	
Th	20	18.3	22.4	20.5	20.9	22.9	12	22.1	13.2	24.1	23.8	23.9	20.2	21.7	
Ga	27.1	30.1	33.6	31.9	33	30.3	27.7	27	28	27.2	25.6	28.4	28.6	26.3	
Ni	10.7	4.6	18.5	8	5.8	4	8	3.7	10.5	1.8	2.4	2.1	2.5	2.6	
Cr	5.8	7.1	9.6	12.5	8.3	7.4	17.9	8.6	14.1	4.1	4.5	4.3	5.6	6.2	
Hf	0.86	2.2	2.5	2.7	2.4	1.9	0.61	2.2	0.85	2	2	2.3	1.6	2	
Cs	13.8	13.8	12.4	9.7	12.2	20	5.5	11.9	4.6	10.1	16.7	12.3	13.5	12	
Sc	10.4	10.2	12.2	16	10.4	9.1	17.9	9.1	15.3	7.5	6.5	6.4	8.1	8.3	
Ta	0.17	1.2	0.96	0.57	1.3	0.68	0.47	0.61	0.85	0.77	1.1	0.83	0.6	0.81	
Co	8.7	9.1	9.5	13.7	13.3	4.9	20.8	6.1	16.5	4.4	4.8	5.8	8.5	7.8	
U	3.4	3.8	4.1	4.4	3.8	3.9	2.4	4.3	2.8	5.2	5	5.4	4.1	3.6	
Pb	25.5	23.9	16.1	28.9	13.1	37.4	14.1	36	14.3	74.8	15.1	91.4	29.1	27.3	
Zn	30.1	49.5	28.8	44.8	12	151	68.7	60.1	66.1	117	36.7	98.5	57.1	51.8	
Cu	27.9	15.6	11.2	15.7	6.4	21	19.7	11.2	24.9	15.4	3.8	12.5	10.9	10.8	
Mo	0.89	0.59	0.69	1	0.84	0.8	1.5	1.1	1.4	2.4	0.7	0.5	1.2	0.54	
La	41.6	35	40.6	42.8	37.8	35.7	28.8	34.8	28.9	36	34.8	32.6	31.6	30.3	
Ce	83.2	70.7	82.5	88.2	79.1	73.3	61.1	71	62.2	73.5	68.9	66.5	64.1	62.8	
Pr	9.5	8.2	9.7	10.4	9.3	8	7.2	7.6	7.4	8.2	7.7	7.6	7.3	7.3	
Nd	33.5	28.3	34.7	37.7	32.7	28	28.3	28	29.3	29.7	27.9	27.9	27.5	27.6	
Sm	6.4	5.3	6.6	7.4	6.4	5.2	5.7	5.3	5.8	5.7	5.1	5.1	5.1	5.3	
Eu	1.16	1.06	1.14	1.2	1.18	0.92	1.33	0.88	1.28	0.93	0.91	0.95	1.07	1.05	
Gd	4.9	4.4	5.3	6.2	5.1	5	5.4	4.9	5.4	5	4.7	4.9	4.9	5.2	
Tb	0.72	0.63	0.79	0.92	0.76	0.71	0.76	0.68	0.78	0.74	0.68	0.7	0.72	0.75	
Dy	4.1	3.7	4.6	5.5	4.3	4.3	4.9	4.2	4.8	4.5	4.2	4.3	4.5	4.7	
Ho	0.8	0.74	0.93	1.11	0.89	0.86	0.91	0.81	0.94	0.87	0.79	0.86	0.87	0.92	
Er	2.4	2.2	2.8	3.2	2.7	2.6	2.7	2.4	2.7	2.6	2.5	2.5	2.5	2.8	
Tm	0.35	0.32	0.39	0.47	0.37	0.35	0.35	0.34	0.39	0.39	0.35	0.37	0.36	0.4	
Yb	2.3	2.2	2.6	3.3	2.5	2.5	2.3	2.2	2.7	2.6	2.5	2.6	2.5	2.8	
Lu	0.34	0.34	0.41	0.49	0.39	0.37	0.34	0.32	0.39	0.38	0.36	0.36	0.37	0.38	

\* Elements analyzed by XRF method.

암에 함유된 미량원소의 변화 경향을 살펴보았다 (Fig. 3). 화강암류와 관입 안산암에 있어 SiO<sub>2</sub>에 대한 Ba, Zr, Ga, Sc 등의 함량 변화는 일견 연속성이 있는 것처럼 보이며, 화강암류와 화산암류의 경우 Sr, Co에서 어느 정도의 연속성이 보인다. 그러나 이들 세 화성암류에 대해 Rb, Th, Hf, Cs 등의 원소는 매우 다른 변화 경향을 보이고, 그 외의 미량원소들은 분산이 심하여 상호관계를 살필 수 없다. 이러한 상대적인 변화 경향은 이들 세 화성암류 사이에 결정분화에 의한 마그마 조성의 연속성이 없음을 지지하는 것이다. 이 결과는 미량원소 사이의 상대적인 함량 변화에서도 뚜렷하게 나타난다 (Fig. 4). 일반적으로 마그마의 결정분화과정에서 계산되는 미량원소의

상대적인 원소함량의 변화는 Rb-Sr, Rb-Ba의 변화도에서 직선적인 관계를 나타내지만 (예; 좌용주, 1996; Tsusue *et al.*, 1986), Fig. 4의 관계에서는 전혀 그런 관계를 보이지 않는다. 이 사실은 이 세 화성암류가 어떤 특정 초기 마그마로부터의 결정분화의 산물이 아님을 가리키며, 따라서 이 세 화성암류를 형성시킨 마그마는 성인적으로 다른 독자적인 마그마 펄스에 유래한다. 이 고찰은 좌용주, 박정미 (1996)가 주성분원소 지구화학으로부터 추정한 결론과 일치한다.

희토류원소의 패턴으로부터 관입 안산암류는 낮은 LREE/HREE의 비 (3.5~6)와 약한 Eu 음의 이상을 나타낸다 (Fig. 5b). 한편, 화강암류와 화산암류는 관입 안산

Table 1. Continued.

	Intrusive andesite				Rhyodacite		Lapilli tuff		
	PJ106	PJ106-1	PJ108	PJ109	PJ101	PJ101-1	CG9	PG10	PJ105
SiO <sub>2</sub>	51.97	55.17	55.67	58.54	69.79	69.78	69.99	68.47	65.54
Ba	208	262	306	396	731	665	700	547	347
Rb*	116	55	67	67	104	101	130	130	77
Sr*	457	543	575	305	234	235	181	182	433
Y	19.5	21	27.1	28.5	20.9	19.5	29.4	24.3	15.1
Zr*	111	117	151	184	213	213	222	228	267
Nb	4.5	3.4	9.5	4.9	7.6	7.3	7.7	6.3	4.1
Th	3.5	4.2	4.6	5.6	16.7	16	10.5	11.9	21.2
Ga	22.1	19.3	20.2	25.5	31.2	30	34.9	25.4	23.3
Ni	6.8	20.2	7.1	5.7	0	0	3.3	0	8.6
Cr	29.6	48.4	31.1	9.7	0.96	0	2.1	1.1	22.6
Hf	2.2	2.8	4.3	5	5.7	4	4.6	5.3	5.9
Cs	7.6	5	3.1	2.1	5.4	4.7	8.4	5.9	3.2
Sc	24.6	22.7	25.4	22.7	1.8	1.7	8	6	5.2
Ta	0.74	0.22	0.12	0.32	0.82	0.68	0.57	0.61	0.01
Co	15.7	24.7	18.2	17.3	0.34	0.33	4.1	3.5	5.3
U	0.74	1.2	1.2	1.5	3.9	4.1	2.8	3.1	3.2
Pb	18.4	38.3	9.4	27.2	18.2	17.5	17.1	41.2	18.5
Zn	100	156	72.5	152	52.5	59	9.3	72	48.3
Cu	2.5	4.8	22.2	60.8	0.69	0.24	1.8	6.5	8.8
Mo	0.23	0.11	0.94	0.41	0.76	0.47	0.18	0.51	1.91
La	15.7	13.8	16.7	18.8	34	33.3	27.6	20.7	37.6
Ce	33.4	30	37.5	42.9	69	66.5	55.6	42.6	76.1
Pr	4.3	3.9	5	5.7	7.8	7.4	6.6	5.2	8.5
Nd	18.2	16.3	21.5	23.9	29	27.8	24.3	20.5	31.1
Sm	4	3.8	5.1	5.4	5	4.8	4.8	4.3	5.3
Eu	0.99	1.06	1.35	1.52	1.03	1.04	1.04	1.06	1.13
Gd	3.9	4.1	5.3	5.8	4.8	4.8	4.4	4.7	5.6
Tb	0.58	0.64	0.81	0.88	0.71	0.73	0.71	0.76	0.76
Dy	3.6	4.1	5.2	5.8	4.6	4.5	4.3	4.9	4.6
Ho	0.72	0.82	1.08	1.17	0.95	0.92	0.89	1.02	0.9
Er	2.1	2.5	3.4	3.6	3	2.8	2.7	3.2	2.6
Tm	0.27	0.32	0.47	0.5	0.45	0.45	0.41	0.47	0.39
Yb	1.9	2.4	3.3	3.6	3.5	3.1	2.9	3.5	2.7
Lu	0.27	0.34	0.47	0.55	0.52	0.44	0.47	0.53	0.38

Table 2. Rb-Sr isotope data of the granitic rocks in the Goseong area.

Sample	Korea Basic Science Institute				Geological Survel of Japan			
	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sup>(1)</sup>	Rb (ppm) <sup>(2)</sup>	Sr (ppm) <sup>(2)</sup>	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr <sup>(3)</sup>	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sup>(4)</sup>	Rb (ppm) <sup>(5)</sup>	Sr (ppm) <sup>(5)</sup>	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr <sup>(6)</sup>
CG2	0.706820±8	180.9	272.5	1.9205				
CG4	0.707123±6	185.3	250.3	2.1418				
CG6	0.706737±9	160.8	274.3	1.6959	0.706790±7	166.1	284	1.6920
CG2	0.707787±6	213.5	266.6	2.3170	0.707862±9	224.4	234	2.7746
PG2-1	0.706016±8	105.3	353.7	0.8612				
PG3	0.710485±6	252.4	127.4	5.7336	0.710564±7	263.5	132	5.7772
PG3-1	0.705622±7	98.6	412.6	0.6913	0.705675±6	104.4	439	0.6879
PG5-1	0.707468±7	201.1	240.6	2.4182				
PG6	0.707042±6	180.1	254.8	2.0449	0.707199±7	184.8	261	2.0485
PG7-1	0.706816±8	164.1	288.0	1.6484	0.706869±7	172.5	299	1.6691

(1), (4), Standard deviation by 2 sigma.

(2), The value of NBS987 during experiment was 0.71021; (4), 0.71025.

(3), Analyzed by isotopic dilution method; (5), by XRF method.

(6), Uncertainty is below 1%, (6), Below 5%

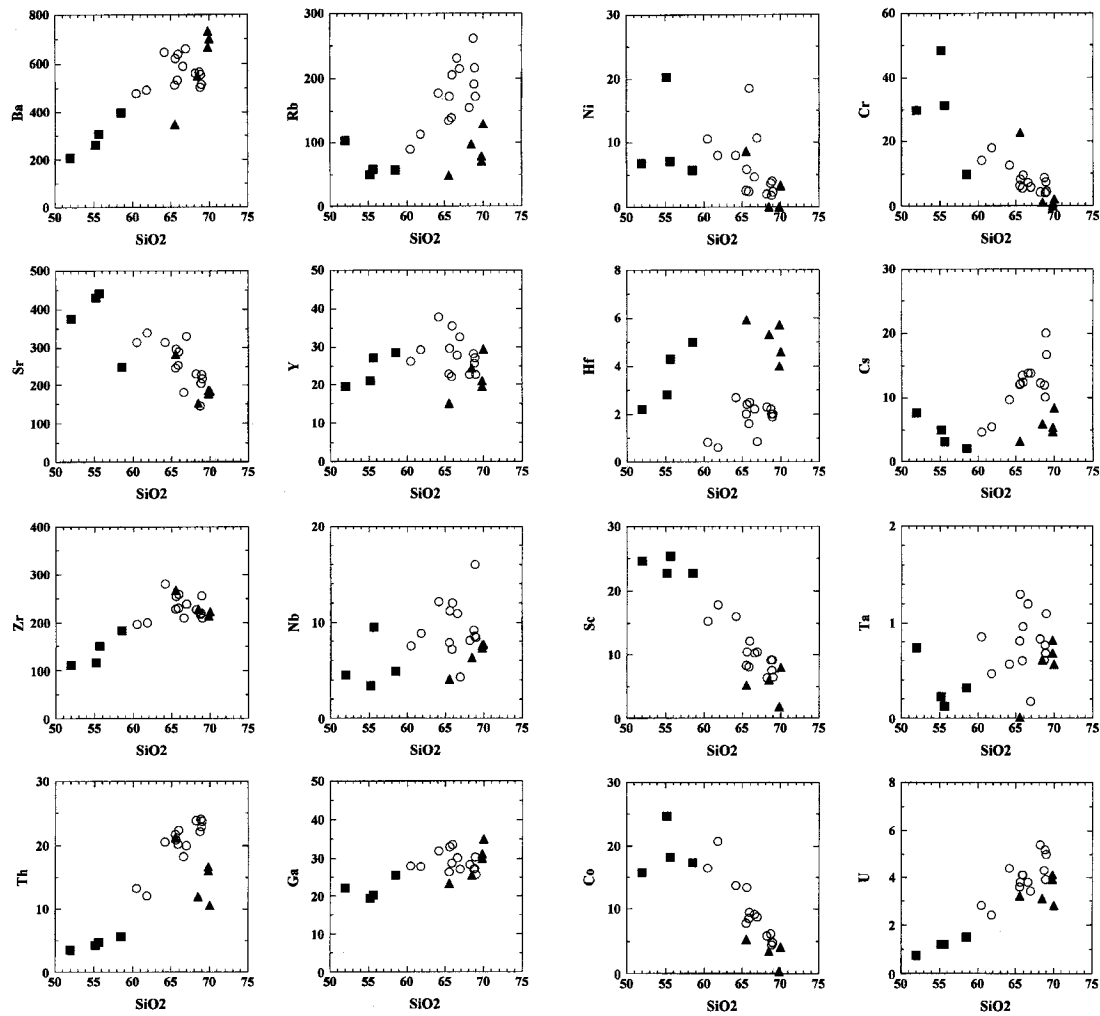


Fig. 3.  $\text{SiO}_2$  versus trace element variation diagrams of the igneous rocks in the Goseong area. Symbols: solid triangle, volcanic rocks (lapilli tuff and rhyodacite); circle, granitic rocks; solid square, intrusive andesites.

암류에 비해 높은 LREE/HREE의 비 (7.5~13와 4~10)와 뚜렷한 Eu 음의 이상을 보이는데 (Fig. 5a, 5c), 화강암류의 경우가 화산암류에 비해 높은 LREE/HREE의 비와 보다 뚜렷한 Eu 음의 이상을 보인다. 한편,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{cn}}$ 로 나타낸 LREE/HREE 비의 변화를  $\text{SiO}_2$ 에 대해 살펴보면 (Fig. 6), 분화에 따른 세 화성암류의 성인적 관련성이 없음을 알 수 있다. 한편, 관입 안산암의 경우 분화가 진행될수록  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{cn}}$ 의 비는 감소하지만, 화강암류와 화산암류에서는 증가한다. 특히 화산암류의 경우 한 시료를 제외하면 이 비는 매우 급격히 증가한다. 이 사실은 관입 안산암류의 경우 분화가 진행됨에 따라 LREE가 분배되는 광물상이 제거되거나 혹은 HREE가 분배되는 광물상이 증가됨을 가리키며, 화산암류의 경우 분화에 따

라 급격히 HREE에 결핍되는 것은 HREE가 분배되는 광물상이 분화과정에서 제거되었을 가능성을 지시한다.

미량원소의 함량으로부터 화강암류의 관입 환경을 추정할 수 있는데 (Pearce *et al.*, 1984), 고성지역 화강암류는 화산호 환경에 관입한 것으로 생각된다 (Fig. 7).

### 화성암류의 Rb-Sr 연대

고성지역 화강암류의 Rb-Sr 전암연대는 기초과학지원연구소의 열이온화 질량분석기 (TIMS)와 일본 지질조사소의 VG-질량분석기를 이용하여 각각 독립적으로 측정되었고, 그 결과들은 Table 2와 Fig. 8에 나타내었다. 기초과학지원연구소의 자료로부터 계산된 전암연대와 Sr

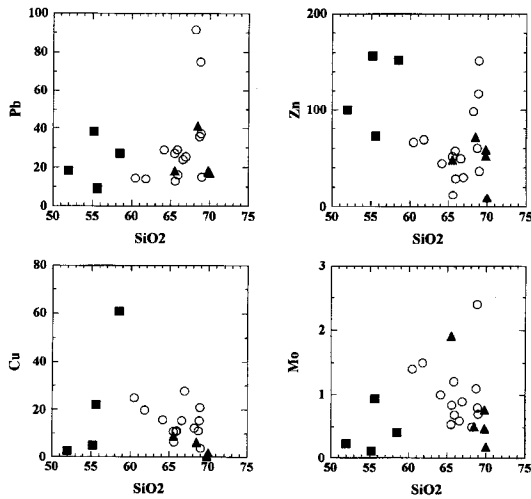


Fig. 3. Continued.

초생값은  $66.4 \pm 6.2$  Ma,  $0.70517 \pm 22$  ( $2\sigma$ )이며, 일본 지질조사소의 자료로부터는  $71.3 \pm 6.8$  Ma,  $0.70506 \pm 18$  ( $2\sigma$ )이 얻어졌다. 이렇게 독립적으로 구해진 두 연대 및 Sr 초생값들은 오차범위 내에서 매우 잘 일치한다. 이 결과는 고성지역에 관입한 화강암질 마그마는 그 근원물질이 화성기원의 하부지각이었고, 관입시기는 백악기말이었음을 가리킨다.

한편, 이 화강암류에 대한 K-Ar 흑운모 연대는 61~64 Ma로 Rb-Sr 전암연대와 거의 유사하다 (좌용주, 박정미, 1996). Rb-Sr 전암연대와 K-Ar 흑운모연대가 나타내는 폐쇄온도의 차이가 대략 300°C 정도임을 고려하면 고성지역의 화강암류는 매우 빠른 속도로 냉각한 암체임을 알 수 있다.

고성지역 화산암류의 경우 K-Ar 전암연대가 51~59 Ma를 가리킨다 (좌용주, 박정미, 1996). 화산암류는 화강암류보다 먼저 분출하였으므로 그 K-Ar 방사성연대는 화강암질 마그마의 관입에 의한 열적인 영향으로 젊어진 것이며, 화산분출은 적어도 화강암류의 관입연대인 66~71 Ma보다 이전일 것이다.

고성지역의 동쪽에는 마산암체, 진해암체 및 부산암체 등의 화강암체가 분포하고 있다. 이들 중에서 고성지역 화강암류와 유사한 Rb-Sr 전암연대와 Sr 초생값을 보이는 것은 진해암체의 흑운모 화강암 ( $70.5 \pm 6$  Ma,  $0.70497 \pm 6$ ), 부산암체의 양산 흑운모 화강암 ( $70.6 \pm 4.2$  Ma,  $0.70531 \pm 29$ )과 구포 흑운모 화강암 ( $68.8 \pm 3.4$  Ma,  $0.70579 \pm 28$ ) 등이 있다 (Lee, 1991). 고성지역을 포함한 진해, 부산지역에서는 백악기 말에 거의 동시기적인 화강암류의 관입이 있었고, 마그마의 근원물질도 유사했음이

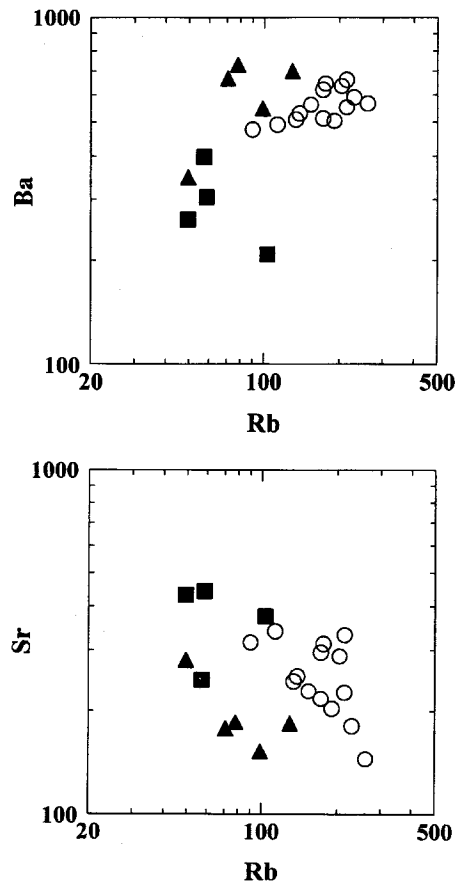


Fig. 4. Rb versus Ba and Rb versus Sr variation diagrams. Symbols are the same as those in Fig. 3.

지적된다. 그러나 마산암체의 각섬석-흑운모 화강암의 경우  $100.1 \pm 7.1$  Ma와  $0.70489 \pm 12$ 를 나타내어 Sr 초생값은 오차범위 내에서 유사하지만, 관입연대에는 약 30 Ma의 차이가 있다. 결국 경상분지의 동남부지역에서는 70 Ma 전후에 유사기원의 화강암질 마그마의 관입이 매우 활발했으나, 그보다 오랜 화강암의 관입도 있었음이 지적된다.

### 마산 각섬석 흑운모 화강암과의 비교

고성지역 동쪽에 분포하는 마산암체는 각섬석-흑운모 화강암과 미문상 화강암으로 이루어진다. 이 중에서 각섬석 흑운모 화강암은 고성지역의 화강암류와 기재적으로 매우 유사하다. 또한 좌용주, 박정미 (1996)는 고성지역 화강암류와 마산지역 각섬석-흑운모 화강암류 사이에 주성분원소의 지구화학적 특성도 매우 유사함을 보고하였

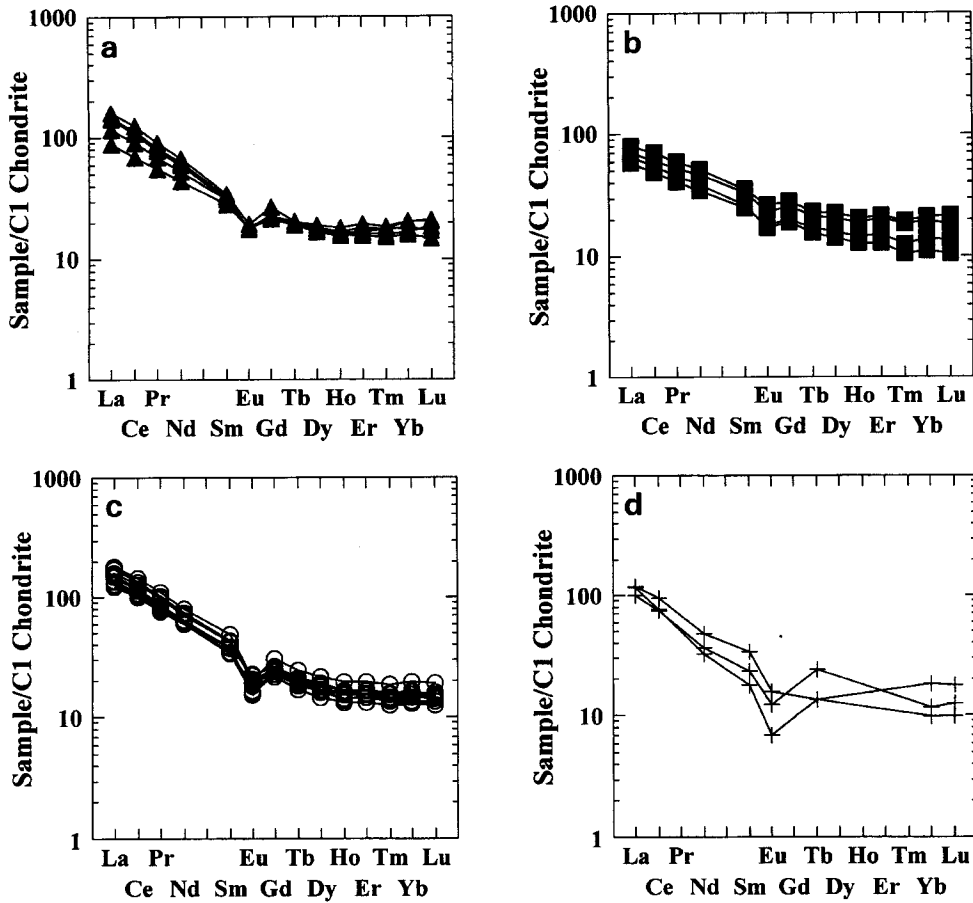


Fig. 5. Chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns. (a) volcanic rocks, (b) intrusive andesites, (c) granitic rocks, (d) Masan hornblende-biotite granite. Normalization values for C1 chondrite were cited from Sun and McDonough (1989).

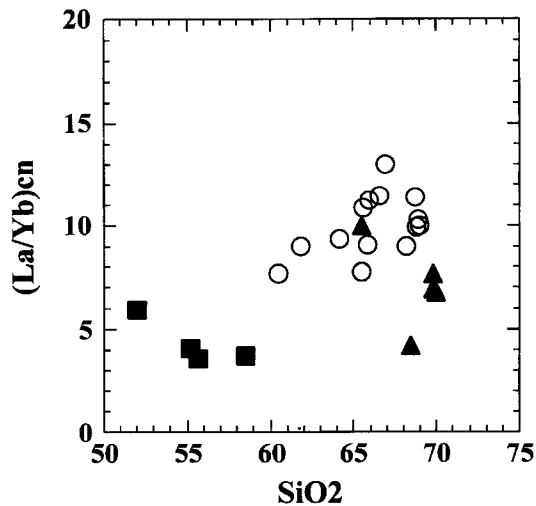


Fig. 6. SiO<sub>2</sub> versus chondrite-normalized (La/Yb)<sub>cn</sub> variation diagram. Symbols are the same as those in Fig. 3.

다. 다만, 위에서 지적한 것처럼 이 두 화강암류는 그 관입연대가 다르다.

일반적으로 주성분 원소의 변화 경향이 유사하다는 것은 암체를 형성시킨 마그마 활동이 동시기는 아닐지라도, 그 초생 마그마 또는 마그마를 발생시킨 근원 물질이 유사했거나, 거의 동일한 마그마 과정으로 분화했음을 시사한다. 경상분지의 화강암류처럼 그 기원이 보통 맨틀 혹은 화성기원의 하부지각물질이고 (Hong, 1987), 마그마 과정에서 지각물질의 혼입이 극히 제한적인 경우에 초생 마그마의 화학적 성질은 근원 물질의 화학적 성질을 반영할 수 있다. 이러한 사실을 검증하기 위해 두 화강암류에 있어 미량원소와 희토류원소의 패턴을 서로 비교·검토하였다 (Fig. 5; Fig. 9). 마산 각섬석-흑운모 화강암에 대한 자료는 Lee (1991)에서 인용하였다.

Fig. 5의 (c)와 (d)에서 보는 바와 같이, 고성지역의 화강암류와 마산지역 각섬석-흑운모 화강암의 희토류원소



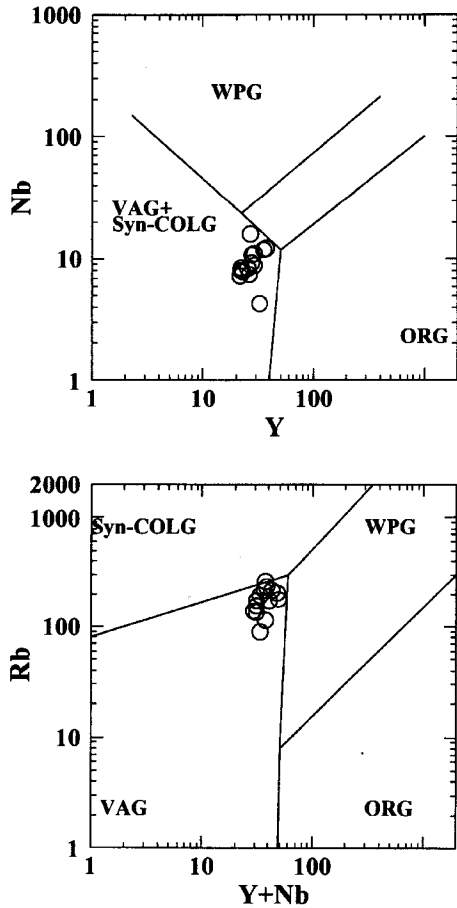


Fig. 7. Tectonic discrimination diagrams (after Pearce *et al.*, 1984). Abbreviations: syn-COLG, syn-collisional granite; VAG, volcanic-arc granite; WPG, within plate granite; ORG, oceanic-ridge granite. Symbols are the same as those in Fig. 3.

패턴은 전체적인 모습이나, LREE/HREE의 비 및 Eu 음의 이상 정도 등에서 매우 유사함을 알 수 있다. 미량원소의 함량에서도 이 두 화강암류는 거의 동일한 패턴을 보여준다 (Fig. 9). 이 사실들은 이 두 화강암류를 형성시킨 마그마의 초생적인 조성이 유사했고, 또 동일한 마그마과정으로 분화되었음을 지지하는 것이다.

초생 마그마의 조성이 유사함은 한편으로는 근원물질의 조성과 부분용융의 정도가 유사했으므로부터 기인할 수 있다. 다른 한편으로는 전혀 다른 근원물질이 서로 다른 부분용융의 정도를 거치면서 유사한 조성의 초생 마그마를 생성할 수도 있는데, 지하의 온도분포의 변화에 의해 부분용융의 정도가 다르게 나타날 가능성이 지적되는 것이다. Lee (1991)는 마산에서 부산에 이르는 지역의 화강암체에 대한 지구화학적 특징의 차이로부터 서쪽에서

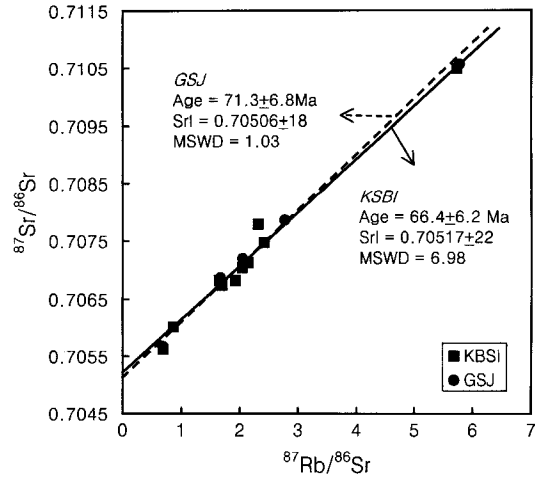


Fig. 8. Rb-Sr whole rock isochrons of the granitic rocks in the Goseong area. Solid squares and straight line indicate the data points and isochron deduced from the experimental results of the Korea Basic Science Institute (KBSI), whereas solid circle and dashed line from those of the Geological Survey of Japan (GSJ).

동쪽을 향해 화강암질 마그마의 근원물질이 다르며, 마그마 생성의 부분용융 정도가 감소하며, 관입연대와 관계없이 Sr 초생값이 증가함을 보고했다. 그러나 고성지역 화강암류는 마산암체의 서쪽에 위치함에도 불구하고 거의 유사한 (약간 높은) Sr 초생값을 가지며, 또한 유사한 지구화학적 특징을 가져, Lee (1991)의 보고와는 다른 양상이다.

보통 부분용융의 정도를 변화시키기 위해서는 지하의 온도분포를 변화시켜야 하고, 이를 위해서는 지각변동이나 연속적인 화성활동의 영향 등이 고려될 것이다. 그러나 고성과 마산지역 사이에 지온변화를 초래할 정도의 지각변동의 증거는 나타나지 않는다. 또한 두 화강암류 모두 유천층군의 화산쇄설암을 관입하고 있어 적어도 이 지역에서는 화강암류의 관입 이전에 화성활동이 있었고, 두 화강암류의 관입연대 사이의 화성활동의 증거는 발견되지 않기 때문에 연속적인 화성활동으로 인한 지온변화는 부정적이다. 결국 인접한 고성-마산지역에 관입한 화강암질 마그마를 생성시킨 근원물질과 부분용융의 정도가 달랐을 가능성은 크지 않다. 반면, 두 지역 화강암류에서 나타나는 지구화학적 특징과 Sr 초생값은 화강암류의 근원물질과 부분용융 정도가 유사했을 가능성을 제시하는 것으로 생각할 수 있다. 비록 30 Ma의 관입시기의 차이는 있지만, 고성암체와 마산암체를 형성한 화강암질 마그마의 초생적인 지구화학적 성질 및 마그마의 분화 경향이 유사했을 것으로 생각된다.

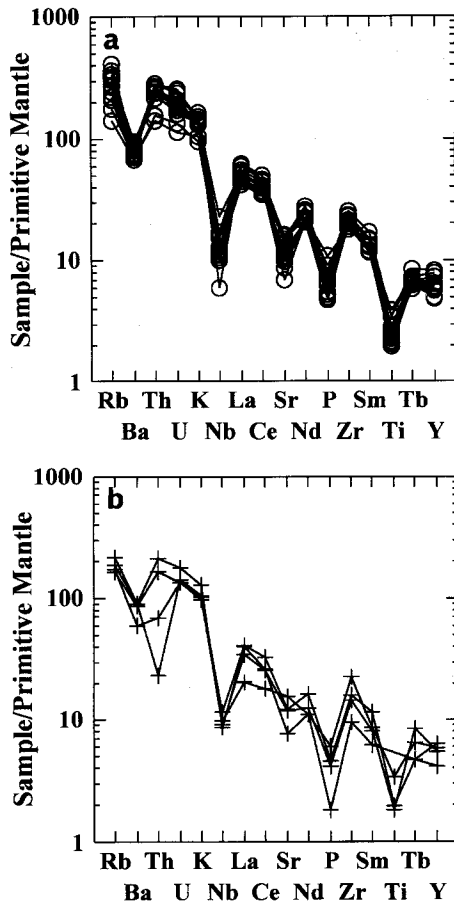


Fig. 9. Primitive mantle-normalized trace element patterns of the granitic rocks. (a) Goseong granitic rocks, (b) Masan hornblende-biotite granite. Normalization values for the primitive mantle were cited from Sun and McDonough (1989).

## 결 론

경상분지의 고성지역에 분포하는 화산암류, 화강암류 및 관입 안산암류는 미량원소의 함량변화에서 서로 다른 경향을 보여, 동일 초생 마그마로부터의 결정분화과정으로 생성될 수 없음을 나타낸다. 희토류원소의 패턴에서는 관입 안산암류, 화산암류, 화강암류로 갈수록 LREE/HREE의 비는 증가하고, Eu 음의 이상은 뚜렷해진다. 한편, 분화에 따른 LREE/HREE비의 변화는 세 화성암류에서 결정분화의 연속성이 없음을 나타낸다. 이러한 지구화학적 특징으로부터 고성지역의 화성활동을 유발시킨 마그마는 세 종류의 서로 다른 펄스로 구분됨을 알 수 있다.

두차례의 독립적으로 실시한 Rb-Sr 동위원소 연구에서 고성지역 화강암류는 전암연대와 Sr 초생값은 각각 66.4±

6.2 Ma,  $0.70517 \pm 22$  ( $2\sigma$ )와, 71.3±6.8 Ma,  $0.70506 \pm 18$  ( $2\sigma$ )이 얻어졌다. 이 결과는 고성지역에 관입한 화강암질 마그마는 그 근원물질이 화성기원의 하부지각이었고, 관입 시기는 백악기말이었음을 가리킨다.

고성지역 인근에 분포하는 마산 각섬석-흑운모 화강암은 그 암상, 조성분원소함량, 미량원소 및 희토류원소 패턴, Sr 초생값 등에서 매우 유사하지만, 관입연대가 100 Ma로 차이가 있다. 이 사실은 고성지역의 화강암류와 마산지역의 각섬석 흑운모 화강암은 그 마그마의 생성이 30 Ma 간격을 두고 동일한 근원물질로부터 유래되었으며, 마그마 생성에서 고결에 이르는 마그마과정의 유사했을 가능성을 제시한다.

## 사 사

Rb-Sr 동위원소 분석에 도움을 주신 기초과학연구소의 박계현 박사님, 일본 지질조사소의 T. Nakajima 박사님께 감사드립니다. 이 논문에 대한 검토와 지적을 해 주신 전북대학교 오창환 박사님과 익명의 심사자께 감사드립니다. 이 연구는 한국과학재단 특정연구 (94-1400-07-0103)의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 김상욱 (1986) 경상분지에서의 후기 백악기 화성활동에 관한 연구. 이상만교수 송수기념 논문집, 167-194.
- 이상만, 김상욱, 진명식 (1987) 남한의 백악기-제3기 화성활동과 지구조적 의미. 지질학회지, 23, 338-359.
- 좌용주 (1996) 중부 옥천대에 분포하는 주라기 보은 화강섬록암의 암석화학과 마그마과정. 암석학회지, 5, 188-199.
- 좌용주, 박정미 (1996) 경상분지 고성지역의 화성암류에 대한 암석학적 연구. I. 조성분원소 지구화학과 K-Ar 방사성 연대. 자원환경지질학회지, 29, 561-573.
- Hong, Y.K. (1987) Geochemical characteristics of Precambrian, Jurassic and Cretaceous granites in Korea. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 20, 35-60.
- Jin, M.S. (1981) Petrology and geochemistry of the Cretaceous granitic rocks in Southern Korea. PhD thesis, Seoul National University, 144.
- Jin M.S. (1985) Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in Southern Korea. Pt. 1, Major elements geochemistry. Jour. Geol. Soc. Korea, 21, 297-316.
- 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-. DSc thesis, University of Tokyo, 197.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Jour. Petrol., 25, 956-983.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and iso-

topic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In Saunders, A.D. and Norry, M.J. (eds.) *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Pub., 42, 313-345.

Tsue, A., Mizuta, T., Kim, S.W. and Ohyoshi, A. (1986)

Korean granitic rocks: Trace element evidence regarding their differentiation: 1. Ba, Sr and Rb relationships. *Mining Geol.*, 36, 339-350.

---

1998년 5월 21일 원고접수, 8월 22일 게재승인.