

월출산 지역에 분포하는 중생대 화강암류에 대한 미량원소와 희토류원소의 특성

이창신* · 김정빈**

Trace Elements and REE Characteristics of the Mesozoic Granites in the Wolchul Mt. Area

Chang-Shin Lee and Cheong-Bin Kim

Abstract : The Wolchul Mt. area is composed of a biotite granite and a pink feldspar granite. These granites are distinctly different in terms of their field occurrence, mineralogy, trace element and REE composition, as well as their isotope ages. The biotite granite has higher ferromagnesian elements and lower lithophile trace element abundances than the pink feldspar granite. The biotite granite has high Sr and Ba while the pink feldspar granite has high Rb. On the Rb-Sr-Ba diagram the biotite granite plots as a granodiorite while the pink feldspar granite belongs to a strongly differentiated granite. The Σ LREE/ Σ REE for the biotite granite is 0.95 and for the pink feldspar granite it is 0.88. The ratio shows a steep decrease in LREE while HREE is essentially constant. Based on the Eu/Sm, [La/Lu]_{cn} and low Eu(-), the biotite granite has quartz diorite to granodiorite composition while the pink feldspar granite, with a relatively high Eu(-) anomaly, falls into the monzo- to syenogranite classification. The silica vs. trace element diagrams for the two granites indicate that the biotite granite could have formed near to a continental margin or volcanic island setting environment while the pink feldspar granite formed within a continental plate or as result of plate collision. The biotite granite has a U-Pb zircon age of 175 Ma, i.e. Middle Jurassic. The pink feldspar granite is younger, it has a K-Ar orthoclase age 93.6 ± 1.5 Ma which is Late Cretaceous age.

서 언

한반도에서 중생대의 화성활동은 송림변동, 대보운동과 불국사변동을 들 수 있으며 송림변동은 트라이아스기에서 쥐라기 초기에 한반도의 북부지역과 영남육괴의 일부 지역에, 대보운동은 쥐라기에 한반도의 중부지역에, 불국사변동은 백악기에서 제 3기초에 남부와 남동부지역을 중심으로 각각 화강암을 수반하여 일어났다 (김옥준, 1971; 1975).

월출산지역(Fig. 1)은 지구조적으로 옥천 고지향사대와 영남육괴 지리산지구의 서남대 및 경상계 퇴적분지가 접하는 최남단으로 광주-영동 함몰대의 일부인 능주-해남분지의 해남지역에 해당한다. 능주-해남분지는 선캠브리아기의 변성편마암류를 기반으로 선캠브리아기의 화강편마암류, 시대미상의 변성퇴적암류와 평안층군의 퇴적암류, 쥐라기부터 백악기말까지 대보화강암과 불국사화강암에 해당하는 두차례의 화강암체의 관입과 백악기 화산암류와 퇴적암류등 복잡한 지질양상을 보여주고 있다(김정빈 등, 1994). 연구지역은 월출산을 중심으로 영암군 남부지역과 강진군과 해남군의 일부 지역으로 선캠브리아기의 편마암 복합체를 기저로 중생대 쥐라기의 흑운모화강암, 백악기의 다양한 화산암류와 경상계 퇴적암류 그리고 홍색장석

* 조선대학교 공과대학 자원공학과 (Dept. of Min. and Petrol. Eng., Chosun Univ., Kwangju 501-759, Korea).

** 전남대학교 자연과학대학 지질학과 (Dept. of Geol., Chonnam Nat. Univ., Kwangju 500-757, Korea).

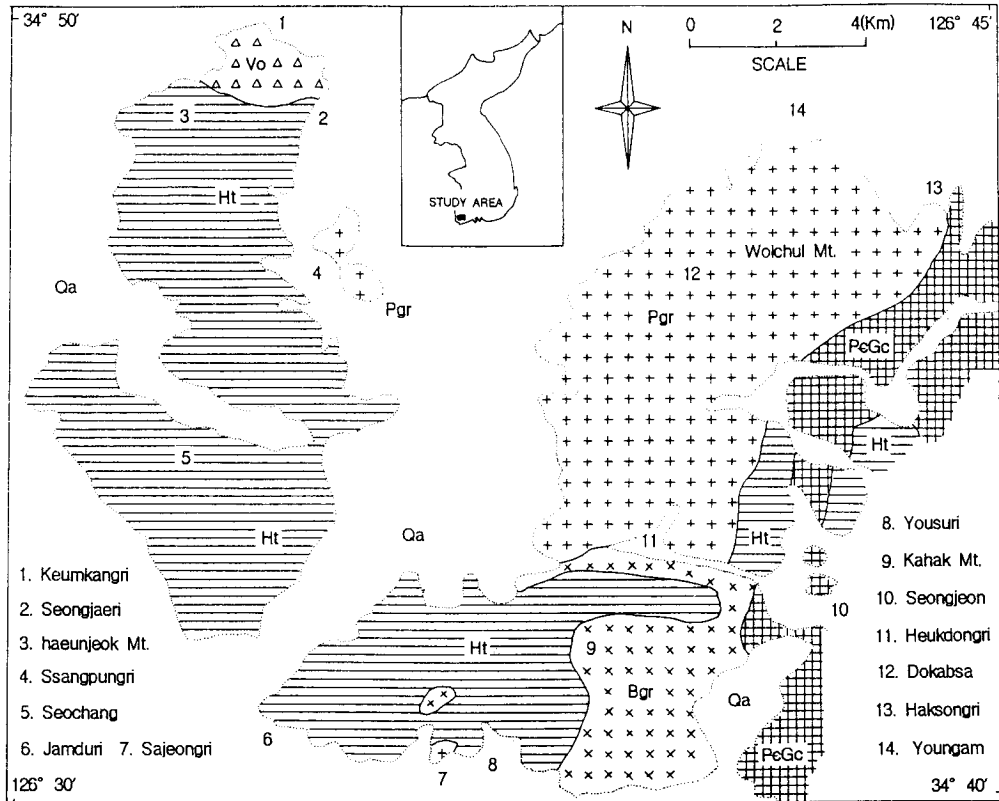


Fig. 1. Geologic map of the Wolchul Mt. area. PcGc; Precambrian gneiss complex, Bgr; biotite granite, Ht; Huang-san tuff, Vo; Volcanics(andesite and rhyorite), Pgr; Pink feldspar granite Qa; alluvium.

화강암으로 구성된다. 또한 연구지역을 포함한 해남-완도 지역은 한국에서 가장 넓은 열수성 비금속광화대로 그 성인은 산성화산암과 응회암이 열수변질을 받아서 형성된 것으로 밝혀진 바 있다 (김중환 등, 1990; 1992; 박홍봉 등, 1982; 1988; 문희수 등, 1991; 문희수, 송윤구, 1992; 신상은 등, 1991; 유장한, 1985; 이성록, 김문영, 1985; 전효택 등, 1991; Cho, Kim, 1989).

본역에 대한 기존의 연구는 비금속 광화작용과 화성활동의 시기(김용준 등, 1990; 1991; 문희수 등, 1991; 주승환, 지세정, 1990; Kim, 1991)에 대한 연구가 수행된 바 있고 나주-해남-완도지역에 분포하는 화강암류에 대한 암석학적인 연구는 양우석 (1991), 김용준 등 (1993), 김정빈 등 (1994)과 신인현 (1994)등이 있다. 연구지역에서 백악기말의 화산암류의 분포와 홍색장석화강암의 관입을 화산구조적인 관점에서 화산합물체로 해석하는 견해가 윤성효 (1990), 차문성과 윤성효 (1988)에 의해서 제기되었으며 김상욱 (1972)은 화성유희의 특성에 대하여 언급하였다.

본 연구는 월출산지역에 분포하는 주라기의 흑운모화강암과 백악기의 홍색장석화강암에 대한 미량원소와 희토류원소의 지구화학적 특성과 거동 및 분별과정을 종합 검토하되로서 월출산지역에서 화성활동과 마그마의 특성 및 판 구조론에 따른 지구조적 환경을 밝히는데 연구의 목적이 있다. 이 과정을 수행하기 위하여 월출산지역에 분포하는 흑운모화강암과 홍색장석화강암에 대해 각 암체를 대표할 수 있는 신선한 시료를 채취하여 흑운모화강암 9시료, 홍색장석화강암 9시료 등 총 18시료에 대하여 영국 런던대학의 J.N. Walsh 박사에 의해 ICP를 이용하여 Ba, Co, Cr, Cu, Li, Nb, Ni, Sc, Sr, V, Y, Zn, Rb 등 13성분의 미량원소를 분석하였으며 SiO₂, K, Ca, Mg 등 4원소의 주성분원소는 김정빈 등 (1994)에서 인용하였다. 희토류원소는 흑운모화강암과 홍색장석화강암체에서 각각 1개씩 선별하여 란단계열중 Tb와 Tm을 제외한 La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Er, Yb, Lu 등 12성분을 분석하였으며 오차의 한계는 5~10%의 범위 이내이고 Nakamura (1973)에 의한 운석의 함량을 이용하여 표준

Table 1. Geologic sequence of Wolchul Mt. area

Quat.	[Alluvium ~unconformity~
Cret.	[Pink feldspar granite -intrusion- Andesite and rhyolite flow and intrusion Huangsantuff ~unconformity~
Jura.	[Biotite granite -intrusion-
Pre-C.	[Gneiss complex

화 시켰다.

지질개요

연구지역의 지질은 선캄브리아기의 편마암복합체를 기저로 이를 관입하는 흑운모화강암, 상기 두 암층을 부정합의 관계로 덮는 백악기의 화산암류와 황산응회암 그리고 상술한 모든 암층을 관입하는 홍색장석화강암으로 이루어져 있다(Fig. 1, Table 1).

편마암복합체

연구지역의 북동부에 분포하는 편마암복합체는 광주-영동 함몰대와 평행한 북동(NE) 방향으로 연장 분포되며 월남 저수지부근에서 응회암에 의해 부정합으로 덮이고 학송리지역에서 홍색장석화강암에 의해 관입된다. 본역에서 관찰되는 편마암복합체는 지리산지역에서 관찰되는 편마암류와는 구성광물과 산상에서 현격한 차가 있으며 조직도 화강암질편마암 보다 편암이나 결정편암류에 가깝다. 편마암복합체는 화강암질편마암, 결정질편암, 흑운모편암, 견운모편암과 석회질규암으로 구성되며 이들의 편리의 개략적인 주향과 경사는 N10-20°E와 40~80°NW이다.

흑운모화강암

흑운모화강암은 가학산을 중심으로 연구지역의 남동부 지역에 분포하며, 암회색을 띠는 균질한 중립 내지 조립의 화강암질암으로 풍화를 많이 받아 대체로 낮고 완만한 지형을 보인다(김정빈 등, 1994). 흑운모화강암은 학송리 부근에서 편마암복합체를 관입하고 흑석산과 잠두리 서북 해안지역에서 응회암류에 의해 부정합으로 덮이며, 성전면 당산리 지역에서 암주상이나 맥상 관입체

로 출현하는 홍색장석화강암에 의해 관입된다. 흑운모화강암에 대한 모드분석 결과는 토날라이트에서 화강섬록암의 영역에 해당되며 각섬석은 본암의 특징적인 광물중의 하나로 지역에 따라서 함량과 변질정도의 차가 심하다(김정빈 등, 1994). 연구지역의 흑운모화강암은 구성광물, 조직 및 산상등이 광주화강암류를 구성하는 흑운모화강암체와 거의 일치하여 본 암체가 광주화강암의 연장 암체로 추측이 가능하나 후기의 월출산화강암의 관입에 의해 절단되었다. 광주화강암류중 흑운모화강암과 연구지역의 흑운모화강암에 대한 절대연령측정 결과 U-Pb zircon 지질연대는 175 Ma로 등시선의 하단부에 수렴하며(김정빈, 미발표) 주라기 중기를, 흑운모를 이용한 Ar-Ar과 K-Ar 지질연대는 159 Ma(박영석, 미발표)와 145±2 Ma(Kim, 1991)로 주라기 말기를 시사한다. 이는 U-Pb zircon 지질연대가 마그마의 관입시기를 그리고 Ar-Ar과 K-Ar 지질연대가 마그마 고결과정에서 흑운모의 폐쇄온도 시기를 지시하는 것으로 사료된다. 또한 광주화강암체와 유사한 구성광물과 암상을 보이는 남원화강암체의 U-Pb, zircon 지질연대가 등시선 하단에 수렴하며 176Ma±3 Ma(Turek, Kim, 1995)인 것 과도 일치한다.

황산응회암

연구지역의 서부와 서남부지역에 널리 분포하는 응회암류는 해남층군에 속하는 황산응회암에 대비되는 암층으로서 우황리층을 정합으로 덮는다(이대성, 이하영, 1976). 연구지역의 응회암은 황산응회암의 최상위에 해당하는 유문암질응회암이 주류를 이루나 연구지역의 서북부인 하은적산 부근에서는 담홍색이나 담백색 유문암질이나 규장암질편이 우세한 유문규장암질응회암상을, 잠두리 부근에서는 유동구조가 우세한 담저색이나 저색의 유문암편을 함유한 유문암질응회암상을 보이며 삼호면 사창 저수지 부근에서는 유동구조가 거의 없고 암록색이나 암회색을 띠는 석영안산암과 안산암편을 다수 함유하는 안산암질응회암상을 보이는등 지역에 따라서 암질의 변화가 심하다(김정빈 등, 1994). 유문암질응회암은 주로 유문암질 내지 유문석영안산암질 바탕에 안산암, 유문암, 화강암과 스페룰라이트(spherulite)의 암편이나 석영, 장석 등의 결정편이 포함된다. 유문암질이나 유문석영안산암질 기질은 유동구조를 보임이 보통이나 부분적으로는 사장석과 석영이 반정으로 들어 있어 반상조직을 보이기도 한다. 또 바탕에는 유리질 부분이 얼마간 존재하며 드물게는 거의 유리질 바탕으로 되어 있어 진주암 조직

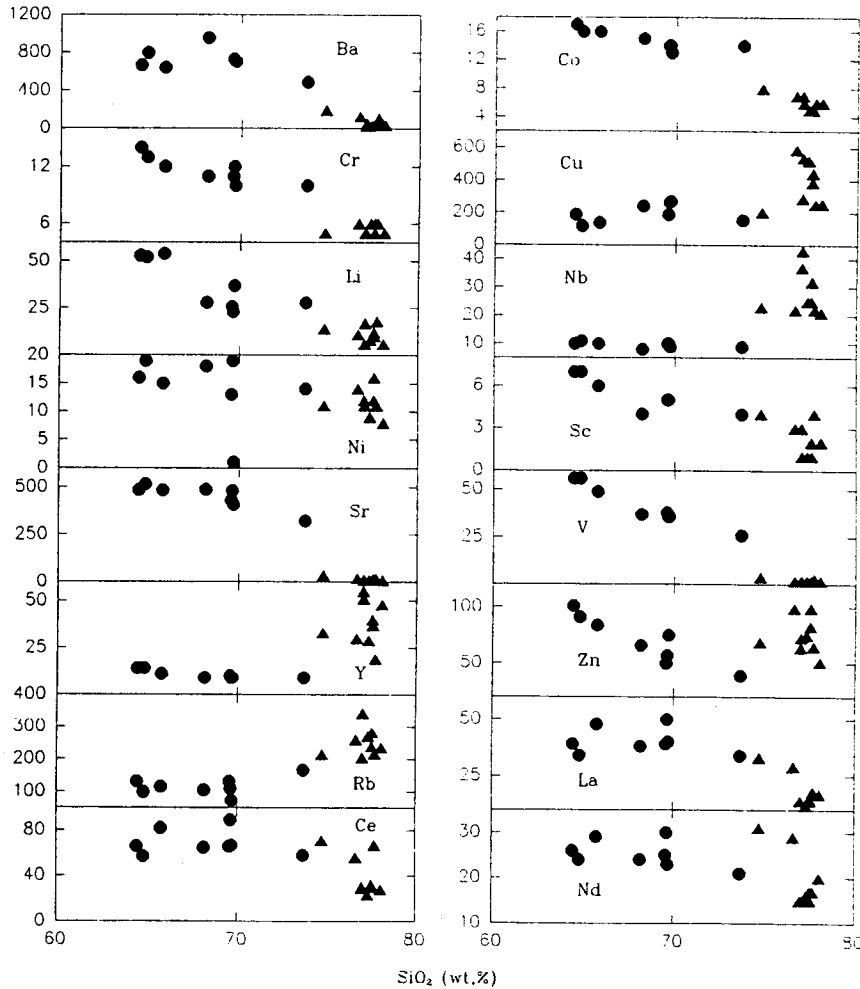


Fig. 2. Trace elements versus silica of Mesozoic granites in the Wolchul Mt. area. filled circle; Biotite granite, full-ed triangle; Pink feldspar granite.

(pearlitic texture)이나 탈유리화 작용이 일어나 진주암 조직과 스페룰라이트질 조직 (spherulitic texture)을 같은 암석시료에서 보여주기도 한다 (김종환 등, 1990).

안산암과 유문암

연구지역에 분포하는 안산암은 서북부인 성재리와 금강리 구간에 직경이 약 2 km 내외로 분포하고 성재리에서 금강리로 넘어가는 고개에서는 현무암질안산암편과 화강섬록암편을 포획한다 (김정빈 등, 1994). 안산암은 응회암을 관입하는 구조와 피복하는 유동구조가 거의 동시에 관찰되기도하나 대체로 사장석과 휘석의 반정을 포함하며 암록색을 띤다. 또 쌍풍리 서편 관봉 남부 산록에는 본암이 맥상

관입암체로 다수 분포하며 편마암류와 응회암지역에서도 소규모의 맥상으로 자주 관찰된다(김정빈 등, 1994).

유문암은 유문암질응회암 내에 협재되는 유동구조가 뚜렷한 암상과 반상 조직이 뚜렷하고 맥상이나 용암류로 비교적 넓은 지역을 덮는 암상이 나타나며 색깔은 주로 담색이나 담홍색을 띤다. 유문암에 대한 지질시대는 연구지역의 서부에 해당하는 월강두에서 채취한 암석에 대해 K-Ar 전암법으로 시도되었으며 79.6±3.2 Ma로 백악기 말이다 (Kim, 1991).

홍색장석화강암

홍색장석화강암은 월출산을 중심으로 연구지역의 북부

Table 2. Chemical analyses of Mesozoic granites in Wolchul Mt. area.

	Biotite granite											Pink feldspar granite									
	YS-1	YS-21	YS-22	YS-23	YS-24	YS-25	YS-26	YS-27	YS-28	YS-9	YS-11	YS-12	YS-15	YS-16	YS-17	YS-18	YS-19	YS-20			
SiO ₂ (wt.%)	73.68	58.15	68.16	69.93	59.56	69.69	65.76	64.81	64.44	77.68	76.62	74.72	77.53	77.51	77.00	76.98	78.05	77.30			
K	2.739	2.017	2.532	2.183	2.731	1.901	2.200	2.299	2.440	3.561	3.852	3.985	3.569	3.362	3.470	3.478	3.304	3.428			
Ca	2.022	4.817	2.351	2.329	2.108	2.144	3.030	3.123	3.108	0.107	0.050	0.443	0.185	0.124	0.300	0.300	0.228	0.135			
Mg	0.506	1.773	0.699	0.663	0.687	0.651	0.947	1.103	1.073	0.012	0.018	0.036	0.012	0.012	0.018	0.006	0.006	0.006			
Ba(ppm)	488	601	956	7.15	732	706	604	798	665	108	127	195	62	50	52	25	35	30			
Rb	166	102	105	109	131	72	115	98	131	215	260	214	282	238	342	204	235	270			
Sr	323	563	489	482	431	409	484	517	487	15	19	34	16	12	13	9	9	9			
Cu	156	288	240	264	188	269	139	119	189	253	578	203	445	386	538	288	254	522			
Zn	39	105	66	57	50	75	84	91	101	605	99	69	99	83	73	64	51	75			
Co	14	21	15	14	14	13	16	16	17	6	7	8	5	5	6	7	6	5			
Cr	10	17	11	12	11	10	12	13	14	6	6	5	6	5	5	5	5	6			
Ni	14	21	18	19	13	1	15	19	16	11	14	11	16	12	11	12	8	9			
Sc	4	14	4	5	5	5	6	7	7	4	3	4	1	2	1	3	2	1			
V	26	90	37	36	38	36	49	56	56	3	2	4	2	2	2	2	2	2			
Nb	9	9	8	10	10	9	10	11	10	22	22	23	32	25	43	37	21	25			
Y	9	18	9	9	10	9	11	14	14	19	30	33	37	40	51	55	48	29			
La	34	29	38	50	39	40	48	34	39	18	29	33	14	15	14	14	17	12			
Ce	58	49	65	89	66	67	82	57	66	67	56	71	30	32	29	30	28	23			
Nd	21	22	24	30	25	23	29	24	26	17	29	31	15	17	15	15	20	16			
Li	28	46	28	23	26	37	54	52	53	18	11	14	10	12	17	6	6	8			
K/Ba	56	33	26	30	37	26	34	28	36	329	303	204	575	672	667	1391	944	1142			
K/Rb	165	197	241	200	208	264	191	234	186	165	148	186	126	141	141	170	140	126			
Ba/Sr	1.51	1.07	1.96	1.48	1.69	1.73	1.32	1.37	1.54	7.20	6.68	5.74	3.88	4.17	4.17	2.78	3.88	3.33			
Ca/Sr	62	85	48	48	48	52	62	60	63	71	26	130	116	178	178	333	254	150			
Mg/Li	180	385	249	288	264	176	175	212	202	6	16	25	12	10	10	10	10	7			

와 중앙부지역에 널리 분포하며 담홍색을 띠는 조립질 화강암질암으로 경사면이 급격한 산악지형을 이루고 부분적으로 화강반암상을 보이며 경상누층군의 일원인 진안-능주층군에 대비되는 응회암과 퇴적암류를 부조화 관입하고 다량의 정동구조를 함유하는 등 전형적인 천부 관입암의 산상을 보인다. 홍색장석화강암은 학송리지역에서 편마암복합체를 관입하고 여수리 뒷산에서는 흑운모화강암과 응회암을 관입한다. 홍색장석화강암에 대한 모드분석 결과는 화강암에 해당한다 (양우석, 1991). 야외산상에서 본암은 풍화대가 깊고 본역이 개발이 제한되는 국립공원지역에 해당되어 신선한 노두관찰이 어려웠다. 또 현미경하에서 본암의 흑운모와 사장석은 녹니석이나 견운모등에 의해 심하게 변질된것을 쉽게 관찰할 수 있다. 본암의 지질시대를 결정하기 위한 암석시료는 강진군 성전면 성전리 뒷산의 채석장 (월출산 홍색장석화강암 지역에 위치한 유일한 채석장)에서 채취하였고 또 현미경하에서 변형이나 변질을 받지 않은 신선한 정장석을 분리하였다. 분리된 정장석은 K-Ar법으로 측정하였으며 그 값은 93.6 ± 1.5 Ma로 Kim (1991)에 의해 K-Ar 전압법에 측정된 81.2 ± 2 Ma 보다 더 오래된 값을 보인다.

화강암류에 대한 미량원소

연구지역에 분포하는 흑운모화강암과 홍색장석화강암에 대한 미량원소의 분석치는 Table 2에, 미량원소와 SiO_2 함량에 대한 변화도는 Fig. 2와 같다. 본역의 화강암류에 대한 미량원소들의 평균함량중 Ba, Sr, V, Rb, Nb, La, Ce, Y은 Taylor (1965)가 제안한 화강암의 평균치와, Cu, Zn, Co, Cr, Ni, Li은 Vinogradov(1962)가 제시한 화강암의 평균값과 각각 비교하였다. 또 미량원소들의 특성에 따라 친석원소, 친동원소, 철·마그네슘계열원소와 희토류원소의 일부와 HFS (High Field Strength) 원소를 구분하여 논하였다.

친석원소(Ba, Rb, Sr, Li등)

Ba의 평균함량은 흑운모화강암에서 700 ppm, 홍색장석화강암에서 76 ppm으로 Taylor (1965)가 제안한 화강암의 평균함량(600 ppm)과 비교하면 흑운모화강암은 다소 부화된 값을, 홍색장석화강암은 1/9값으로 결여되어 있다. 흑운모화강암에서 Ba은 SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 68 wt.%까지는 대체로 증가하나 그 이상에서는 오히려 감소하며 홍색장석화강암은 대체로 감소하는 부(-)의 상관관계를 보여준다. Rb의 평균함량은 흑운모화강암에

서 114 ppm, 홍색장석화강암에서 251 ppm으로 Taylor (1965)의 화강암 평균치 (150 ppm)와 비교하면 흑운모화강암은 다소 낮은 값을 보여주나 홍색장석화강암은 부화된 값을 보인다. SiO_2 가 증가하면서 흑운모화강암에서 Rb은 완만하게 증가하나 홍색장석화강암은 불규칙한 분포를 보여준다.

Sr의 평균값은 흑운모화강암에서 465 ppm, 홍색장석화강암에서 15 ppm으로 Taylor (1965)가 제시한 화강암의 평균값 (285 ppm)과 비교하면 흑운모화강암은 약 2배 정도 부화된 값을 보이고 홍색장석화강암은 1/15의 극히 낮은 값을 보인다. SiO_2 가 증가함에 따라 Sr은 흑운모화강암에서 완만하게 감소하는 부(-)의 상관관계를 보이나 홍색장석화강암은 일정하다.

Li의 평균함량은 흑운모화강암에서 36 ppm, 홍색장석화강암에서 11 ppm으로 Vinogradov (1962)의 화강암 평균함량(41 ppm)에 비교하면 흑운모화강암은 거의 일치하는 값을 보이나 홍색장석화강암은 1/4의 낮은 값을 보인다. SiO_2 가 증가하면서 흑운모화강암에서 Li의 함량은 감소하는 부(-)의 상관관계를 보이나 홍색장석화강암은 불규칙한 분포를 보인다.

친동원소(Cu와 Zn)

Cu의 평균함량은 흑운모화강암에서 206 ppm, 홍색장석화강암에서 327 ppm으로 Vinogradov (1962)가 제안한 화강암의 평균값(20 ppm)에 비하면 연구지역의 화강암류는 10배 이상의 부화된 값을 보여주며 SiO_2 의 함량이 증가할수록 흑운모화강암은 완만한 증가를 보여주나 홍색장석화강암은 급격한 증가를 보인다.

Zn의 평균함량은 흑운모화강암이 74 ppm, 홍색장석화강암이 73 ppm으로 Vinogradov (1962)가 제시한 화강암의 평균치(60 ppm)과 거의 일치한다. SiO_2 의 함량이 증가함에 따라 흑운모화강암은 감소하는 부(-)의 상관관계를 보여주나 홍색장석화강암은 불규칙한 거동을 보여준다.

철·마그네슘계열원소(Co, Cr, Ni, V, Sc등)

Co의 평균함량은 흑운모화강암에서 16 ppm, 홍색장석화강암에서 6 ppm으로 Vinogradov (1962)가 제안한 화강암의 평균치(5 ppm)에 비하면 흑운모화강암은 3배정도 부화된 값을 보여주나 홍색장석화강암은 대체로 일치한다.

Cr의 평균함량은 흑운모화강암에서 12 ppm, 홍색장석화강암에서 5 ppm으로 Vinogradov (1962)가 제시한 화

강암의 평균치 (25 ppm) 보다 낮은 값을 보인다.

Ni의 평균함량은 흑운모화강암이 15 ppm, 홍색장석화강암이 12 ppm으로 Vinogradov (1962)의 화강암 평균값 (8 ppm) 보다 다소 높은 값을 보인다. V의 평균함량은 흑운모화강암에서 47 ppm, 홍색장석화강암에서 2 ppm으로 Taylor (1965)가 제안한 화강암의 평균치 (40 ppm)에 비교하면 흑운모화강암은 대체로 일치하나 홍색장석화강암은 현저하게 낮은 값을 보여준다.

Sc의 평균함량은 흑운모화강암이 6 ppm, 홍색장석화강암이 2 ppm으로 흑운모화강암이 3배 정도 부화된 값을 보인다.

SiO₂의 함량이 증가할수록 Co, Cr, Ni, V과 Sc값은 흑운모화강암에서는 뚜렷이 감소하는 부(-)의 상관관계를 보이거나 홍색장석화강암에서는 일정하거나 불규칙한 분포를 보인다.

HFS(High Field Strength)원소와 희토류원소(La, Ce, Nd, Y등)

Nb의 평균함량은 흑운모화강암에서 10 ppm, 홍색장석화강암에서 25 ppm으로 Taylor (1965)가 제안한 화강암의 평균치 (20 ppm) 보다 흑운모화강암은 낮고 홍색장석화강암은 약간 부화된다. SiO₂의 함량이 증가함에 따라 흑운모화강암은 거의 일정한 값을 가지나 홍색장석화강암은 불규칙하게 분포한다.

La의 평균함량은 흑운모화강암에서 39 ppm, 홍색장석화강암에서 18 ppm으로 Taylor (1965)의 화강암 평균치 (25 ppm) 보다 홍색장석화강암은 결여되고 흑운모화강암은 부화된 값을 보인다.

Ce의 평균함량은 흑운모화강암에서 67 ppm, 홍색장석화강암에서 47 ppm으로 Taylor (1965)가 제안한 화강암의 평균치 (46 ppm)에 비하면 흑운모화강암은 다소 부화되었으나 홍색장석화강암은 일치하는 값을 보인다.

Y의 평균값은 흑운모화강암에서 11 ppm, 홍색장석화강암이 38 ppm으로 Taylor (1965)의 화강암 평균값(40 ppm) 보다 흑운모화강암은 4배 정도 결여된 값을, 홍색장석화강암은 일치하는 값을 보인다. SiO₂ 함량이 증가함에 따라 La, Ce, Y는 흑운모화강암에서는 약간 감소하는 경향을 보이거나 홍색장석화강암에서는 불규칙한 분포를 보인다.

화강암류에 대한 희토류원소

희토류원소는 란타계열에 속하며 물리적 및 화학적 성

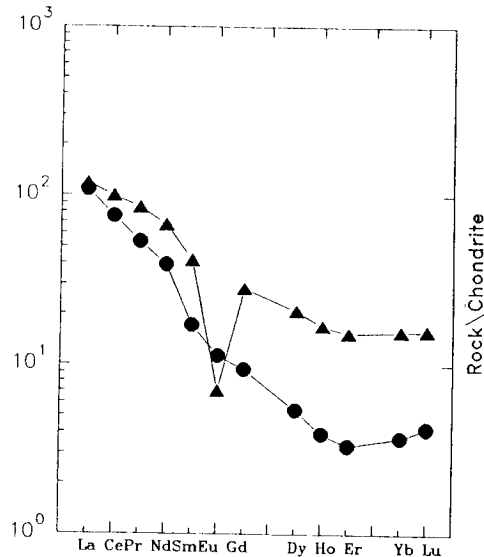


Fig. 3. Chondrite normalized REE patterns of Mesozoic granites in the Wolchul Mt. area. Symbols are the same as those in Fig. 2.

질이 매우 유사하고 암석학적 또는 광물학적 과정에 따라서 다른 거동을 하므로 지각 또는 맨틀의 부분용융, 마그마의 분화 및 혼화와 같은 화성암류의 분화과정을 밝히는데 매우 유용하게 이용되고 있다 (Henderson, 1984). 연구지역에 분포하는 화성암류중 각 암체를 대표하는 시료에 대해 희토류원소를 분석하였으며 조성분과 미량원소도 동시에 실시하였다. 희토류총량에서 경희토류(Σ LREE/ Σ REE)의 비는 흑운모화강암이 0.95, 홍색장석화강암이 0.88로 중희토류 보다는 경희토류 함량이 월등하게 부화되었음을 알수있다. 운석으로 표준화한 희토류원소의 거동에서 흑운모화강암은 La에서 Er까지 거의 일직선에 가까운 급격한 감소를 보이거나 Er에서 Lu까지는 오히려 증가하며 홍색장석화강암은 경희토류에서 비교적 급격한 감소를 보이거나 중희토류에서는 거의 일정한 값을 보여준다(Fig. 3). 사장석의 분별결정화를 지시하는 Eu(-) 이상은 홍색장석화강암에서 뚜렷하지만 흑운모화강암에서는 거의 없거나 약한 Eu(-) 이상을 보인다. 화강암류에 포함된 희토류원소는 주로 스펜, 인회석, 저어콘 및 모나자이트와 같은 부수광물에 농집되고 이러한 광물들은 중희토류보다는 경희토류를 농집시키는 경향이 크며 연구지역 뿐만 아니라 다른지역의 대부분 화강암류의 분석결과도 경희토류가 상대적으로 부화되어있다 (김용준등, 1990, 1991; 신인현, 1994). 또 중희토류가 결여된 이유중의 하나는 중희토류를 선택적으로 농축시키는 단사회석, 석류석과 각섬석등이 분별결정작용으로 마그마분화초기에 분

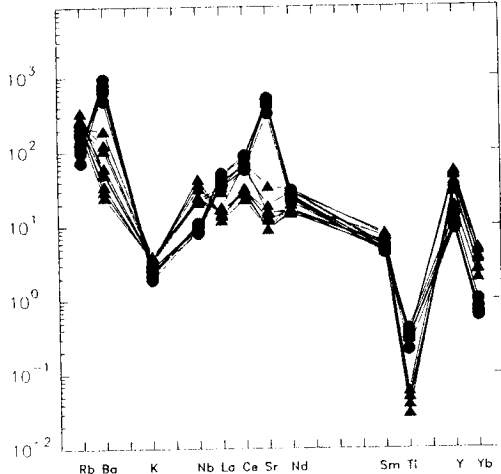


Fig. 4. Abundances of incompatible trace elements of Mesozoic granites in the Wolchul Mt. area normalized to primordial mantle composition. Symbols are the same as those in Fig. 2.

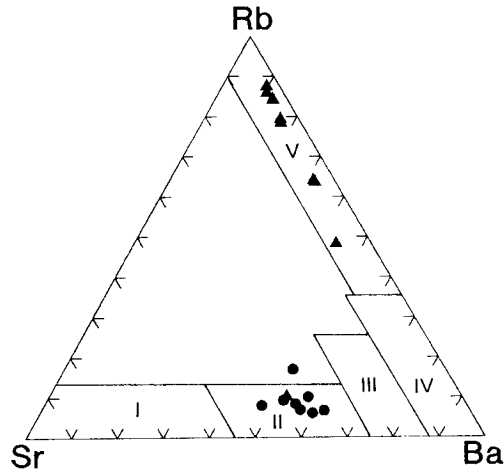


Fig. 5. Rb-Sr-Ba triangular diagram of Mesozoic granites in the Wolchul Mt. area. I; Diorite, II; Granodiorite, III; Anomalous Granite, IV; Normal Granite, V; Strongly Differentiated Granite. Symbols are the same as those in Fig. 2.

리되었을 가능성이 있다 (Mason, Moore, 1982).

화강암류에 대한 종합적 고찰

마그마의 유형과 특성

화강암류에 대한 미량원소의 거동에서 마그마의 분화가 진행될수록 흑운모화강암은 규칙적으로 증가하거나 감소하나 홍색장석화강암은 친동원소와 철·마그네슘계 열원소에서 대체로 규칙적인 거동을 보이고 나머지 원소들은 불규칙하거나 일정한 값을 갖는다. SiO₂ 함량이 증가함에 따라 Ca/Sr 값은 흑운모화강암과 홍색장석화강암에서 뚜렷이 감소하고, K/Ba와 K/Rb비는 흑운모화강암에서 대체로 감소하나 홍색장석화강암에서는 불규칙한 분포를 보인다. K/Ba와 K/Rb의 평균비는 흑운모화강암이 41과 210이고 홍색장석화강암이 692와 145로 흑운모화강암은 화강섬록암 영역에, 홍색장석화강암은 화강암의 영역에 속한다 (Henderson, 1984). 마그마의 분화와 밀접한 관계가 있는 Ba/Sr와 Mg/Li의 평균비는 흑운모화강암에서 1.52와 237, 홍색장석화강암에서 4.64와 12로 홍색장석화강암이 분화가 더 진행된 마그마의 산물임을 시사한다. Rb-Sr-Ba 삼각도 (Fig. 5)에서 흑운모화강암은 Sr과 Ba의 함량이 Rb 보다 상대적으로 부화된 화강섬록암이나 석영섬록암의 영역에 속하나 홍색장석화강암은 Rb이 Sr과 Ba 보다 농집된 분화가 잘 진행된 화강암의 영역에 해당한다. 친동원소 (Cu와 Zn)는 흑운모화강암과

홍색장석화강암에서 현저하게 부화된 값을 보이며 철·마그네슘계열원소 (Co, Cr, Ni, V, Sc등)는 흑운모화강암에서 화강암류의 평균값과 대체로 일치하나 홍색장석화강암에서는 다소 낮은 값을 갖는다.

화강암류에 대한 희토류원소의 총합량, Eu(-) 이상과 경희토류에 대한 중희토류의 상대적인 비를 지시하는 Σ REE, Eu/Sm과 [La/Lu]_{CN} 값은 흑운모화강암이 142.92 ppm, 0.24, 25.85로 칼크 알칼리계열의 석영섬록암에서 화강섬록암의 범위에, 홍색장석화강암은 209.86 ppm, 0.06, 7.42로 Eu(-) 이상이 큰 몬조니화강암이나 섬장암질화강암의 영역에 속한다(Henderson, 1984). 본역의 흑운모화강암과 홍색장석화강암을 지질시대, 암상, 구성광물 및 암석화학적으로 유사한 남원화강암과 창평지역에 분포하는 불국사화강암의 Σ REE, Eu/Sm과 [La/Lu]_{CN} 값 (김정빈, 1990)들은 166.58 ppm, 0.15, 23.5과 198.01 ppm, 0.08, 10.75로 대체로 일치하며 이 값들은 대륙이나 그 주변부의 구조적 setting에서 형성된 화강암류의 범주에 속한다 (Culler, Graf, 1984).

원시의 맨틀조성을 표준화하여 계산한 incompatible 원소의 거동은 흑운모화강암은 Ba, La, Ce, Sr, Ti가 부화되고 홍색장석화강암은 Rb, Nb, Y, Yb등의 원소가 상대적으로 높은 값을 보이거나 K, Nd, Sm은 대체로 일치한다 (Fig. 4).

Eu/Eu* 값은 보통 Eu(-) 이상이나 사장석의 분별결정화를 지시하나 Ce/Ce* 값과 연대하여 마그마 생성환경의 산

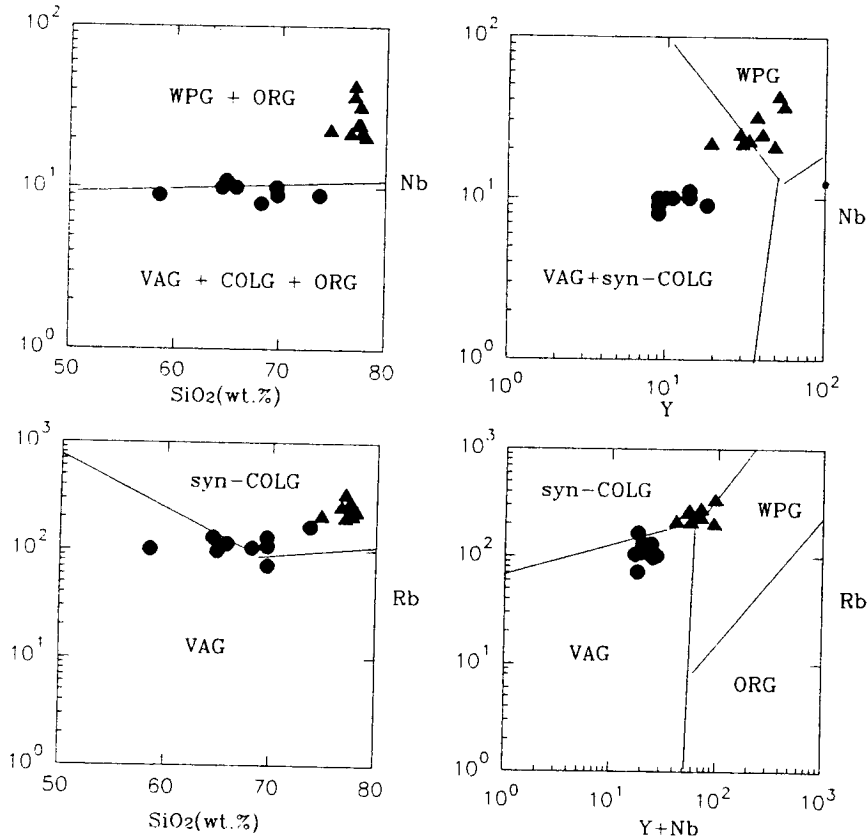


Fig. 6. Silica versus Nb(a), Rb(c), Y versus Nb(b) and Y+Nb versus Rb(d) discriminant diagrams of Mesozoic granites in the Wolchul Mt. area. Symbols are the same as those in Fig. 2.

소분압을 지시하기도 한다. 보통 Eu/Eu^* 은 Eu^{+2}/Eu^{+3} 와는 반비례하고 Ce/Ce^* 은 Ce^{+4}/Ce^{+3} 값 비례한다. 또 Eu/Eu^* 은 Fe^{+2}/Fe^{+3} 비와도 밀접한 관련이 있다 (Mass, *et. al.*, 1992). 본역의 화강암류에 대한 Eu/Eu^* 과 Ce/Ce^* 값은 흑운모화강암에서 0.28과 2.04, 홍색장석화강암에서 0.07과 2.16으로 Ce/Ce^* 의 값들은 대체로 일치하나 Eu/Eu^* 의 값들은 다소 차이가 있다. 이 차이는 홍색장석화강암의 마그마가 흑운모화강암보다 산소분압이 높은 환경에서 생성되었을 가능성보다는 사장석의 분별작용이 우세하게 진행된 결과로 사료된다. 왜냐하면 홍색장석화강암과 흑운모화강암에 대한 대자율 측정값과 $Fe^{+2}/Fe^{+2}+Fe^{+3}$ 값들은 이를 지지하지 않는다 (김정빈 등, 1994).

마그마의 지구조적 환경

Pearce (1984) 등은 화강암질암류를 미량원소의 거동을 이용하여 ORG(Oceanic ridge granite), VAG(Volcanic arc granite), WPG(Within plate granite) 및 syn-

COLG (syn-Collision granite)의 4가지 유형으로 구분하였다. 이를 연구지역에 분포하는 화강암류에 적용하여 마그마를 형성시킨 지구조적환경에 대한 판별을 시도하였다. SiO_2 대 Nb의 상관도 (Fig. 6a)에서 흑운모화강암은 VAG + COLG + ORG 영역에 해당되지만 홍색장석화강암은 WPG + ORG 영역에 점시된다. Y대 Nb의 상관도 (Fig. 6b)에서 흑운모화강암은 VAG + syn-COLG 영역에, 홍색장석화강암은 WPG와 VAG + syn-COLG 영역의 경계면에 밀집된다. SiO_2 대 Rb의 상관도 (Fig. 6c)에서 흑운모화강암은 VAG와 syn-COLG 영역의 경계부분에 집중되나 홍색장석화강암은 syn-COLG 영역에 해당한다. Y + Nb대 Rb 상관도 (Fig. 6d)에서 흑운모화강암은 대체로 VAG 영역에 속하나 홍색장석화강암은 VAG와 syn-COLG 및 WPG의 삼중점에서 syn-COLG와 WPG 경계면으로 약간 치우쳐서 집중적으로 점시된다. 마그마의 생성심도를 시사하는 Rb대 Sr 상관도 (Fig. 7)에서 흑운모화강암은 30 Km 이상을 시사하나 홍색장석화강암은 20~30 Km구간에 점시된다. SiO_2 와 미량원소들을 이용한 지

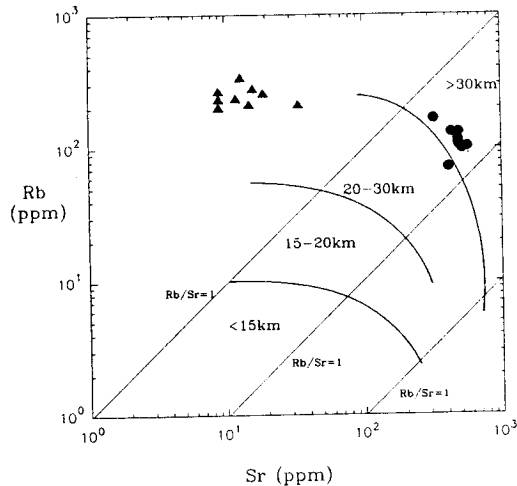


Fig. 7. The relationship between Rb and Sr of Mesozoic granites in the Wolchul Mt. area. Symbols are the same as those in Fig. 2.

구조적 판별도 (Fig. 6a, b, c, d)에서 흑운모화강암은 대체로 VAG나 syn-COLG 영역내에 점시되나 홍색장석화강암은 WPG 영역에 속하거나, syn-COLG과 VAG영역의 경계부에서 점이적인 변화를 보여준다. 흑운모화강암과 홍색장석화강암은 지질연대적으로 약 85 Ma의 시간적인 간격을 갖는점과 현재의 동아시아판과 태평양판의 경계가 일본열도 남동해안에 근접해 있는것을 고려하면 양자를 비슷한 판구조적인 환경으로 해석하는것은 다소 설득력이 약하다. 연구지역의 흑운모화강암은 섬록암질암의 포유물 함유, Sr원소의 부화, REE의 거동 그리고 저어콘을 이용한 U-Pb 지질연대에서 등시선의 하단부에 수렴하는 등 전형적인 변성화성암 (meta igneous rocks)의 부분 용융으로 형성된 마그마에서 기원한 화강암의 특징을 보인다 (Didier, 1987; Downes *et al.*, 1990, 1991; Williamson *et al.*, 1992). 만약 하부지각에 분포하는 변성화성암이 흑운모화강암을 형성시킨 마그마의 근원암이라면 미량원소들을 이용한 판별도는 흑운모화강암이 형성 당시의 지구조적인 setting을 의미하는것이 아니라 변성화성암이 생성될 당시의 지구조적인 환경을 반영할것으로 사료된다. 특히 지질시대 동안 한반도에서 일어났던 수회의 화성활동중 U과 Pb의 배경값이 높고 저어콘을 이용한 U-Pb법 절대연령측정에서 지질연대가 등시선의 하단부에 수렴하는 화성암류중, Sr이 농집되고, 모드분석치가 섬록암, 화강섬록암과 토날라이트 영역에 해당하는 화성암류는 변성화성암의 재용융에 의한 분화산물일 가능성이 크며 이들은 암석지구화학적 순환 (recycling)를 반복적

으로 재현할 가능성이 있다. 연구지역에서 홍색장석화강암이 관입하기 전에 이미 활발한 화산활동이 전개되었고 층서적으로 홍색장석화강암이 화산암류를 관입하는 가장 젊은 암층인 것을 고려하면 홍색장석화강암은 호상열도 (volcanic arc)의 조건에서 플레이트내 (within plate)로 전환되는 지구조적인 환경하에서 관입하였을 가능성을 시사하나 이를 확인하기 위해서는 홍색장석화강암에 대한 암석지화학적 해석은 물론이고 먼저 형성된 화산암의 지화학적인 진화와 결부시켜 마그마를 연속적인 분화산물로 해석하는것이 필요하며 이와 관련된 연구가 수행되어야 할것이다.

결론

연구지역에 분포하는 화강암류에 대한 미량원소와 희토류원소에 이용한 지화학적 특징은 다음과 같다.

1. 연구지역의 흑운모화강암의 U-Pb 저어콘 절대연령은 등시선 하단부에 수렴하며 175 Ma로 주라기 중엽에 그리고 정장석을 이용하여 K-Ar법으로 측정된 홍색장석화강암의 절대연령은 93.6 ± 1.5 Ma로 백악기 중엽에 해당한다.
2. 연구지역의 화강암류에서 친석원소들은 흑운모화강암에서 분화가 진행에 거의 일치하는 거동을 보이나 홍색장석화강암은 Ca/Sr에서 정(+)의 상관관계를, 그리고 Ba/K와 Rb/K의 비는 다소 불규칙한 양상을 보인다. Rb-Sr-Ba의 삼각도에서 흑운모화강암은 화강섬록암이나 석영섬록암의 영역에, 홍색장석화강암은 분화가 잘 진행된 화강암 영역에 도시된다.
3. 친동원소는 흑운모화강암과 홍색장석화강암에서 모두 부화된 값을 보이나 철·마그네슘계열원소는 흑운모화강암에서 부화된 값을, 홍색장석화강암은 다소 결여된 함량 분포를 보인다.
4. 희토류원소의 거동에서 흑운모화강암과 홍색장석화강암은 LREE가 급격히 감소하나 HREE는 천천히 감소하다 다시 증가하는 경향을 보이며 Σ LREE/ Σ REE의 비는 흑운모화강암과 홍색장석화강암이 0.95와 0.88로 마그마 분화가 진행되는 동안 경희토류가 집중적으로 농집되는 분별작용을 받았다.
5. REE, Eu/Sm과 $[(La/Lu)_{CN}]$ 의 비는 흑운모화강암이 142.92 ppm, 0.24, 25.85로 Eu(-) 이상이 거의 없거나 적은 칼크 알칼리계열의 석영섬록암에서 화강섬록암의 범위, 홍색장석화강암은 209.86 ppm, 0.06, 7.42로 Eu(-) 이상이 현저한 몬조니화강암이나 섬장암질화강암의 영역에 속한다.

6. 마그마를 형성시킨 지구조적환경의 알아보기 위한 SiO₂와 미량원소를 이용한 판별도에서 흑운모화강암은 VAG나 syn-COLG 영역에 해당되거나 홍색장석화강암은 syn-COLG와 WPG 경계면에서 점이적인 변화를 보인다. 판별도에 점시된 흑운모화강암의 VAG + syn-COLG의 영역은 관입당시의 지구조적인 환경 보다는 하부지각에 분포하는 변성화강암류의 생성환경을 암시할 가능성이 크며 홍색장석화강암이 판별도의 경계면에서 보여준 점이적인 변화는 관입 이전에 활동했던 화산작용과 연관지어 해석하는 것이 타당하다고 사료된다.

사 사

본 연구는 1995년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

김상욱 (1972) 전라남도 해남안 일대의 백악기 화성활동에 관하여. 손치무교수 송수기념 논문집, p. 113-118.
 김옥준 (1971) 남한의 신기화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4권, p. 1-10.
 김옥준 (1975) 남한의 화강암류와 지각변동. 광산지질, 8권, p. 223-230.
 김용준, 박영석, 주승환, 오민수, 박재봉 (1990) 옥천지향사대 동남대에서의 화성활동(I); 진안-나주 사이를 중심으로. 한국지구과학회지, 11권, p. 120-138.
 김용준, 박영석, 주승환, 오민수, 박재봉 (1991) 옥천지향사대 동남대에서의 화성활동(III); (나주-남창지역을 중심으로). 한국지구과학회지, 11권, p. 120-138.
 김용준, 오민수, 박재봉 (1993) 나주-해남지역에 분포하는 화성암류의 암석화학. 한국지구과학회지, 14권, p. 300-315.
 김정민 (1990) 담양-진안 지역에 분포하는 심성화강암류에 대한 암석화학과의 성인. 전남대학교 박사학위 논문, 182p.
 김정민, 윤정환, 김정택, 박재봉, 강상원, 김동주 (1994) 월출산 지역에 분포하는 중생대 화강암류에 대한 암석화학적 연구. 자원환경지질, 27권, p. 375-382.
 김종환, 조한익, 고상모, 채수천, 신흥자, 이성록, 홍세선, 문희수, 김용준, 윤성효, Reedman, A.J. (1990) 화산원 천열수성 광상탐사 모델 정립(I). 한국동력자원연구소, p. 23-56.
 김종환, 고상모, 이동진, 박중재, 홍세선, 채수천, 이형재, 안기오, 서효준 (1992) 화산원 천열수성 광상탐사 모델 정립(III). 한국자원연구소, KR-92(T)-25, 209p.
 박홍봉, 권숙문, 박배영, 신상은 (1982) 고내화도 광석광물의 분포와 성인에 관한 연구. 대한광산학회지, 15권, p. 201-207.
 박홍봉, 박배영, 신상은, 허민 (1988) 전남과 하동지역에서 산출하는 요업 및 점토 광물자원과 성인에 관한 연구. 광산지질, 21권, p. 1-15.
 문희수, 정승우, 송윤구, 박영석 (1991) 전남 해남지역 해남 납석광상의 변질작용 및 생성환경. 광산지질, 24권, p. 83-96.
 문희수, 송윤구, (1992) 전남 해남지역 납석, 명반석 및 도석 광상의 분포, 광물조성 및 형성기구. 광산지질, 25권, p.

41-50.
 신상은, 박홍봉, 문희수 (1991) 전남지역에서 산출되는 열수성 카오린 광물의 안정정위원소 연구. 한국자원공학회지, 28권, p. 99-103.
 신인현 (1994) 해남-완도지역의 백악기 화강암류에 대한 암석화학적 연구. 전북대학교 박사학위논문, 171p.
 양우석 (1991) 월출산 지역에 분포하는 화성암류에 대한 암석화학적 연구. 전남대학교 교육대학원 석사학위논문, 45p.
 유장한 (1985) 전남 해남군 황산면 일대 고령토질 납석광상 연구. 비금속광상연구보고, 한국동력자원연구소, 84-15, p. 95-116.
 윤성효 (1990) 해남-목포일원의 백악기 화산활동에 관한 연구. 부산대학교 사대논문집, 21권, p. 275-290.
 이대성, 이하영 (1976) 한국 남서해안에 분포하는 함유질층에 대한 지질학적 및 지구화학적 연구. 광산지질, 9권, p. 45-74.
 이성록, 김문영 (1985) 해남 성산 광산물 터카이트에 관한 연구. 한국동력자원연구소, 비금속광상연구, 85-14, p. 117-127.
 전호택, 정영욱, 김인준 (1991) 경남 및 전남 일부 납석광상의 산소-황 동위원소의 조성과의 광상 성인. 광산지질, 24권, p. 97-105.
 주승환, 지세정 (1990) 광주 화강암의 Rb-Sr 연대측정연구(IV). 한국동력자원연구소 연구보고서, KR-90-1B-2, p. 3-54.
 차문성, 윤성효 (1988) 한반도의 화산암물구조 및 환상복합암체에 관한 연구. 지질학회지, 24(특별호), p. 67-86.
 Cho, H.K. and Kim, S.J. (1989) Mineralogy of alunite from the Sungsan mine. J. Miner. Soc. Korea., v. 2, p. 81-89.
 Cullers, R.L. and Graf, J.L. (1984) Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: intermediate and Silicic rocks-ore petrogenesis; in Henderson, P., rare earth elements geochemistry, Elsevier Sci. Pub. B. V., p. 275-316.
 Didier, J. (1987) Contribution of enclaves studies to the understanding of origin and evolution of granitic magmas. GEOL. RDSCH, 76, p. 41-50.
 Downes, H., Dupuy, C. and Leyreloup, A.F. (1990) Crustal evolution of the Hercynian belt of Western Europe: Evidence from lower crustal xenolith (French Massif Central). Chem. Geol., v. 83, p. 209-231.
 Downes, H., Kempton, P.D., Briot, D., Harmon, R.S. and Leyreloup, A.F. (1991) Pb- and O-isotope systematics in granulite facies xenolith, French Massif Central: Implications for crustal process. Earth Planet Sci. Lett., v. 102, p. 342-357.
 Henderson, P. (1984) Rare earth elements geochemistry. Elsevier Science Pub. Co. Inc., 510p.
 Irvine, T.N. and Barager, W.R.A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canada Jour. Earth, v. 8, p. 523-548.
 Kim, I.J. (1991) Geochemistry of Hydrothermal Alteration and Clay Deposits in the Haenam Area, Southwestern Korea. Ph. D. Thesis, Tokyo University, 238p.
 Maas, R., Kinny, P.D., Williams, I.S., Froude, D.O. and Compton, W. (1992) The Earth's oldest known crust: A chronological and geochemical study of 3900-4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia. Geochem. et Cosmochim. Acta, v. 56, p. 1281-1300.

- Mason, B. and Moore, C.B. (1982) Principles of geochemistry. Jhon Wiley and Sons, Inc., New York.
- Nakamura, Y. (1973) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochem. et Cosmochim. Acta.*, v. 38, p. 757-775.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace elements discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, v. 25, p. 956-983.
- Taylor, S.R. (1965) The application of trace elements data to problems petrology. *Physics and chemistry of the earth.* v. 6, p. 133-213.
- Turek, A. and Kim, C.B. (1995) U-Pb zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area, Ryongnam massif, Korea. *Geochem. J.*, v. 29, p. 243-258.
- Vinogradov, A.P. (1962) Average content of chemical elements in the major types of igneous rocks of the earth's crust. *Geochemistry*, v. 7, p. 641-664.
- Williamson, B.J., Downes, H. and Thirlwall, M.F. (1992) The relationship between crustal magmatic underplating and granite gneiss: an example from the Velay granite complex, Massif Central, France. *Earth Sci.*, v. 83, p. 235-245.

1996년 4월 9일 원고접수