

양산단층 남부일원에 분포하는 화강암질암의 지화학적 연구

Geochemistry of Granitic Rocks Around the Southern Part of the Yangsan Fault

황 병 훈 (Byoung-Hoon Hwang) · 양 경 희 (Kyounghee Yang)*

부산대학교 지구환경시스템학부 지질환경과학전공
(Geological Environmental Science Major, Division of Earth Environmental System, Pusan National University,
Jangjeon-dong, Gemjeong-gu, Busan 609-735, Korea)

요약: 양산단층 남부지역에 분포하는 화강암류들은 야외산상 및 암석기재적 특징에 의해 다섯 암상으로 분류되며, 이 다섯 암상은 다시 성인과 관련하여 두 그룹(그룹 I과 그룹 II)으로 분류된다. 그룹 I의 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암은 마그마혼합의 영향을 받은 특징을 잘 나타낸다. 반면에 이들을 관입한 그룹 II의 등립질화강암과 미문상화강암에서는 마그마혼합의 증거들이 나타나지 않는다. 양산단층을 경계로 그룹별로 나타나는 매우 뚜렷한 미량 원소 및 동위원소 조성은 이 두 그룹의 마그마가 서로 다른 마그마로부터 진화된 것으로 해석된다. 그룹 I 내의 세 암상은 사장석의 분별과정을 포함하는 마그마 혼합의 정도차이에 의해 형성되었으며, MME는 흑운모의 분별과정을 겪었다. 그룹 II의 두 암상은 그룹 I과는 다른 모 마그마로부터 정상석의 분별과정을 통하여 형성되었다. 그룹별로 Rb-Sr 전암연령을 구하여 보면, 동측지괴와 서측지괴의 그룹 I이 각각 59.2 ± 2.9 Ma, 58.9 ± 6.2 Ma이고 그룹 II가 53.3 ± 2.2 (모두 2σ 오차) Ma, 51.7 Ma로 나타나, 양측지괴에서 그룹별로 서로 다른 균집된 연령을 보여주었다. Sm-Nd 동위원소 연구결과, 화강암류들의 근원물질은 그룹별로 달랐을 것으로 판단되며, 결핍맨틀에 의한 모델연령은 그룹 I이 약 0.8~0.9 Ga이며, 그룹 II는 이보다 0.1~0.2 Ga 정도 젊은 약 0.6~0.7 Ga에 해당된다.

주요어: 화강암류의 성인, 마그마 진화, Sr-Nd 동위원소, 근원물질

ABSTRACT: The granitic rocks distributed in the southern part of the Yangsan Fault are classified into five distinct rock facies based on the field relation, petrography and geochemical characteristics. These five different rock facies can be grouped into two considering their origins. Group I, which reveals various evidences of magma mixing, includes three rock facies of granodiorite, enclave-rich porphyritic granite, and enclave-poor porphyritic granite. Group II intruding Group I includes equigranular granite and micrographic granite with no evidence of magma mixing. It is suggested that the distinctively different trace element and isotopic chemistries between group I and II, support evolution from the different parental magma. It is suggested that the three rock facies in group I were generated by different degrees of magma mixing in addition to fractionation of plagioclase. MMEs experienced fractionation of biotite. The two facies in group II seem to have been generated from different parent magma from group I and evolved by fractionation of K-feldspar. The Rb-Sr

*교신저자: yangkyhe@pusan.ac.kr

whole-rock ages of the group I rocks yield 59.2~58.9 Ma, and those of the group II rocks give 53.3~51.7 Ma, regardless of their distribution whether they occur in the eastern or western parts of the Yangsan Fault. Based on Sm-Nd isotope compositions, depleted mantle model ages (T_2DM) of the group I range 0.8~0.9 Ga, while those of the group II 0.6~0.7 Ga.

Key words : origin of granitoids, magmatic evolution, Sr-Nd isotope, source material

서 언

경상분지 남동부에 분포하는 백악기말~제3기 초 화강암류들은 다양한 형태를 가지는 여러 개의 암주상으로 노출되어 있으며, 각 암체들은 다시 다양한 조석을 가지는 암상들로 구성되어 있다. 이들의 분포는 경상분지에 발달하는 북북동-남남서 방향의 구조선에 의해 규제된 것으로 보이며, 특히 여러 조의 단층들과 밀접히 연관된 것으로 알려져 있다(대한지질학회, 1999).

양산단층의 경주 남쪽 지역에 분포하는 화강암류들은 야외산출상태 및 암석기재적 특징에 따라 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 포유암 함량이 적은 반상화강암, 등립질화강암, 그리고 미문상화강암의 다섯 암상으로 분류된다. 이들 다섯암상의 분포는 이 화강암류의 관입이후에 단층작용을 받았다는 명확한 야외 증거로 제시되었으며, 단층 양쪽에 분포하는 동일 암상들은 야외산상 및 암석기재적 특징뿐만 아니라, 주성분원소의 함량변화까지 유사한 양상을 보여 주어 이들이 서로 동일한 암체임을 시사해주었다(황병훈 외, 2004).

본 논문은 양산단층 양쪽에 분포하는 화강암류의 각 암상에 대한 미량원소 지화학적 연구를 통하여 그룹별, 암상별 화강암류의 성인 및 마그마 진화과정을 살펴보고, 또한 Rb-Sr 및 Sm-Nd 동위원소 연구를 통하여 양산단층에 의해 분리되어 있는 동일암상의 암석이 원래 하나의 동일암체였는지를 살펴보고, 나아가 각 그룹별 절대연령과 근원물질을 이해하는 데 그 목적이 있다.

지질개요

연구지역은 양산단층의 경주 남쪽 지역으로, 부산, 양산, 언양 등이 포함되는 양산단층과 인접하여 분포하고 있는 수개의 암주상 화강암체로 구성되어 있다(그림 1a). 연구지역의 지질은 하부

로부터 백악기 하양층군의 퇴적암류, 이들을 관입 또는 분출한 것으로 알려진 유천층군의 화산암류, 그리고 이들을 모두 관입한 화강암류로 구성되어 있다. 각 암석에 대한 각론은 황병훈 외(2004)에 기술되어 있으며, 화강암류의 암상분류를 전반적으로 살펴보면 다음과 같다.

연구지역의 화강암류는 야외산출상태 및 암석기재적 특징에 따라 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 포유암 함량이 적은 반상화강암, 등립질화강암, 그리고 미문상화강암의 다섯 암상으로 분류가 된다(그림 1b). 또한 이들은 성인과 관련하여 크게 두 그룹으로 묶을 수가 있다. 첫 번째 그룹(그룹 I)은 마그마 혼합의 영향을 받은 암체로서(진미정 외, 2000; 황병훈, 2004), 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암의 세 암상이 포함된다. 두 번째 그룹(그룹 II)은 마그마 혼합 영향이 관찰되지 않는 암체로서, 등립질화강암과 미문상화강암의 두 암상이 포함된다.

그룹 I에 해당되는 마그마 혼합의 영향을 받은 암상들은 수 cm~수 m에 이르는 다양한 크기와 모양의 염기성미립포유암(MME: mafic microgranular enclave)과 이 MME에서 떨어져 나온 것으로 추정되는 염기성광물집합체(mafic clot)를 함유하는 특징을 가진다(황병훈 외, 2004). 한편 그룹 II에 해당되는 등립질화강암과 미문상화강암은 MME와 염기성광물 집합체를 거의 함유하지 않으므로 마그마혼합의 영향을 받지 않은 암체로 판단되며, 이들이 그룹 I의 화강암류들을 경상분지 곳곳에서 관입한 것이 관찰된다(황병훈, 2004). 등립질화강암은 2~3 mm 내외의 석영과 정장석이 유사한 크기 및 양으로 함유되어 있으며, 약간의 사장석과 흑운모를 함유하며, 미문상화강암으로 점변하기도 한다. 미문상화강암은 석영과 장석의 내부 성장한 문상조석을 나타내는 것이 가장 큰 특징이며, 매우 세립질이며 미아톨리틱 정동은 많이 함유한다.

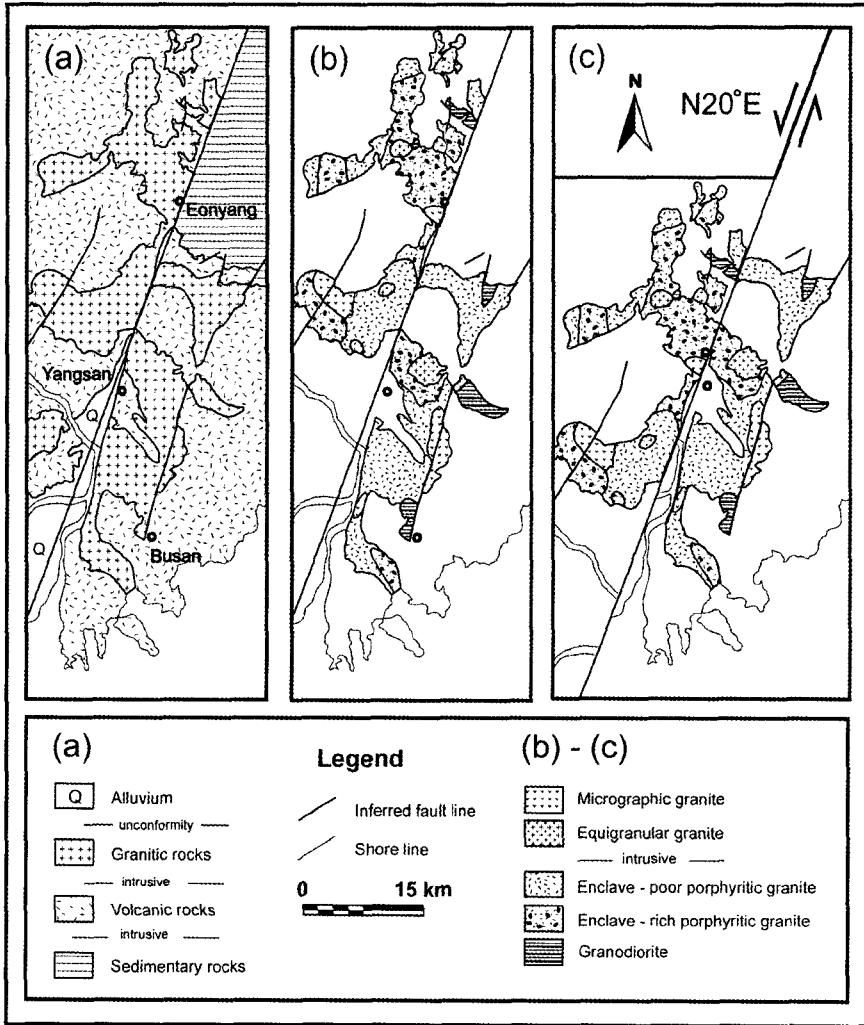


Fig. 1. (a) Simplified geological map of the study area (modified from KIGAM, 1995), (b) facies map of the granitic rocks, and (c) the reconstructed map after sinistral movement of the fault to the N20° E direction across the Eonyang.

미량원소

분석방법

화강암질 암체의 지화학적 특성을 알아보기 위하여, 각 지역별, 암상별로 대표적인 시료를 선택하였고, 이중 20개 시료에 대하여 한국기초과학지원연구원 동위원소 분석팀에서 ICP-MS법을 이용하여 미량 및 희토류원소를 정량분석을 하였으며, 분석결과를 표1에 나타내었다.

미량원소는 마그마 계에서의 거동에 따라 이온 반경이 큰 친석원소(LILE: large ion lithophile element), 고장력원소(HFSE: high field strength element), 철마그네슘 원소(ferromagnesian element), 그리고 희토류원소(REE: rare earth element)로 구분이 되며, 이들은 각각 마그마 진화 과정에서 중요한 정보를 제공한다(Ayuso and Arth, 1992). 본 연구에서는 철마그네슘 원소(ferromagnesian element)를 제외한 나머지 원소들의 함량변화를 양산단층 양쪽에 분포하는 화강암류

Table 1. Trace and rare earth element abundances of the granitic rocks

Location	Eastern block of the YF													
	GD				ERPG				EPPG		EG			
Rock facies	B75	B78	D20*	K15*	Y35A*Y37A*	Y1*	A71A	A73A*	B94	Y34A*	B133	AKJ4*	A75*	
Sample No.	B75	B78	D20*	K15*	Y35A*Y37A*	Y1*	A71A	A73A*	B94	Y34A*	B133	AKJ4*	A75*	
Ba	593	579	590	709	613	714	795	752	642	688	616	478	482	392
Rb	121	112	77	81	145	101	86	118	98	144	114	195	177	159
Sr	205	249	244	211	119	138	150	11	78	105	77	29	34	36
Nb	2.0	5.8	4.1	8.0	6.0	6.5	10.4	4.3	9.3	6.1	12.8	8.1	9.2	5.1
Hf	2.1	2.4	1.0	1.6	1.7	1.4	2.8	2.6	1.5	3.6	2.7	3.8	2.1	1.7
Zr	685	85	36	38	38	28	89	63	29	121	60	104	38	32
Y	19.9	17.4	18.2	16.9	15.9	14.3	20.7	7.8	16.8	30.8	32.2	30.2	42.0	30.6
Th	8.7	12.0	9.3	8.9	12.7	14.1	11.4	18.4	9.9	14.5	13.8	18.1	19.2	14.7
U	2.0	2.8	2.2	1.9	2.5	2.9	2.5	4.2	2.4	2.8	2.8	5.0	5.1	3.7
Cu	9.3	10.5	13.6	11.8	18.0	7.9	9.1	11.1	20.0	4.7	10.6	3.9	11.3	10.4
Pb	16.9	14.8	14.7	13.8	15.6	12.6	12.8	8.1	12.6	19.2	14.6	15.1	16.7	12.0
Zn	52.1	50.1	46.1	60.4	28.4	26.8	47.2	30.9	25.8	41.8	32.2	21.9	32.7	21.5
La	9.8	36.8	25.6	18.2	25.1	16.1	18.6	8.4	12.0	21.8	18.7	22.5	39.1	12.6
Ce	23.1	65.1	47.9	34.6	51.1	30.3	36.4	15.8	23.3	43.3	40.2	45.8	79.3	30.8
Pr	3.3	6.4	5.4	4.1	5.7	3.4	4.2	1.8	2.9	5.3	4.4	5.6	9.8	4.4
Nd	14.5	21.3	20.0	14.8	21.8	13.2	16.0	6.9	11.1	21.1	16.9	21.4	36.7	20.6
Sm	3.4	3.5	3.7	3.3	3.9	2.6	3.5	1.6	2.9	4.8	4.2	4.7	7.8	5.1
Eu	0.8	0.6	1.0	0.9	1.0	0.8	1.0	0.7	1.0	0.9	0.9	0.3	0.5	0.5
Gd	3.7	3.3	3.8	3.0	3.5	2.8	4.1	1.7	2.9	5.0	4.9	4.8	7.6	5.5
Tb	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.6	0.2	0.6	0.8	0.9	0.8	1.3	1.0
Dy	3.5	3.0	3.3	3.1	3.2	2.5	3.8	1.4	3.6	5.1	5.9	5.2	7.9	6.5
Ho	0.7	0.6	0.7	0.6	1.0	0.6	0.8	0.3	0.7	1.1	1.2	1.1	1.6	1.3
Er	2.2	1.9	2.2	2.0	1.8	1.6	2.4	0.9	2.1	3.3	3.7	3.5	4.9	4.1
Tm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.1	0.3	0.5	0.6	0.5	0.7	0.6
Yb	2.3	2.0	2.0	1.7	2.0	1.7	2.4	1.0	2.3	3.6	3.9	4.0	4.8	4.2
Lu	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.7	0.6
ΣREE	68	146	117	87	121	77	95	41	66	117	107	121	203	98
Eu/Eu*	0.7	0.6	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	1.3	1.1	0.6	0.6	0.2	0.2	0.3
(La/Tb) _N	3.1	13.3	9.2	7.7	9.0	6.8	5.6	6.0	3.7	4.4	3.4	4.0	5.8	2.2

Abbreviations are GD: granodiorite, ERPG: enclave-rich porphyritic granite, EPPG: enclave-poor porphyritic granite, EG: equigranular granite, MG: micrographic granite, MME: mafic microgranular enclave, YF: Yangsan Fault. *: Data from Jeon *et al.* (2000).

의 각 암상별로 관찰하였고, 그 결과는 다음과 같다.

이온반경이 큰 친석원소(LILE: Ba, Rb, Sr, Pb)

LIL 원소는 불호정성(incompatible) 원소이고, 또한 이동성(mobile) 원소이므로, 마그마의 분화시

용융체에 농집되는 경향을 보이며, 마그마의 결정분화 후기에 정출되는 광물 내에 많이 농집된다(Mason and Moore, 1982; McBirney, 1993; Rollinson, 1993). 양산단층을 기준으로 양쪽에 떨어져서 분포하고 있는 동일한 암상에 대한 각 원소들은 유사한 원소함량과 함량변화 패턴을 보인다(그림 2).

Table 1. (Continued)

Location	Eastern block of the YF								Western block of the YF					
	MG			MME					GD		ERPG			EPPG
Sample No.	B15	Y36*	A77*	A71B	A71C*	AKJ8*	Y35B*	Y37B*	B228A	L72	B193	L57A	CH78	B197
Ba	562	438	407	162	183	307	271	363	862	620	702	604	725	686
Rb	97	154	137	93	80	104	113	72.4	114	-	145	-	127	163
Sr	31	17	12	257	256	341	238	334	89	380	232	97	138	111
Nb	9.5	6.8	5.2	1.7	9.4	15.7	14.1	10.7	3.0	6.0	3.8	15.0	12.5	7.2
Hf	4.2	3.8	3.7	3.6	1.2	1.5	2.1	1.0	2.6	-	3.4	-	2.5	4.2
Zr	120	85	78	146	24	38	54	26	110	31	118	16	159	130
Y	43.7	36.4	36.1	51.5	35.1	53.2	46.4	55.0	12.7	17.0	5.9	21.0	25.0	30.7
Th	14.9	17.3	15.7	9.7	5.5	8.0	10.5	4.5	5.2	-	14.4	-	13.1	20.1
U	3.1	3.1	3.4	3.8	1.5	1.8	1.3	1.2	1.4	-	3.0	-	1.8	1.4
Cu	6.0	14.3	7.9	4.0	12.8	17.1	8.4	15.1	1.1	32.0	3.3	14.0	5.7	2.1
Pb	13.1	16.7	26.9	6.2	9.8	32.4	6.9	10.1	11.2	-	9.8	-	8.1	16.3
Zn	41.3	38.7	114.0	99.0	112.0	262.0	70.9	102.0	20.4	91.0	20.8	28.0	25.1	28.1
La	39.6	42.6	32.2	19.0	14.9	16.5	16.2	13.8	10.5	30.0	5.2	22.0	51.8	27.8
Ce	65.7	88.6	37.5	45.4	38.3	36.8	41.1	39.1	21.9	47.0	8.6	35.0	102.0	57.4
Pr	9.7	11.1	8.9	6.3	5.8	5.3	6.7	6.0	2.4	-	1.0	-	12.5	6.4
Nd	36.1	40.4	33.6	27.7	25.2	24.2	30.4	31.5	9.2	19.0	3.9	15.0	44.8	22.9
Sm	7.4	8.3	6.9	6.9	6.3	6.7	7.9	9.0	-	3.4	0.9	3.3	7.4	4.7
Eu	0.5	0.5	0.4	1.0	1.2	1.9	1.4	1.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.8	0.7
Gd	7.5	6.5	6.2	7.7	6.8	8.0	9.5	9.5	1.9	-	1.0	-	6.3	4.6
Tb	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1	1.4	1.5	1.6	0.3	-	0.1	-	0.9	0.8
Dy	7.5	6.7	6.9	8.2	7.1	9.1	10.0	10.8	2.1	2.1	0.9	2.6	5.0	4.8
Ho	1.6	1.3	1.4	1.8	1.5	1.9	2.1	2.2	0.5	-	0.2	-	0.9	1.1
Er	4.8	4.0	4.4	5.7	4.5	5.8	6.5	6.6	1.4	-	0.7	-	3.0	3.4
Tm	0.7	0.7	0.7	0.9	0.7	0.8	1.0	1.0	0.2	-	0.1	-	-	0.5
Yb	5.0	4.6	4.4	6.3	4.7	5.6	6.8	6.7	1.6	1.4	0.9	2.1	2.7	3.9
Lu	0.7	0.7	0.7	1.0	0.7	0.8	1.0	1.0	0.3	-	0.2	-	0.4	0.6
ΣREE	188	217	165	139	119	125	142	141	53	-	24	-	-	140
Eu/Eu*	0.2	0.2	0.2	0.6	0.6	0.8	0.5	0.6	-	-	1.5	-	0.4	0.5
(La/Tb) _N	5.7	6.6	5.2	2.0	2.3	2.1	1.7	1.5	4.6	15.4	4.2	7.5	13.6	5.2

Ba은 대체로 증가하는 경향을 보이다가 SiO₂ 함량이 약 72~73 wt.% 이상에서는 급격히 감소한다. SiO₂의 증가에 따라 MME, 화강섬록암, 그리고 반상화강암까지는 대체로 증가하는 변화양상을 보여주다가 등립질화강암과 미문상화강암으로 가면서 급격히 감소한다. 이것은 등립질화강암과 미문상화강암을 형성한 마그마에서, K와 유사한 이온반경을 가지는 Ba이 상대적으로 조기 정출되어진 K-장석과 흑운모에 분별되어진 것으로 해석된다(Mason and Moore, 1982). SiO₂의 증가에 따라 Rb의 함량은 미약하게 증가하고 있으며, Sr은 감소하는 경향을 보인다. Pb는 뚜렷한 경향성을 나타내지 않고 있다.

고장력 원소(HFSE: Hf, Nb, U, Th, Y)

고장력 원소는 일반적으로 조기 정출 광물에 잘 들어가지 못하고 잔류 용융체에 강하게 농집되어 저어콘, 모나자이트, 스피넬 등의 부성분광물(accessory mineral)에 많이 함유된다(McBirney, 1993). 연구지역 내 화강암류의 경우, SiO₂ 함량 증가에 따라 Th과 U은 대체로 증가하는 경향을 보이지만, Hf과 Nb은 뚜렷한 경향성을 보이지 않는다(그림 2). Y는 감소하다가 증가하는 경향을 보이는데, 이는 희토류원소와 유사한 화학적 성질을 나타내므로 기계적으로 희토류원소에 포 함시키기도 한다(Mason and Moore, 1982).

Table 1. (Continued)

Location	Western block of the YF													
Rock type	EPPG		EG	MG				MME						
Sample No.	B228C	JY132	JY55	B183	L1	S27	CH50	B193A	B193B	B193C	L83	L47	CH103	W9
Ba	418	653	516	540	552	664	687	573	468	425	549	512	632	337
Rb	139	-	143	177	-	105	144	101	106	104	-	-	102	78
Sr	48	128	53	36	69	45	54	282	423	451	295	441	288	395
Nb	1.9	9.0	7.7	14.5	11.0	14.7	13.6	1.2	3.8	2.0	8.0	16.0	11.1	9.3
Hf	2.8	-	4.2	2.7	-	4.9	4.7	4.7	3.7	3.5	-	-	2.6	1.7
Zr	88	19	119	74	12	167	159	182	159	150	19	16	276	245
Y	22.0	24.0	36.2	19.7	16.0	50.9	54.1	20.3	29.6	37.0	36.0	39.0	40.5	34.0
Th	8.1	-	23.0	10.6	-	12.8	13.3	17.4	7.3	7.4	-	-	9.3	4.3
U	1.5	-	3.8	2.5	-	2.1	2.7	3.9	2.6	2.3	-	-	2.0	0.8
Cu	1.0	10.0	4.7	2.5	14.0	5.9	5.9	2.8	4.2	3.7	5.0	5.0	8.3	9.9
Pb	12.0	-	18.6	17.9	-	9.8	25.8	7.7	7.6	6.0	-	-	9.6	11.4
Zn	14.2	45.0	29.8	17.7	27.0	23.1	28.2	49.7	59.0	68.5	59.0	51.0	76.5	128
La	14.0	38.0	63.2	15.3	9.0	41.4	38.6	66.2	20.8	21.7	24.0	30.0	24.3	27.5
Ce	29.0	69.0	133.0	31.7	14.0	67.1	67.0	130.1	52.5	56.4	39.0	52.0	50.2	54.1
Pr	3.6	-	14.6	3.5	-	10.7	9.7	12.9	6.9	7.6	-	-	7.6	7.6
Nd	13.9	25.0	50.3	12.1	5.0	41.3	38.1	40.6	27.0	31.1	21.0	26.0	33.2	32.1
Sm	-	4.7	9.4	2.5	1.4	8.4	7.4	5.6	5.7	6.7	5.1	5.7	7.3	6.9
Eu	0.5	0.7	0.5	0.5	0.4	0.7	0.7	1.0	1.6	1.6	0.9	1.1	1.6	1.9
Gd	3.2	-	7.7	2.6	-	8.8	8.5	4.4	5.2	6.5	-	-	7.4	7.0
Tb	0.6	-	1.1	0.4	-	1.4	1.4	0.6	0.8	1.0	-	-	2.0	1.1
Dy	3.7	2.8	6.2	2.9	1.6	9.0	9.2	3.4	4.8	6.2	4.5	4.6	7.2	6.6
Ho	0.8	-	1.3	0.7	-	1.9	1.9	0.8	1.1	1.4	-	-	1.5	1.4
Er	2.6	-	4.0	2.2	-	5.9	6.3	2.4	3.3	4.2	-	-	4.5	3.9
Tm	0.4	-	0.6	0.4	-	-	-	0.4	0.5	0.6	-	-	-	-
Yb	2.9	2.2	4.4	2.7	1.5	6.0	6.0	2.6	3.6	4.4	3.1	3.3	4.2	3.5
Lu	0.4	-	0.7	0.4	-	1.9	1.0	0.4	0.6	0.7	-	-	0.6	0.5
ΣREE	76	-	298	77	-	-	-	271	134	150	-	-	151	154
Eu/Eu*	-	-	0.2	0.5	-	0.2	0.3	0.6	0.9	0.8	-	-	0.7	0.8
(La/Tb) _N	3.1	12.4	10.3	4.1	4.3	5.0	4.6	18.5	4.2	3.6	5.6	6.5	4.2	5.6

대부분의 원소들은 양산단층을 경계로 양쪽에 분포하는 동일 암상에서 거의 유사한 함량을 나타내며, 각 지괴에서 암상에 따른 변화경향도 거의 일치한다.

희토류원소(REE)

연구지역 화강암류들의 희토류원소를 콘트라이트(Sun, 1982)에 표준화시켜 암상에 따른 변화 패턴을 관찰한 결과, 각 암상들은 기울기의 변화 및 Eu 이상의 크기와 같은 특징적인 패턴을 잘 보여주며, 특히 양산단층을 경계로 동일한 암상들 간의 지역적 차이는 나타나지 않는다(그림 3). MME 시료는 주로 포유암 함량이 많은 반상화강

암에서 채취하였고, 마그마 혼합의 중요한 증거이므로, 분류된 다섯 암상의 화강암류와 함께 비교 검토하였다.

Eu/Eu*의 비는 장석의 분별작용을 지시하는 척도로 사용되며, Eu 부의 이상이 클수록 Eu/Eu*의 비는 낮은 값을 나타낸다(Rollinson, 1993). 그룹 I에 해당되는 화강섬록암(0.5~0.9)과 MME(0.6~0.9)는 Eu 부의 이상이 없거나 약간 나타나는 가장 미분화된 패턴을 보여준다(그림 3a, b). 포유암 함량이 많은 반상화강암(그림 3c)은 0.4~1.5로서 가장 넓은 범위를 보이며 Eu 부의 이상과 정의 이상이 함께 나타나는 특징적인 양상을 띈다. 포유암 함량이 적은 반상화강암(그림 3d)은 0.5~0.6의 값을 보인다. 그룹 II에 해당되는 등립

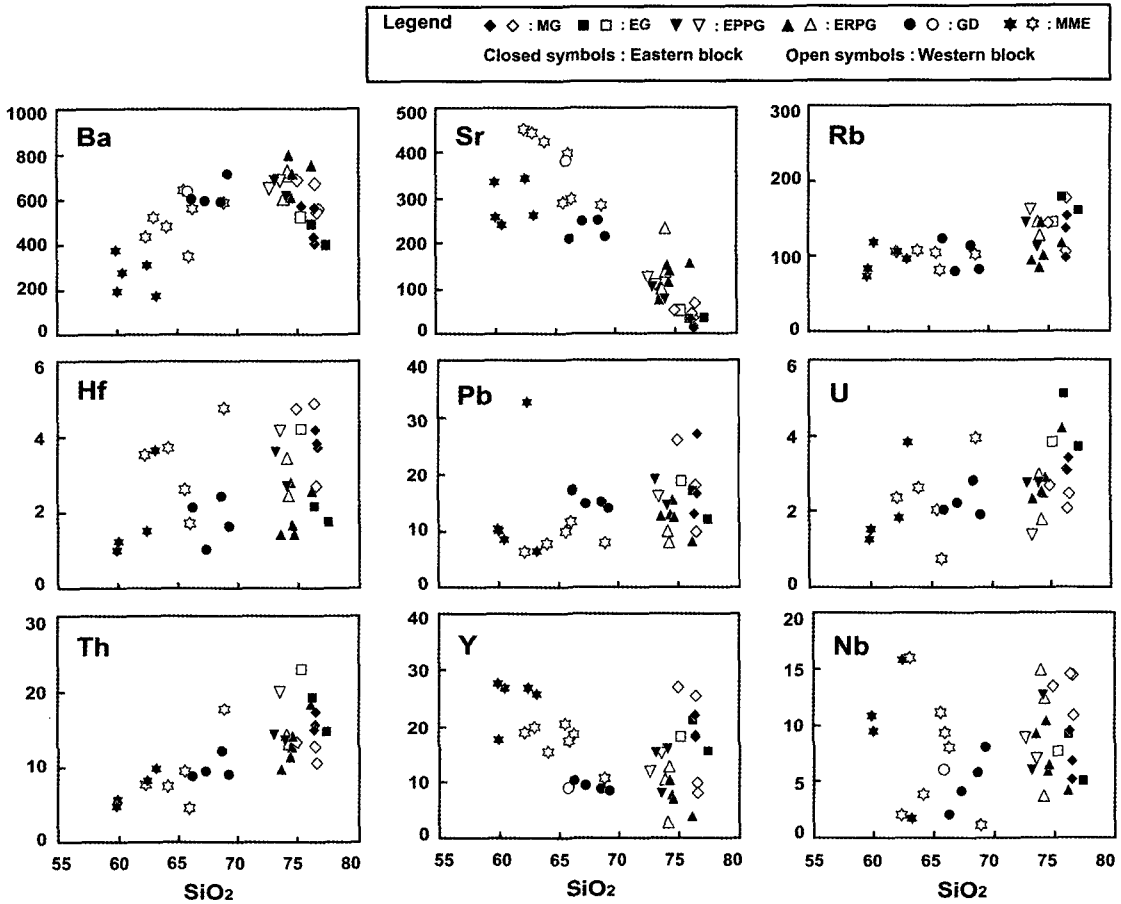


Fig. 2. Harker variation diagrams for trace elements of the granitic rocks. Solid symbols are the samples from eastern block and open symbols are the samples from western block. Abbreviations are the same as those in Table 1.

질화강암(0.2~0.3)과 미문상화강암(0.2~0.5)은 Eu 부의 이상정도가 서로 유사하고, 타 암체에 비해 가장 큰 Eu 부의 이상을 나타내고 있다.

(La/Yb)_N의 비는 REE 패턴의 기울기를 나타내는 값으로 기울기가 클수록 높은 값을 의미하며, 마그마의 진화과정을 연구하는데 사용되는 척도이다(Rollinson, 1993). 연구지역 화강암류들의 (La/Yb)_N의 비는 1.5~18.5를 가지는 MME를 제외하면, 대체로 SiO₂ 함량(황병훈 외, 2004)이 증가하는 순서인 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 포유암 함량이 적은 반상화강암, 등립질화강암, 미문상화강암의 순으로 3.1~15.4, 3.7~13.6, 3.1~12.4, 2.2~10.3, 4.1~6.6의 값을 가지며 다소 중첩되지만 대체로 감소하는 경향을

나타낸다.

∑REE의 함량을 연구지역 화강암류의 전체 암상별로 살펴보면(표 1), 그룹 II에 해당되는 등립질화강암과 미문상화강암이 각각 98~298 ppm, 77~217 ppm의 함량을 가진다. MME는 119~271 ppm, 그리고 그룹 I에 속하는 포유암 함량이 적은 반상화강암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 화강섬록암이 각각 76~140 ppm, 24~140 ppm, 53~146 ppm의 범위를 가진다. ∑REE의 함량이 암상별로 중첩되는 경향이 있지만, 대체로 그룹 II가 그룹 I보다 다소 높은 값을 나타낸다.

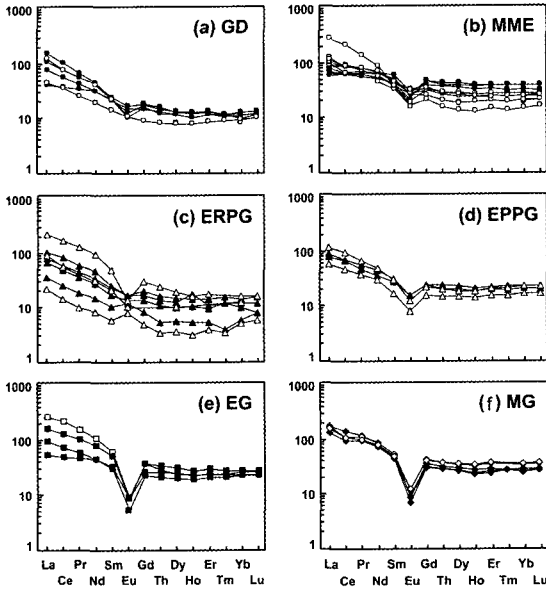


Fig. 3. Chondrite-normalized REE patterns of the granitic rocks in the study area. Solid symbols are the samples from eastern block and open symbols are the samples from western block. Abbreviations are the same as those in Table 1.

동위원소

분석방법

연구지역 화강암류들의 각 암상별 정치시기와 근원물질의 조성을 알아보기 위하여, 양산단층의 양측지괴에서 각 암상을 대표하는 신선한 시료를 채취하여, 한국기초과학지원연구원 연대측정팀에서 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비와 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 비를 구하였다. $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 비와 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 비는 ICP-MS로 측정된 Rb, Sr, Sm, Nd 정량을 이용하여 Faure (1986)의 계산식을 이용하여 구하였다. 비록 Rb, Sr, Sm, Nd 정량을 ICP-MS로 실시하여 정밀한 값을 얻기는 어렵겠지만, 구해진 연령 값이 주변의 경주지역에서의 각 암상별 연령(Koh, 2001; 황병훈, 2004)과 잘 일치하므로, 본문에 적용해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

측정기간중 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 로 표준화한 Sr 동위원소비 표준시료 NBS987의 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.712023 \pm 0.000024(2\sigma)$ 였고, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 로 표준화한 La Jolla의 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511845 \pm 0.000012(2\sigma)$ 였다. 실험과정 중의 바탕값은 Sr이 130 ng

이하, Nd이 0.3 ng 이하였다. ^{87}Rb 의 붕괴상수는 $1.42 \times 10^{-11}/\text{y}$ (Steiger and Jager, 1977), ^{147}Sm 의 붕괴상수는 $6.54 \pm 10^{-12}/\text{y}$ (Lugmair and Marti, 1978)를 사용하여 전암 등시선 연대를 계산하였고, $\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$ 과 $\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$ 계산을 위한 콘드라이트 유니폼 리저버(CHUR)의 현재값은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7045$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.0827$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1967$ 을 사용하였고, 결핍맨틀(T_2 DM)의 모델 연령을 구하기 위한 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 의 현재값은 0.513114, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.222$ (Michard *et al.*, 1985)를 사용하였다. 분석처는 암상별로 동위원소비를 계산하여 표 2에 나타내었다.

전암연대: Rb-Sr 동위원소

지금까지 보고된 연구지역 내 화강암류의 Rb-Sr 전암 연령은 양산단층의 서측이 67~68 Ma (Na, 1994; 김근수 외, 1997), 동측이 69~71 Ma (Lee, 1991)로 오차범위 내에서 유사한 연령을 보인다. 그러나 이들 각각의 암체 내에는 다양한 암상이 존재하며, 이들 암상이 모두 동일한 마그마에서 형성된 일련의 분화산물이라고 보기는 어렵다. 왜냐하면 MME와 염기성광물 집합체를 가지는 마그마혼합의 영향을 받은 그룹 I의 암상들을 마그마혼합의 증거가 없는 그룹 II의 암상들이 관입한 증거가 경상분지 곳곳에서 관찰되므로 (황병훈, 2004), 이들을 성인과 관련된 두 그룹으로 나누어서 지괴별로 Rb-Sr 전암 연령을 구하였다(그림 4).

결과는 양산단층 동측부에서 혼합의 영향을 받은 암상들(east group I)과 받지 않은 암상들(east group II), 서측부에서 혼합의 영향을 받은 암상들(west group I)과 받지 않은 암상들(west group II)의 순서로 각각 59.2 ± 2.9 Ma, 53.3 ± 2.2 Ma, 58.9 ± 6.2 (모두 2σ 오차) Ma, 51.7 Ma (2점에 의한 등시선 연령으로 오차의 한계는 표시할 수 없지만, 이 연대는 east group II의 연령과 거의 일치함)로 나타났다. 대체로 양측지괴의 그룹 I은 약 59 Ma에 수렴되고, 그룹 II는 이보다 6~8 Ma 정도 젊은 연령인 51~53 Ma에 수렴되었다. 양산단층을 기준으로 21.3 km 이상의 변위를 보이는 서로 떨어진 양측지괴에서 그룹별로 군집된 연령을 보이는 동일한 양상은 매우 놀라운 일치라 할 수 있으며, 구해진 그룹별 연령의 신뢰를 높일 수 있으리라 기대된다. 뿐만 아니라 그룹 I

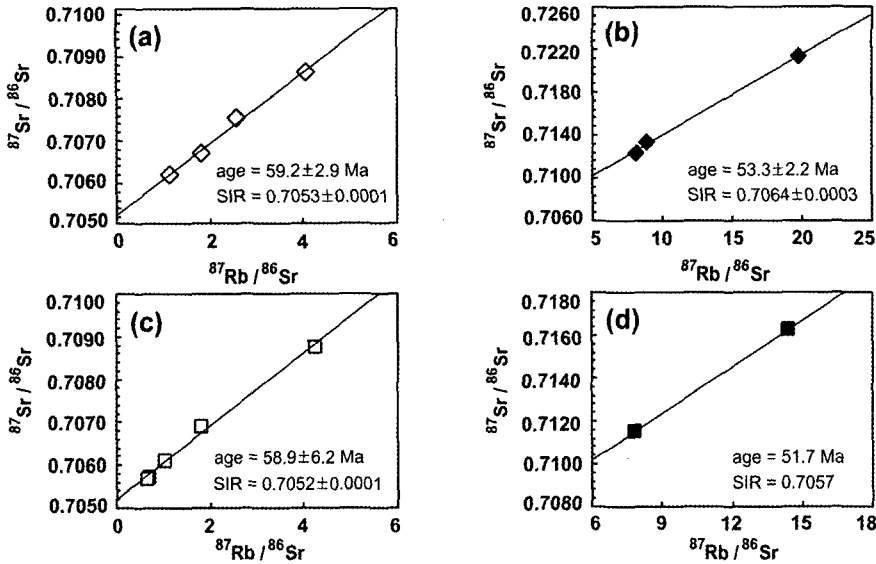


Fig. 4. Rb-Sr isotope diagrams of the granitic rocks in the study area. (a) eastern group I, (b) eastern group II, (c) western group I and (d) western group II.

화강암류들의 연령은 화강암의 고화연령 보다는 마그마 혼합에 의해 Rb-Sr 계 내에서 동위원소적 재평형 시기를 지시할 것으로 판단된다(Barker, 1989; Holden *et al.*, 1987).

근원물질 조성: Sr-Nd 동위원소

구해진 Rb-Sr 전암 연령으로 Nd의 초생비를 계산하여, 근원물질의 조성을 알아보았다(그림 5). 그림 5a는 분석된 시료의 현재 값(T=0)들의 비교로서, 양산단층 양측 지괴에서 그룹별로 뚜렷한 분대가 잘 이루어짐을 나타내고 있다. 분석된 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 비가 암상별로 좋은 군집을 나타내고 있음을 알 수 있다(표 2). 즉 그룹 I에 해당되는 암상들은 MME, 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암의 순으로 각각 0.7057~0.7061, 0.7066, 0.7069~0.7075, 그리고 0.7085~0.7088로 증가하는 경향을 보인다. 또한 그룹 II의 등립질화강암과 미문상화강암은 각각 0.7115~0.7213과 0.7123~0.7163로 그룹 I 보다 더 높은 값을 나타낸다(표 2).

그림 5b는 마그마 형성시 근원물질의 동위원소 조성비를 나타내는데, 그룹 I과 그룹 II 사이에 뚜렷이 분대가 됨을 잘 보여주므로 화강암류

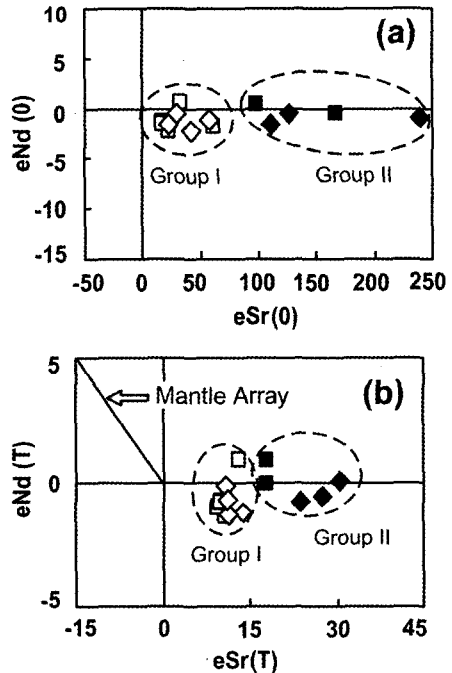


Fig. 5. Diagrams for sources of the granitic magma. (a) $\epsilon\text{Sr}(0)$ vs. $\epsilon\text{Nd}(0)$, (b) $\epsilon\text{Sr}(T)$ vs. $\epsilon\text{Nd}(T)$. Symbols: open square; western group I, open diamond; eastern group I, closed square; western group II, closed diamond; eastern group II.

Table 2. Isotopic compositions of the granitic rocks

Sample No.	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	age	SIR	$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$	$\epsilon_{\text{Sr}}(T)$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	NIR	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(T)$	T ₂ DM
GII	B15	97.1	31.2	9.0078	53.5	0.7066	126.32	30.03	0.51261	7.39	36.09	0.12382	0.51257	-0.47	0.87	777
	B79	150.7	53.8	8.1066	53.5	0.7061	110.13	23.57	0.51255	1.77	14.64	0.07303	0.51253	-1.68	-0.33	576
	B183*	177.4	35.7	14.3867	53.5	0.7053	166.93	12.61	0.51261	2.45	12.06	0.12265	0.51257	-0.59	0.76	777
EG	JY55*	143.4	52.7	7.8743	53.5	0.7055	99.03	14.97	0.51266	9.43	50.34	0.11325	0.51262	0.37	1.71	641
	B133	194.8	28.6	19.7294	53.5	0.7063	238.69	26.74	0.51258	4.67	21.40	0.13207	0.51254	-1.07	0.27	900
EPPG	B94	144.2	105.5	3.9542	59.3	0.7052	57.25	10.94	0.51258	4.77	21.09	0.13670	0.51252	-1.21	0.28	961
	B197*	163.5	111.0	4.2614	59.3	0.7052	60.45	10.47	0.51254	4.68	22.89	0.12362	0.51249	-1.91	-0.42	889
ERPG	A71A	133.5	156.1	2.4739	59.3	0.7054	42.26	13.65	0.51253	6.92	58.17	0.07195	0.51250	-2.18	-0.70	598
	B193*	145.3	232.3	1.8092	59.3	0.7054	33.78	13.13	0.51266	0.91	3.86	0.14336	0.51261	0.47	1.96	876
G I	B75	121.6	205.7	1.7099	59.3	0.7052	30.12	10.65	0.51261	3.44	14.45	0.14397	0.51255	-0.60	0.88	990
MME	B193A*	100.9	281.9	1.0352	59.3	0.7052	22.53	11.12	0.51252	5.62	40.62	0.08373	0.51249	-2.22	-0.74	651
	B193B*	105.5	422.5	0.7222	59.3	0.7051	17.32	9.66	0.51257	5.70	26.96	0.12784	0.51252	-1.33	0.16	881
	B193C*	103.8	450.6	0.6662	59.3	0.7051	16.37	9.38	0.51256	6.74	31.05	0.13124	0.51251	-1.52	-0.03	931
	A71B	93.2	257.7	1.0460	59.3	0.7052	22.82	11.29	0.51255	6.92	27.67	0.15120	0.51249	-1.66	-0.17	1207

Abbreviations are the same as those in Table 1. GI: Group I, GII: Group II. * : samples from western block.

들의 근원물질이 그룹별로 달랐을 가능성을 시사한다. 동위원소 초생치를 비교해보면, 양산단층 서측부에서 혼합의 영향을 받은 암상들(west group I)과 받지 않은 암상들(west group II), 동측부에서 혼합의 영향을 받은 암상들(east group I)과 받지 않은 암상들(east group II)의 순서로, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생비가 0.7052 ± 0.0001 , 0.7057 , 0.7052 ± 0.0001 , 0.7064 ± 0.0003 이며, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 초생비가 0.51252 , 0.51259 , 0.51252 , 0.51254 이다. 대체로 그룹 I의 암상들은 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 초생비가 $0.7052 \sim 0.7053$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 초생비가 0.51252 로 그룹 II의 $0.7057 \sim 0.7064$, $0.51254 \sim 0.51259$ 보다 낮은 값을 가진다.

연구지역 화강암류를 그룹별로 결핍맨들의 모델연령($T_2\text{DM}$)을 계산하면(표 2), 그룹 I의 아홉 시료가 598~1207 (평균 887) Ma의 값을 나타내고, 그룹 II의 다섯 시료가 576~900 (평균 734) Ma의 값을 나타내었다. 두 그룹의 값은 범위의 폭이 넓어 서로 서로 중첩되지만, 평균값을 비교해보면 887 Ma의 그룹 I이 734 Ma를 가지는 그룹 II 보다 약 150 Ma 정도의 오래된 연령을 보인다. 특히 마그마 혼합의 영향을 받은 세 시료, 즉 양산지역의 포유암 함량이 많은 반상화강암(A71A)과 그 속에 포획되어 있는 MME(A71B), 그리고 언양지역의 포유암 함량이 많은 반상화강암 내에 포획된 MME(B193A)를 제외하면, 그룹 I은 약 876~961 (평균 921) Ma를 나타내고, 그룹 II는 언양지역의 미문상화강암(B183)의 한 시료를 제외하면, 이보다 낮은 576~777 (평균 693) Ma로 약 200 Ma에 가까운 젊은 연령을 나타낸다. 이 모델연령은 화강암질 마그마의 근원물질이 맨틀에서 분리된 후 지각에 머문 시간으로 간주되며, 오래된 연령일수록 근원물질이 고기의 지각인 하부지각임을 암시하므로(Faure, 1986), 연구지역 화강암류들은 그룹별로 근원물질에서 차이가 있었음을 알 수 있으며, 특히 그룹 II의 근원물질이 그룹 I 보다 젊은 물질일 가능성을 내포하고 있다.

토 론

그룹별 화강암류의 성인

연구지역 화강암류는 야외산출 상태 및 암석기재적 특징에 따라 다섯 암상으로 나누어지며, 이

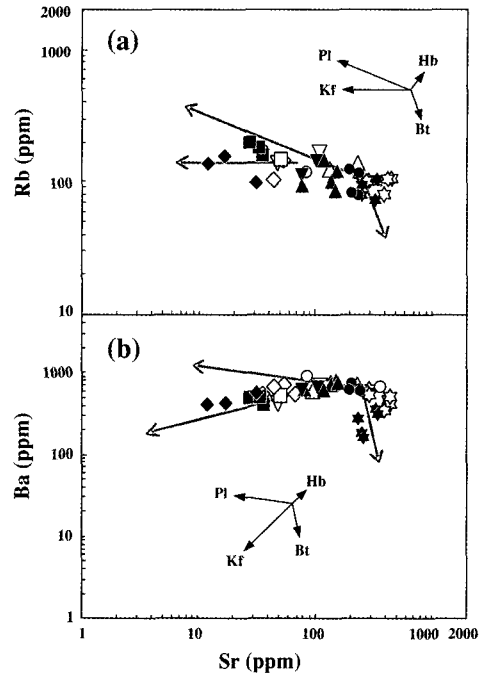


Fig. 6. Logarithmic plots of Rb and Ba vs. Sr concentration for the granitic rocks in study area. Arrows indicate the influence of fractionation of plagioclase (Pl), K-feldspar (Kf), hornblende (Hb) and biotite (Bt) on the composition of residual liquids (Rollinson, 1993). Symbols are the same as those in Fig. 2.

들은 다시 성인과 관련하여 두 가지 그룹으로 분류된다. 즉, 야외에서의 관입관계에 근거하여, 관입당한 암상들과 관입한 암상들로 구분되는데, 전자(그룹 I)는 MME와 염기성광물 집합체를 함유하는 마그마 혼합의 영향을 받은 암체들이고, 후자(그룹 II)는 마그마 혼합의 증거가 거의 나타나지 않는 암체들이다.

그림 6은 Rollinson (1993)의 벡터도를 인용한 그림으로, 레일리의 분별결정작용 식에 유문암질 용액에 대한 분배계수(Arth, 1976)를 적용하여 각 광물에 대한 계산된 값을 선으로 연결한 것이다. 그림 내의 작은 화살표는 분별작용 진행시 잔류 용액의 조성을 나타낸다. 그림 6(a)에서, 연구지역 전체 화강암류들은 크게 동일 공통마그마로부터 사장석의 분별경향을 따르는 것처럼 보인다. 하지만, 그룹 I의 화강암류에는 마그마혼합의 기재적 증거가 뚜렷이 나타나므로(진미정 외, 2000;

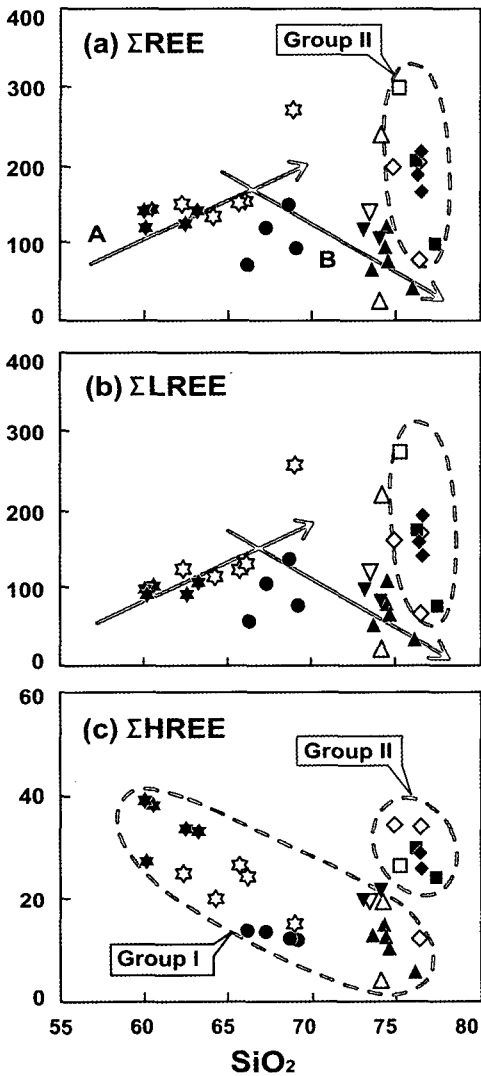


Fig. 7. REE-discrimination plots of (a) total REE content vs. SiO₂; (b) total LREE content vs. SiO₂; (c) total HREE content vs. SiO₂. Symbols are the same as those in Fig. 2.

김종선, 2001; 황병훈, 2004), 암상 전체에 대한 연속적인 분별결정작용은 배제되어야 할 것이다. 또한 이들이 마그마혼합의 산물로 형성된 것이라면, 전체적으로 하나의 직선형태를 나타내어야 하겠지만, 그림 6(a)에서 그룹 I은 사장석의 분별작용을, 그룹 II의 등립질화강암과 미분상화강암은 정장석의 분별경향을 따르는 것으로 보인다. 특히 그림 6(b)에서 그룹 II는 사장석과 정장석의 백터의 합성선을 따라 분포하고 있다. 또한

MME들은 흑운모의 분별 경향을 따르는 것으로 보이는데, 이것은 산성마그마와 염기성마그마가 혼합된 이후, 각각 다른 분화작용을 거쳤음을 시사해준다. 즉, 산성인 화강암질 마그마는 사장석의 분별작용을, 염기성 마그마인 MME들은 흑운모의 분별작용을 주로 겪었던 것으로 해석된다. 따라서 그룹 I을 관입한 그룹 II의 화강암류들은 그룹 I과는 다른 마그마로부터 형성된 것으로 생각해 볼 수 있다. 비록 전체적인 경향은 동일 공통마그마로부터의 분화과정으로 설명할 수 있겠지만, 그룹 I 화강암 내에서만 마그마혼합의 암석기재적 증거가 나타나는 이유를 설명하기가 곤란하다.

주어진 SiO₂ 함량에 대한 각 시료들의 ΣREE 함량을 도시해보면(그림 7a), 그룹 I 화강암류들은 대체로 증가하다가 감소하는 두 개의 기울기 변화양상을 보인다. Poli and Tomasini (1991)는 본 연구와 유사한 결과에 대하여, 첫 번째 기울기 변화선(A)은 MME의 분화양상을 나타내며, 두 번째 기울기 변화선(B)은 MME와 화강암과의 혼합양상으로 해석하였다. 또한 그룹 II 화강암류들은 주어진 SiO₂ 함량에서 세로로 분산된 양상을 띠는데 이것은 LREE와 같은 유동성(mobile) 원소의 거동과 관련된 것으로 사료된다. 그림 7(b)에서 보는 바와 같이, ΣREE 함량의 변화패턴과 ΣLREE 함량의 변화경향은 거의 동일하다. 반면, 그림 7(c)에서 보여주는 ΣHREE 함량은 그룹별로 뚜렷이 구분됨을 보여준다. HREE들은 비유동성(immobile) 원소이므로, 마그마의 진화과정에서 큰 변화를 보이지 않으며, ΣHREE 함량은 마그마의 초기 성분을 의미하는 것으로 볼 수 있을 것이다. 따라서 연구지역 화강암류에 적용시켜 보면, 그룹 I과 그룹 II가 뚜렷이 구분되므로(그림 7c), 이들은 서로 다른 마그마였음을 알 수 있다. 또한 그룹 I의 화강암류들은 ΣHREE의 가장 높은 함량을 가지는 MME로부터 가장 낮은 함량을 가지는 포유암 함량이 많은 반상화강암까지 체계적인 변화를 보이므로, 다양한 정도의 마그마 혼합과정을 겪은 것으로 판단된다.

장석의 분별을 지시하는 척도인 Eu/Eu* 비를 Sr, Ba, SiO₂, 그리고 ΣLREE 함량에 도시해보면(그림 8), 그룹 I의 화강암류들은 대부분의 그림에서 분산되어 나타나지만, 그룹 II의 화강암류들은 Eu/Eu*의 값이 0.2~0.4의 영역에 군집된 양상을 보인다. 특히 그림 8d에서 그룹 II 화강암류

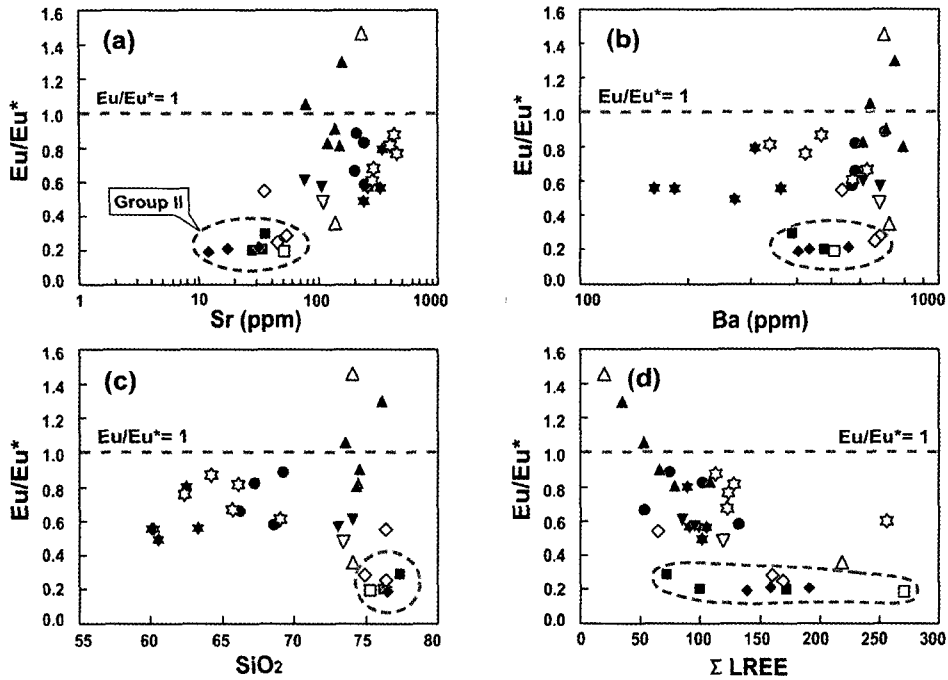


Fig. 8. Eu anomaly discrimination plots: (a) Eu/Eu^* vs. Sr; (b) Eu/Eu^* vs. Ba; (c) Eu/Eu^* vs. SiO_2 ; (d) Eu/Eu^* vs. $\Sigma LREE$. Symbols are the same as those in Fig. 2.

들은 $\Sigma LREE$ 의 넓은 함량변화에도 불구하고 일정한 값의 Eu/Eu^* 비를 보이므로, 그룹 I과 동일한 모 마그마로부터의 분화작용을 겪지는 않았던 것으로 판단된다.

그림 9에서 보여주는 REE 패턴의 기울기 변화에서, SiO_2 함량변화에 따른 La/Yb 비는 암상별로는 군집을 이루지만, 규칙적인 변화양상은 보이지는 않는다(그림 9a). 하지만 La에 대한 La/Yb 비는 뚜렷한 두 개의 기울기 변화를 나타낸다(그림 9b). 이 도표는 마그마 진화과정을 나타내는 척도로 인용되고 있으며(Tremblay *et al.*, 1994; Sajona *et al.*, 2000; Myers *et al.*, 2002), 동일한 기울기를 가지는 일련의 암석들은 동일한 마그마 진화과정을 겪은 것으로 해석되고 있다. 따라서 본 논문에서 보여주는 그룹 I의 화강암류들은 A의 기울기 변화를 따르고, 그룹 II는 B의 기울기 변화를 따르는 두 개의 기울기는 그룹별로 서로 다른 마그마 진화과정의 결과로 해석해야 할 것이다. 만약 이들이 분별결정작용 또는 마그마 혼합작용 등을 포함하는 단순한 일련의 마그마 과정의 산물이라면, 아마도 기울기 변화는 규칙적인 하나의 경향만을 나타내어야 할 것

이다. 따라서 그룹 I의 화강암류와 그룹 II의 화강암류들은 성인적으로 달랐음을 시사해 준다.

화강암류의 연령과 근원물질 추정

본 연구에서 화강암류들의 절대연령을 성인과 관련된 그룹별로 나누어서 실시한 결과, 그룹 I의 화강암류들이 58~59 Ma, 그룹 II의 화강암류들이 51~53 Ma로 나타났다. 더구나 이 그룹별 연령은 양산단층을 경계로 20 km 이상 떨어진 양측지괴에서 같은 양상을 나타내었으며, 구해진 그룹별 연령을 이용하여 근원물질의 동위원소 비를 추정하여 보면, 역시 그룹별로 뚜렷한 차이가 나타났다(그림 5). 결핍맨틀의 모델연령에서는 비록 몇 시료에서 중첩되기도 하지만, 그룹 I의 화강암류(0.8~0.9 Ga)가 그룹 II(0.6~0.7 Ga)보다 약 0.1~0.2 Ga 정도의 오래된 모델연령을 나타내므로(표 2), 이들은 서로 근원물질이 달랐을 가능성을 시사한다. 정창식 외(1998)의 경상분지 백악기~제3기 화강암류의 연구에서도 동위원소적 특징이 하부지각의 불균질성을 반영할 가능성이 높다고 보고하였으며, 경주지역에서는 울산단

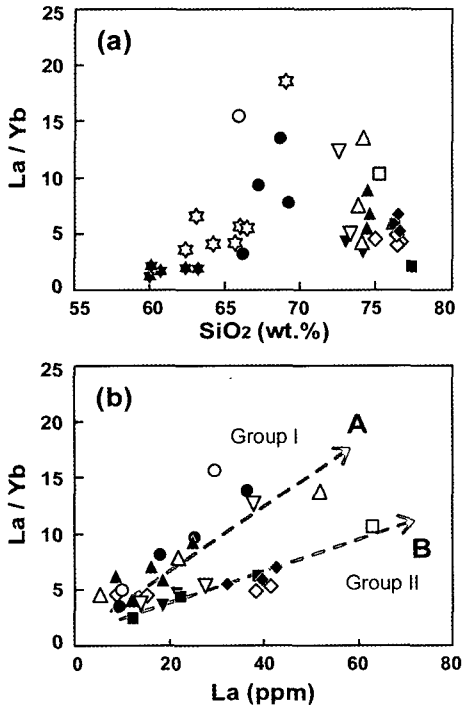


Fig. 9. Plots of (a) La/Yb vs. SiO₂ and (b) La/Yb vs. La for granitic rocks in study area. Symbols are the same as those in Fig. 2.

층 주변부에 널리 분포하는 등립질화강암이 화강섬록암을 관입하였는데(황병훈, 1995; 이종익 외, 1997), Koh (2001)는 흑운모-각섬석 화강섬록암(본 연구의 화강섬록암)과 흑운모화강암(본 연구의 등립질화강암)의 εNd치에 차이가 있으므로, 두 암체는 서로 다른 기원암으로부터 유래된 것으로 해석한 바 있다.

연구지역 화강암류가 그룹별로 근원물질이 달랐다고 하더라도, 각 그룹별 동위원소 초생비를 살펴보면, 그룹 I의 Sr 및 Nd 초생비가 각각 0.7052 ~ 0.7053, 0.512517~0.512524, 그룹 II의 Sr 및 Nd 초생비가 각각 0.7057~0.7064, 0.512545~0.512593 이므로 둘 다 맨틀기원임을 나타낸다. 따라서 두 그룹의 근원물질은 성분상 뚜렷한 차이를 가지는 것이 아니라 맨틀에서부터 분리되어 나온 시기가 달랐음을 암시하며, 이것은 마그마의 생성 깊이가 달랐음을 시사한다(Faure, 1986). 즉, 0.8~0.9 Ga의 모델연령을 보이는 그룹 I의 화강암류들은 생성깊이가 다소 깊은 곳에서 형성되었고, 0.6~0.7 Ga의 모델연령을 보이는 그룹 II는 이보다

상부에서 형성된 것으로 추정해 볼 수 있다. 따라서 연구지역 내 화강암류들은 그룹 I이 관입하여 마그마 혼합의 영향을 받은 이후 약 6~8 Ma의 시간적 차이를 두고 보다 상부에서 형성된 마그마가 먼저 정지한 그룹 I의 화강암류를 관입한 것으로 판단된다.

이상의 동위원소 자료를 종합해 보면, 초기 활동한 것으로 추정되는 그룹 I의 화강암류를 형성한 마그마는 약 58~59 Ma 경에 관입 정지한 후 완전히 고화가 일어나기 전에 염기성 마그마의 주입을 받았던 것으로 판단되며, 이 연령은 마그마의 혼합에 의한 재평형 연령을 지시할 가능성이 높다. 그 이후 약 53 Ma를 전후하여, 근원물질이 다른 두 번째 마그마활동에 의한 그룹 II의 화강암류들이 그룹 I의 화강암류를 관입한 것으로 추정된다.

한편, 연구지역 화강암류들의 그룹별 및 암상별 성인에 관계없이, 화강암류들의 암상분포를 파악하여 단층의 움직인 방향 및 시기를 추정해 볼 수 있다. 즉, 그림 1b에서 보는 바와 같이 양산단층을 경계로 서측과 동측에서의 암상 분포가 서로 동일한 배열을 보이므로, 추정 단층선을 따라 동측지괴를 N20°E 방향으로 약 21.3 km 좌수향 주향이동을 시켜 복원하면(그림 1c), 양측지괴의 암상 경계가 잘 들어맞음을 볼 수 있다. 따라서 이는 양산단층의 우수향 주향이동의 결정적인 증거로서 제시할 수 있을 것이다. 또한 양산단층의 움직인 시기의 하한선을 적어도 화강암질 마그마의 관입 및 결정화 이후로 보아야 할 것이므로, 연구지역 화강암류의 가장 젊은 연령인 약 51~53 Ma 이후로 보면 타당할 것으로 판단된다. 이 연령을 나타내는 암체들은 본 연구의 그룹 II에 해당되는 등립질화강암과 미분상화강암이므로 이들이 관입 고화된 이후에 양산단층이 움직였을 것으로 판단된다.

결론

연구지역 내 화강암류의 각 암상별 주성분원소(황병훈 외, 2004), 미량원소 그리고 동위원소의 조성상 특징을 표 3에 나타내었으며, 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 그룹 I의 화강섬록암, 포유암 함량이 많은 반상화강암, 그리고 포유암 함량이 적은 반상화강암은 마그마혼합의 영향을 받은 특징을 잘 나

Table 3. Chemical compositions and isotopic features of the granitic rocks

elements	Group I				Group II	
	MME	GD	ERPG	EPPG	EG	MG
Major (Hwang <i>et al.</i> , 2004)	SiO ₂ : 60~70 wt.%, GD higher than MME linear variation pattern major metaluminous SiO ₂ : 73~78 wt.% cluster feature, some increase trend from ERPG to MG major peraluminous, minor metaluminous					
Trace	dispersed, some horizontal linear trend		cluster, intermediate composition between MME+GD and EG+MG		cluster, some vertical linear trend	
REE	low LREE, high HREE	same as MME except low HREE	Eu (+) and (-) anomaly	small Eu (-) anomaly	high LREE, low HREE extinct Eu (-) anomaly	
Age (Ma)	58.9±6.2 Ma (west group I) ~ 59.2±2.9 Ma (east group I)					
Isotopic initial ratio	west group I : 0.70520 ± 0.00011					
	east group I : 0.70525 ± 0.00005					
Nd	west group I : 0.512524 ± 0.000048					
	east group I : 0.512516 ± 0.000026					
εvalue (Ave.)	west group I : εSr(0); 30.1 / εSr(T); 10.9 / εNd(0); -1.3 / εNd(T); -0.7					
	east group I : εSr(0); 38.1 / εSr(T); 11.7 / εNd(0); -1.4 / εNd(T); -0.9					
Source	Total : 598~1207 Ma (887 Ma) Except 3 samples : 876~961 Ma (921 Ma)					
T ₂ DM (Ave.)	Total : 576~900 Ma (734 Ma) Except 1 sample : 576~777 Ma (693 Ma)					

Abbreviations are the same as those in Table 1.

타내며, 이들을 관입한 그룹 II의 등립질화강암과 미문상화강암에서는 혼합의 증거들이 나타나지 않는다. 미량성분 및 동위원소 조성은 양산단층의 경계로 지역별 차이는 없으며, 그룹별로는 매우 뚜렷한 조성변화를 잘 나타내므로 두 그룹은 서로 다른 마그마로부터 진화된 것으로 판단된다.

2) 화강암류들의 Rb-Sr 전암연령을 그룹별로 구하면, 그룹 I의 경우 동측지괴가 59.2 ± 2.9 Ma, 서측지괴가 58.9 ± 6.2 로 약 58~59 Ma에 수렴되고, 그룹 II의 경우 동측지괴가 53.3 ± 2.2 Ma, 동측지괴가 51.7 Ma로 약 51~53 Ma에 수렴된다. 양측지괴에서 그룹 I과 그룹 II의 화강암류들은 6~8 Ma 정도의 연령차이를 보여준다.

3) Sr-Nd 동위원소 연구를 통하여, 연구지역 화강암류들은 그룹별로 근원물질이 달랐을 것으로 판단되며, 결핍맨틀에 의한 모델연령은 그룹 I이 약 0.8~0.9 Ga이며, 그룹 II는 이보다 약 0.1~0.2 Ga 정도 젊은 약 0.6~0.7 Ga에 해당된다. 이는 그룹 II의 화강암류들의 그룹 I 보다 상부에서 형성되었을 가능성을 시사한다.

4) 그룹 I의 화강암류들은 약 58~59 Ma 경에 정치하여 염기성마그마의 주입에 의해 다양한 마그마 혼합의 영향을 받았으며, 그 후 약 51~53 Ma 경에 그룹 II의 화강암류들이 그룹 I을 관입하였다. 양산단층은 화강암류들이 완전히 고화되고 난 이후에 현재와 같이 이동하였던 것으로 판단되며, 따라서 양산단층의 최종 운동시기는 적어도 51 Ma 이후가 될 것이다.

사 사

논문심사과정에서 여러 문제점을 지적하고 논문전개에 많은 유익한 도움을 주신 정원우 교수님, 윤성효 교수님, 이종익 박사님께 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

김근수, 김정진, 박맹언 (1997) 경상분지에 분포하는 화강암질암체에 대한 Rb-Sr 연대. 한국암석학회 학술발표회 요약집, 20.
 김종선 (2001) 경상분지 남부 지역의 화강암류에 산

출되는 포유체의 암석학적 연구: 마그마 불균질 혼합에 관한 고찰. 부산대학교 박사학위논문, 211p.
 대한지질학회 (1999) 한국의 지질. 시그마프레스, 802p.
 이종익, 이미정, 두경택, 이민성, Keisuke Nagao (1997) 경상분지 중동부 울산-경주 지역의 화강암체에 대한 K-Ar 연대 측정. 한국지구과학회지, 18(5), 379-386.
 정창식, 권성택, 김정민, 장병욱 (1998) 경상분지 북부에 분포하는 온정리 화강암에 대한 암석화학적, 동위원소 지구화학적 연구: 경상분지 다른 지역과 서남 일본 내대에 분포하는 백악기-제3기 화강암류와의 고찰. 암석학회지, 7(2), 77-97.
 진미정, 김종선, 이준동, 김인수, 백인성 (2000) 양산시 원효산 화강암에 산출되는 포획암에 대한 암석학적 연구. 암석학회지, 9(3), 142-168.
 황병훈 (1995) 경주 남산-토함산 일원의 화강암질암체에 관한 암석학적 연구. 부산대학교 석사학위논문, 70p.
 황병훈 (2004) 경상분지 남부지역에 분포하는 화강암질암에 대한 암석학, 동위원소 및 성인. 부산대학교 박사학위논문, 307p.
 황병훈, 이준동, 양경희 (2004) 양산단층 주변에 분포하는 화강암질암의 암석학적 연구: 양산단층의 수평 변위량. 지질학회지, 40(2), 161-178.
 Arth, J.G. (1976) Behaviour of trace elements during magmatic processes - a summary of theoretical models and their applications. J. Res. U.S. Geol. Surv., 4, 41-47.
 Ayuso, R.A. and Arth, J.G. (1992) The Northeast Kingdom batholith, Vermont: magmatic evolution and geochemical constraints on the origin of Acadian granitic rocks. Contribution to Mineralogy and Petrology, 111, 1-23.
 Barker, K. (1989) Tracer versus trace element diffusion: diffusional decoupling of concentration from Sr isotope composition. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, 3015-3023.
 Faure, G. (1986) Principles of isotope geology. John Wiley & Sons, Inc., 589p.
 Holden, P., Halliday, A.N., and Stephens, W.E. (1987) Neodymium and strontium isotope content of microdiorite enclaves points to mantle input to granitoid production. Nature, 330, 53-56.
 Koh, J.S. (2001) Mineralogical, geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of the Namsan A-type and Gyeongju I-type granitic rocks in the Gyeongsang basin, Korea. Ph D. Thesis, Pusan

- National University, 173p.
- Lee, J.I. (1991) Petrology, mineralogy and isotopic study of the shallow-depth emplaced granitic rocks, southern part of the Kyeongsang basin, Korea: Origin of micrographic granite. Ph D. Thesis, University of Tokyo, 197p.
- Lugmair, G.W. and K. Marti (1978) Lunar initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: Differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 39, 349-357.
- Mason, B. and Moore C.B. (1982) Principles of geochemistry-Fourth edition. John Willey & Sons, Inc., 344p.
- McBirney, A.R. (1993) Igneous petrology. Jones and Bartlett Publishers, Inc., 508p.
- Michard, A., Gurriet, P., Soudant, M., and Albaredé, F. (1985) Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. internal aspects of crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 601-610.
- Myers, J.D., Marsh, B.D., Frost, C.D., and Linton, J.A. (2002) Petrologic constraints on the spatial distribution of crustal magma chamber, Atka Volcanic Center, central Aleutian arc. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 143, 567-586.
- Na, C.K. (1994) Genesis of granitoid batholiths of Okchon zone, Korea and its implications for crustal evolution. Ph. D. dissertation, Univ. Tsukuba, 154p.
- Poli, G.E. and Tomasini, S. (1991) Model for the origin and significance of microgranular enclaves in calc-alkaline granitoids. *Journal of Petrology*, 32, 657-666.
- Rollinson H. (1993) *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*. Longman Group UK Ltd., 352p.
- Sajona, F.G., Maury, R.C., Pubellier, M., Leterrier, J., Bellon, H., and Cotten J. (2000) Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a young post-collision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54, 173-206.
- Steiger, R.H. and Jager, E. (1977), Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359-362.
- Sun, S.S. (1982) Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, 179-192.
- Tremblay, A., Lafleche, M.R., McNutt, R.H., and Bergeron M. (1994) Petrogenesis of Cambro-Ordovician subduction-related granitic magmas of the Quebec Appalachians, Canada. *Chemical Geology*, 113, 205-220.

2005년 8월 30일 원고접수, 2005년 9월 6일 게재승인.