

중부 옥천대에 분포하는 쥬라기 보은 화강섬록암의 암석화학과 마그마과정

좌 용 주

경상대학교 자연과학대학 지질학과

요 약 : 옥천대 내에서 옥천층군을 관입하고 있는 보은 화강섬록암은 그 화학적 성질이 과알루미나질이며, 칼크-알칼리 계열을 따르는 화강암류이다. 그리고 보은암체를 형성한 마그마가 생성되고 관입한 환경은 활동성 대륙 주변부일 가능성이 있다. 한편, 옥천대의 보은암체를 동시대의 경기육괴의 인제-홍천암체와 비교하면 보은암체 쪽이 인제-홍천암체 보다 성숙도가 낮은 대륙호의 환경에서 형성된 것임을 알 수 있다. 주 성분원소, 미량원소 및 희토류원소의 함량 변화에 있어서 결정분화를 지시하는 경향성이 결여되어 나타나는 것은 화강암류의 화학적 성질을 지배하는 마그마과정이 단순한 분별작용의 모델 만으로는 설명되지 않음을 나타낸다. 또한 보은 화강암체를 형성시킨 마그마과정에 대해서 레일리 분별 및 주성분원소 함량변화에 따른 분별과정을 모델 계산을 통해 검토해 보았으나, 어느 것도 보은암체의 지구화학적 경향성을 효과적으로 설명해 주지 않는다. 반면, 결정작용과 동시성 혼연작용(AFC)에 대한 모델 계산에서는 보은 화강섬록암을 형성시킨 화강암질 마그마는 옥천층군을 관입하기 이전에 퇴적기원의 지각물질과의 혼연과정을 거쳤을 가능성이 제기되고, 그 때의 조건으로는 혼연되는 주변암석의 성분과 마그마의 성분이 유사하고 또한 혼연작용의 속도가 결정작용의 속도와 비슷하며 혼연되는 질량은 마그마 전체 질량의 10% 내외인 경우이다. 한편, 분별과정과 AFC 모델 계산의 결과는 규장질암맥이 보은 화강섬록암으로부터 파생된 것이 아니라 다른 성인의 마그마로부터 유래되었을 가능성을 제시한다.

핵심어 : 보은 화강섬록암, 규장질암맥, 분별과정, 혼연과정, AFC

서 론

옥천대 중부 지역에는 후기 고생대로부터 백악기에 걸쳐 관입한 화강암체가 넓게 분포하고 있다. 이들 중 보은 화강암체는 그 K-Ar 혹은 Rb-Sr 연대(166 Ma)로부터 쥬라기 심성암체로 알려져 왔으며(김옥준, 1971), 대보조산운동의 후구조운동기에 관입한 암체로 규정된 바 있다(Lee, 1971). 최근에 발표된 보은 화강암체의 연대로는 K-Ar 혹은 Rb-Sr 연대가 153-155 Ma로 쥬라기를 나타내지만(좌용주 외, 1995), Rb-Sr 전암연대는 170 Ma(좌용주 외, 1995)와 230 Ma(정창식과 장호완, 1996)로 쥬라기 또는 삼첩기를 나타낸다. 보은 화강암체에 대한 연구사례는 드물지만, Cho *et al.*(1994)에 의한 광물학적 및 암석기재적 연구, 정창식과 장호완(1996)에 의한 암석화학 및 동위원소 지구화학에 의한 연구 등이 수행되었다. 보은 화강암체 주변지역에 대해서는 보은 화강암체의 관입을 받은 변성퇴적층의 열변성작용에 대해 이대성과 박종심(1981)의 연구가 있으며, 권성택과 이동호

(1992)는 보은지역의 변성염기성암(각섬암)에 대한 암석지구화학적 연구에 대해 보고하였다.

이 논문에서는 보은 화강암체에 대해 주성분원소, 미량원소 및 희토류원소를 대상으로 암석지구화학적 특징을 살펴보고, 화강암질 마그마의 진화 및 생성 지체구조적 특징 등을 고찰하였다. 또한 화강암체를 형성시킨 화강암질 마그마과정을 분별과정과 혼연과정의 모델들을 통해 검토해 보았다. 미량원소와 희토류 원소에 있어 원소들의 상대적인 함량변화는 마그마과정을 살피는 좋은 지시자가 될 수 있다(McCarthy and Hasty, 1976; Allegre and Minster, 1978). 따라서 이 원소들의 함량변화와 분별과정 및 혼연과정에 대한 수식적 모델링의 결과를 상호비교하여 보은 화강암체를 형성시킨 마그마과정을 고찰하였다.

일반 지질

보은지역에는 화강암류가 옥천층군을 관입하고 있는데, 옥천층군은 주로 고생대 초기의 변성퇴적암류

로 알려져 있다(Fig. 1). 이 지역의 옥천층군은 주로 천매암, 편암, 각섬암 및 석회암으로 구성되며, 녹색 편암상의 광역 변성작용을 받았고(Kim, 1971), 고생대 후기 혹은 중생대 초기에 강한 변형작용을 받았다(Cluzel *et al.*, 1990; Otoh *et al.*, 1990).

보은지역 주변의 각섬암에 대한 성인과 연대는 아직 미해결인 부분이지만, 잔존 화성조직을 갖는 변성염기성암으로 간주될 수 있다. 이 변성염기성암은 주

성분과 미량성분 지구화학으로부터 판 내부 환경에서 형성된 변이질-솔레아이트질 현무암의 성질을 지닌다(권성택과 이동호, 1992).

보은 화강암체는 이 지역에서 저반상으로 분포한다. 모드조성으로는 화강섬록암에 속하며, 티탄철석계열에 속한다(Cho *et al.*, 1994). 보은암체는 동부에서는 석회암층에 거의 평행하게 관입했으나 북부 내지 북동부에서는 거의 직각으로 옥천층군을 관입하고 있다. 옥천층군과 보은 화강암체의 직접적인 관입경계는 야외에서 관찰되지 않으며, 보은암체 내부에는 변성퇴적암류의 포획체가 발견되지 않는다. 관입을 받은 옥천층군의 변성퇴적암류는 휘석 내지 각섬석혼펠스화되어 있어, 보은 화강암체의 관입 당시의 접촉열변성작용이 매우 현저했음을 알 수 있으며(이대성과 박종심, 1981), 이 과정을 통해 화강암체는 비교적 빨리 냉각했을 것으로 생각된다. 암체의 서부 지역에는 화강암류가 변형을 받아 미약하나마 엽리구조가 발달해 있다. 백운모를 포함하는 규장질암맥(폭수 십 cm 정도)이 암체 곳곳을 관입하고 있는데, 화강섬록암과의 경계는 점이적이며, 이러한 산출양상으로부터 이 규장질암맥이 보은 화강암체로부터 형성된 *in situ* 분화산물일 가능성이 지적되었다(Cho *et al.*, 1994). 한편, 반화강암질 암맥 및 염기성 암맥들도 역시 화강암체의 곳곳에 관입해 있는데, 그 관입경계는 매우 뚜렷하고 암상에서도 위의 규장질암맥과는 다르며, 규장질암맥보다도 후기의 관입으로 생각된다.

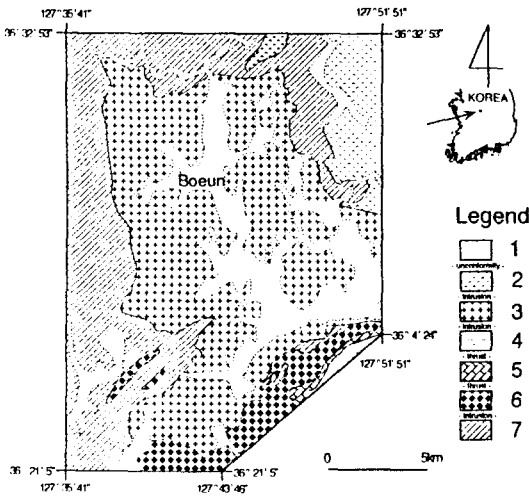


Fig. 1. Geologic map of the Boeun area. 1, Alluvium; 2, Cretaceous Sogrisan granites; 3, Jurassic Boeun granodiorite; 4, Late Paleozoic Pyeongan Supergroup; 5, Early Paleozoic Joseon Supergroup; 6, Age-unkwon amphibolites; 7, Early Paleozoic Ogcheon Group.

Table 1. Map locations of the samples used in this study

Sample No.	Rock Type	Sheet Name(1:50,000)	National Grid	Location(gun/myeon/ri)
J0209A	granodiorite	Boeun	262.5/325.5	Ogcheon/Annae/Banghamong
J0706A	granodiorite	Boeun	263.0/329.5	Boeun/Suhan/Balsan
J0713	granodiorite	Boeun	261.6/325.8	Boeun/Suhan/Gwangchon
J0715	granodiorite	Boeun	262.3/326.4	Boeun/Suhan/Museo
J0801	granodiorite	Boeun	262.2/330.2	Boeun/Suhan/Gyoam
J1715	granodiorite	Boeun	260.1/330.4	Boeun/Suhan/Dongjeong
J1716	granodiorite	Boeun	260.0/330.6	Boeun/Suhan/Dongjeong
J1718	granodiorite	Boeun	260.3/331.1	Boeun/Suhan/Byeongwon
J1719	granodiorite	Boeun	261.1/331.3	Boeun/Suhan/Byeongwon
J1720A	granodiorite	Boeun	261.7/331.0	Boeun/Suhan/Hupyeong
J1721	granodiorite	Boeun	261.7/331.6	Boeun/Suhan/Byeongwon
J0209B	felsic dyke	Boeun	262.5/325.5	Ogchoen/Annae/Banghamog
J0716B	felsic dyke	Boeun	263.0/329.5	Boeun/Suhan/Balsan

연구지역의 북동부에는 백악기 속리산 화강암류가 육천층군과 보은암체를 관입하고 있다(Fig. 1). 이 백악기 화강암류는 주로 화강 반암이며, 반정의 집합과 색에 따라 열린 회색 화강 반암, 핑크색 석영 장식 반암 및 암회색 규장암(felsite)으로 세분된다.

암석화학적 특징

주성분원소 지구화학

주성분과 미량성분 원소들에 대한 화학분석은

Table 2. Major, trace and rare earth elements compositions of the Boeun granitic rocks

	granodiorite										felsic dyke		
	J0209A	J0706A	J0713	J0175	J0801	J1715	J1716	J1718	J1719	J1720	J1721	J0209B	J0716B
Major oxides ⁺													
SiO ₂	67.80	72.19	69.50	66.00	70.34	69.00	65.30	66.50	68.39	68.80	68.90	74.30	74.80
TiO ₂	0.31	0.18	0.30	0.37	0.33	0.40	0.62	0.55	0.53	0.40	0.40	0.06	0.04
Al ₂ O ₃	15.90	14.24	15.10	16.10	14.56	15.10	15.80	15.60	15.30	15.40	15.10	13.70	12.90
Fe ₂ O ₃ *	2.72	1.32	2.52	3.33	1.96	2.73	3.36	3.46	3.05	2.37	2.46	0.58	0.35
MnO	0.06	0.03	0.07	0.08	0.04	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.02	0.02
MgO	0.70	0.33	0.61	0.81	0.49	0.67	0.94	1.00	0.88	0.55	0.56	0.06	0.02
CaO	2.09	2.26	2.33	2.42	1.87	2.54	2.95	2.83	2.83	2.39	2.30	0.62	0.20
Na ₂ O	3.85	4.47	4.00	4.58	4.52	3.98	4.39	3.97	4.89	3.98	3.94	4.97	4.48
K ₂ O	4.63	2.78	3.93	4.38	3.95	3.71	3.75	4.15	3.25	4.28	4.15	4.02	5.60
P ₂ O ₅	0.12	0.06	0.10	0.14	0.09	0.11	0.18	0.17	0.17	0.13	0.13	0.07	0.00
ig.loss	0.77	0.69	0.80	0.86	0.6	0.80	0.90	0.77	0.50	0.80	1.24	0.78	0.46
Total	99.05	98.55	99.25	99.07	98.82	99.10	98.25	99.05	99.83	99.15	99.22	99.18	98.86
Trace elements ⁺													
Rb	167	107	149	155	159	176	170	129	119	152	156	215	252
Sr	263	413	281	337	391	303	522	504	521	448	425	15.4	29.2
Ba	609	285	616	775	737	547	962	822	759	939	941	21.4	29.5
Y	14.1	4	12.2	13.6	8.7	12.5	14	8.8	12.6	9.2	9.3	19.4	9.9
Nb	15	6.7	14.9	15.5	10.3	15.5	14.3	11.2	11.4	13.1	13.6	20.6	15.4
Th	10.7	5.3	11.5	12.1	14.8	12.7	11.5	8.8	9.1	12.5	14.7	3	19.4
Zr	119	88	108	129	145	131	151	138	145	152	164	43.1	54.2
Cs	12.5		15.8	17	5.5	14.5	15.9	13.4	5.5	12	14.1	10.7	11.2
Ga	22.7		20.8	23.3	20.4	24.1	24.1	23.1	20	24.4	24.8	24	26.6
Pb	35.1		32.1	30.7	29.9	41.2	37.2	31.3	23.7	31.1	33.5	32.9	53.3
U	8.6		4.7	4.5	3	4.9	5	3.4	3	4.2	6.3	33	16.4
Hf	7.8		8.1	8.1	6.9	8.3	7.7	8.1	6.2	7.5	7.7	8.3	8.1
Rare earth elements ⁺⁺													
La	19.5	10.8	16.9	24.2	23.8	19.6	22.8	21.4	24.9	26.1	22.3	0.885	1.5
Ce	38.6	18.4	32.1	43.8	47.1	39.8	42.7	40.5	46.3	49.9	46	2.74	5.86
Nd	15.8	8.6	13	16.5	18.5	15.4	16.8	16.2	21.6	19.6	19	1.2	2.94
Sm	3.77	1.57	3.23	3.91	3.51	3.67	4.04	3.81	3.98	3.78	3.95	0.575	0.791
Eu	0.608	0.659	0.522	0.628	0.739	0.562	0.562	0.622	0.964	0.715	0.649	0.018	0.066
Gd	3.41	1.24	2.85	3.2	2.4	3.25	3.51	3.33	3.04	3.04	3.09	1.08	1.28
Dy	1.68	0.73	1.49	1.51	1.24	1.33	1.21	0.959	1.85	1.07	1.13	1.81	0.995
Yb	0.7	0.312	0.702	0.696	0.343	0.539	0.566	0.393	0.547	0.336	0.346	2	0.678

*, total Fe as Fe₂O₃; +, analyzed by XRF method; ++, analyzed by ICP-AES method

XRF법으로 수행되었고, 희토류원소에 대해서는 ICP 분광법으로 수행되었으며, 이 화학분석은 프랑스의 Ecole des Mines의 지질학과에서 수행되었다. 화학분석에 사용된 시료의 좌표를 Table 1에, 화학분석의 결과를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2는 SiO₂ 함량에 대한 주성분 산화물의 함량 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 Na₂O, Na₂O+

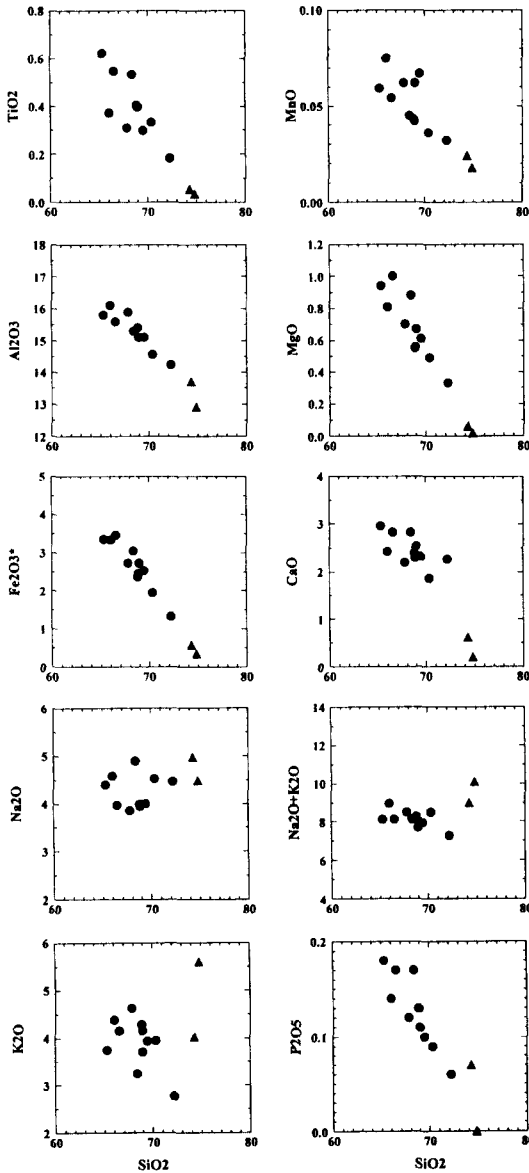


Fig. 2. Major oxides versus SiO₂ variation diagrams. Symbols : filled circle, granodiorite; filled triangle, felsic dyke.

K₂O를 제외한 산화물들은 SiO₂가 증가함에 따라 그 양이 대체적으로 감소함을 알 수 있다. 만일 SiO₂ 함량을 분화지수로 삼는다면, SiO₂ 함량의 증가에 따른 산화물의 점진적인 변화는 이 화강암류들이 점차 결정분화되어 생성된 산물임을 의미할 수 있을 것이다. 그러나 자세히 보면, 보은 화강섬록암의 주성분원소 함량의 변화는 결정분화를 지시할 정도의 직선적인 양상을 나타내지는 않는다. 특히 화강암류의 분화에서는 분화의 진행에 따라 K₂O의 함량이 증가하는 것이 일반적이지만, 보은암체의 경우 그 함량이 감소하는 것은 매우 특징적인 현상이다. 주성분원소의 변화에서 마그마과정을 예측하기란 그리 쉽지 않지만, Fig. 2의 변화 양상으로부터 결정분화 이외의 마그마 과정이 관여했을 가능성을 배제할 수 없다. 한편, 백운모를 포함하는 규장질암맥에서 산화물의 변화 양

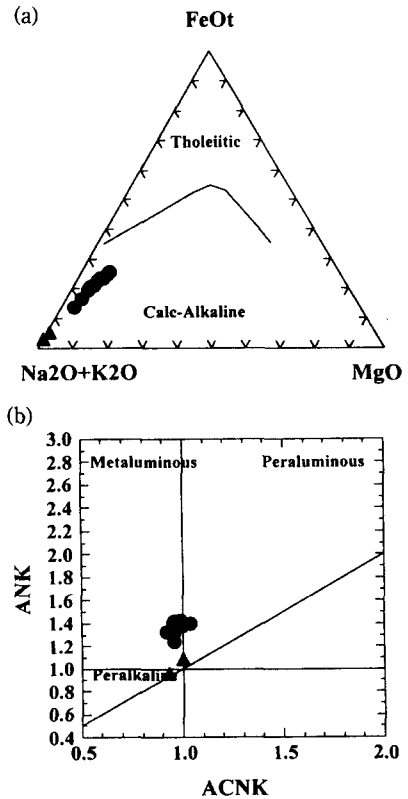


Fig. 3. Discrimination diagrams. (a) AFM(alkali-total iron-MgO) diagram. (b) Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O) versus Al₂O₃/(Na₂O+K₂O) molar ratio variation diagram. Symbols are the same as Fig. 2.

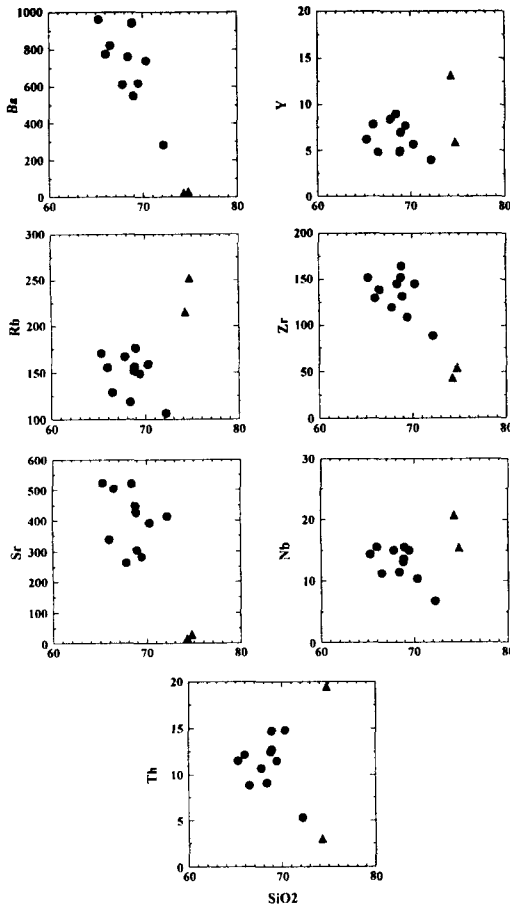


Fig. 4. Trace element versus SiO₂ variation diagrams. Symbols are the same as Fig. 2.

상은 이 암맥이 매우 분화된 화강암질 마그마로부터 형성된 것임을 시사하지만, 보은암체의 분화산물인지 z는 확실하지 않다.

AFM(alkali-total Fe-MgO) 그림에서 보은 화강섬록암과 규장질암맥은 칼크-알칼리 경향을 보여준다 (Fig. 3a). 전암 주성분원소의 함량으로부터 화강섬록암은 과알루미나질(metaluminous)이고, Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)의 몰비가 1.1보다 낮은 것으로 보아 I-타입의 화강암류에 속함을 알 수 있다(Fig. 3b).

미량원소 및 희토류원소 지구화학

Fig. 4와 Fig. 5는 SiO₂ 함량에 대한 미량성분 및 희토류 원소의 함량 변화를 나타낸 그림들이다. SiO₂ 함

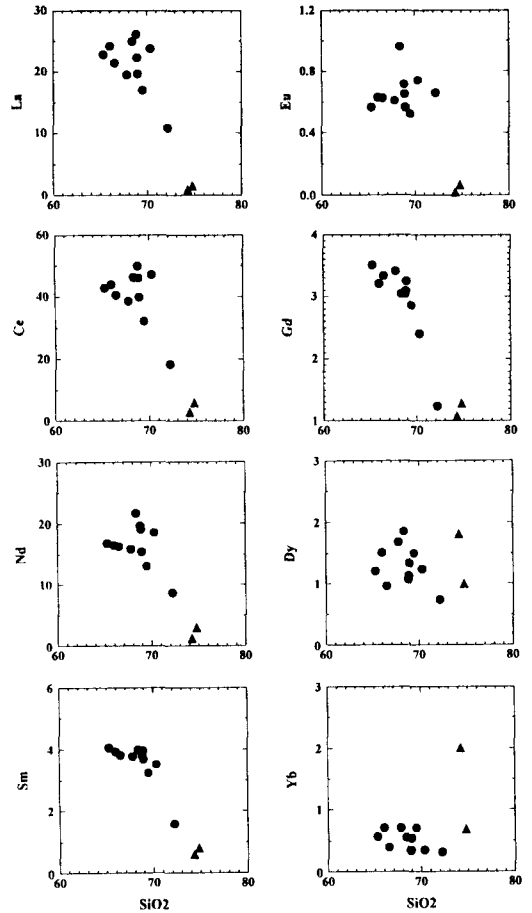


Fig. 5. Rare earth element versus SiO₂ variation diagrams. Symbols are the same as Fig. 2.

량 68~71%를 전후하여 미량 및 희토류 원소 함량의 분산이 상당히 심하기 때문에 일반적인 변화 경향을 알기 힘들다. 만일 이 화강섬록암이 결정분화로 분화된 산물이라면, 결정분화를 지시하는 몇몇 원소들(예를 들어 Rb, Sr, Zr 등)은 분화에 따라 직선적인 경향을 나타낼 것이지만, Fig. 4의 경향은 그렇지 않다. 주성분원소의 K₂O와 마찬가지로 Rb의 함량은 분화에 따라 증가하는 것이 일반적이지만 오히려 감소하는 듯한 경향을 나타낸다. 이 사실은 보은암체를 형성시킨 마그마과정을 단순한 결정분화만으로 설명할 수 없음을 지시한다. 한편 규장질암맥의 변화경향에서는 보은암체의 변화경향과의 연속성이 결여되어 있기 때문에, Cho *et al.*(1994)가 지적한 보은암체의 *in situ* 분화산물로 볼 수 있을지의 의문이 제기된다.

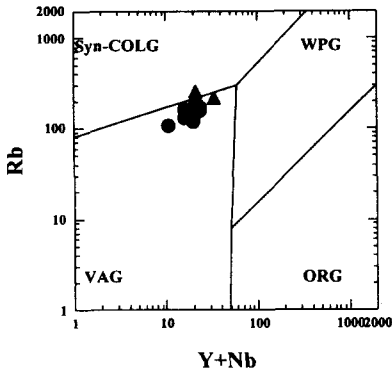


Fig. 6. Rb versus Y+Nb relationship indicating tectonic discrimination. Abbreviations : syn-COLG, syn-collisional granite; VAG, volcanic-arc granite; WPG, within plate granite; ORG, oceanic-ridge granite. Symbols are the same as Fig. 2.

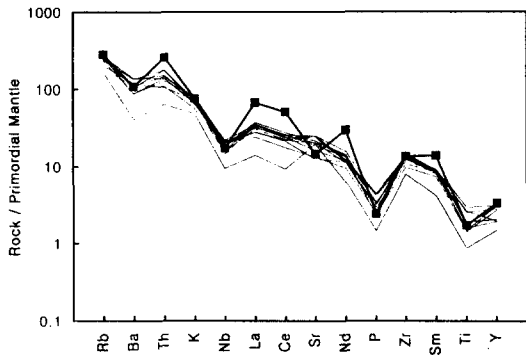


Fig. 7. Elemental spider patterns. Thick solid line with filled square represents an average pattern of the Inje-Hongcheon granodiorite.

희토류원소 함량을 콘드라이트로 표준화시킨 REE 패턴(Fig. 10a)을 보면, 한 시료(J0706A)를 제외하고는 약한 Eu의 음의 이상값을 보이는 유사한 패턴을 보인다. 규장질암맥은 화강섬록암에 비해 강한 Eu의 음의 이상값을 보이고, 보다 낮은 LREE/HREE의 비를 가진다.

미량원소를 이용하면 화강암질 마그마가 관입한 지체구조적 특징을 어느 정도 추정할 수 있다(Pearce *et al.*, 1984). Fig. 6에서 보은암체를 형성시킨 화강암질 마그마가 관입한 환경이 화산호(volcanic arc)의 환경임을 알 수 있다. 이 환경에 속하는 것으로서는 일반적인 도호(island-arc), 활동성 육호(active continental arc), 혹은 활동성 대륙 주변

부(active continental margin) 등일 수 있는데, 이 중에서 후자의 두 가지 경우가 옥천대 중부 지역에 분포하는 주라기 화강암의 관입 환경으로 유추될 수 있다(Jwa *et al.*, 1994).

Fig. 7은 미량성분의 함량 변화를 초기 맨틀조성(Sun and McDonough, 1989)으로 규정화시킨 그림으로써, 보은암체의 암석화학적 성질을 타 암체와 비교해 볼 수 있는 그림이다. 이 그림에서는 동일 시기, 즉 주라기의 광물 냉각 연대를 가지는, 경기육괴의 인제-홍천 화강암체(Jwa and Moutte, 1990)와의 비교가 나타나 있다. 보은 화강섬록암이 인제-홍천 화강섬록암의 평균값보다 Rb, Th, K, La, Ce, Nd, Zr, Sm, Y 등의 함량에서 낮고, Ba, Nb, Sr, P, Ti 등의 함량에서 높게 나타난다. Brown *et al.* (1984)이 제시한 호의 성숙도(arc maturity)를 고려하면, 보은암체 쪽이 인제-홍천의 화강섬록암체 보다 성숙도가 낮은 대륙호의 환경에서 형성된 것임을 알 수 있다. 지체구조의 설정에 정량적인 자료가 아직은 없지만, 위와 같은 경향은 화성활동의 진행이 주라기 혹은 트라이아스기 말기에 옥천대에서 경기육괴 쪽으로 진행되었을 가능성을 시사해주는 것이라 하겠다(Jwa *et al.*, 1994).

보은암체 형성의 마그마과정

SiO₂에 대한 주성분원소, 미량성분 및 희토류성분의 분산된 변화경향은 보은암체를 형성시킨 화강암질 마그마의 마그마과정이 단순하지 않았음을 지시한다(Figs. 2, 4, 5). 이 문제를 밝히기 위해 보은 화강암체의 형성과 연관된 마그마 과정의 가능성들을 살펴보고자 한다. 마그마의 화학적 진화는 여러가지 다양한 과정-용해작용, 결정작용, 혼합작용, 혼염작용 등으로 설명된다. 마그마과정은 주성분원소의 변화 경향에서는 구체적으로 파악하기가 어렵기 때문에 주로 미량성분과 희토류성분을 이용한 고찰이 실시된다(예: McCarthy and Hasty, 1976; Allegre and Minster, 1978).

단순 결정분화과정 모델

마그마과정 중에서 결정분화작용은 점진적으로 분화하는 마그마를 설명하기에 매우 유용하다. 따라서

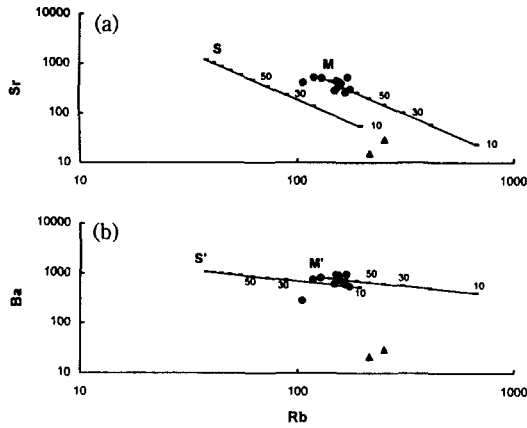


Fig. 8. Relative elemental relationships and model calculation for Rayleigh fractionation. (a) Rb versus Sr diagram. (b) Rb versus Ba diagram. Sample J1718 was assumed as the initial magma composition. The lines starting from M and M' indicate the compositional variations of the melt remaining, whereas the lines from S and S' represent of the instantaneous solid phase removing from the magma. Tick markers and numbers represent the fraction of melt remaining. Symbols are the same as Fig. 2.

보은 화강암체의 형성과정을 살피기 위해 우선 간단한 레일리 분별 모델(Rayleigh, 1896)을 조사해 보기로 한다. Fig. 8은 Rb과 Sr, Rb과 Ba 사이의 상대적인 함량 관계를 나타내고 있다. 만일 화강암질 마그마의 분화과정이 단순한 결정분별작용이라고 한다면, Sr과 Ba의 함량은 Rb 함량이 증가함에 따라 감소해야 할 것이다. 만일 보은암체 중 암상에 있어 가장 고철질(mafic)인 시료(J1718)를 초기 마그마 조성으로 잡는다면, 마그마로부터 연속적으로 분별되는 고상의 무게 백분율은 각각 석영 33.0, K-장석 6.2, 사장석 47.1, 흑운모 12.3, 인회석 0.5, 스펀 0.5, 그리고 불투명 산화광물 0.4%가 된다(조원식(1992)로부터 재계산). 레일리 분별에 대한 계산 결과는 Fig. 8에 나타나 있으며, 계산에 사용된 분배계수는 Table 3에 나타내었다. 한편, 보은암체의 각 시료에 대해 계산된 Sr, Ba, Rb에 대한 전암분배계수는 그 범위가 각각 1.8~2.8, 1.2~2.3, 0.2~0.4이다.

M과 M'로 시작되는 선들은 잔존하게 되는 액의 조성 변화를 나타내고, S와 S'로 시작되는 선들은 순간적으로 분별되는 광물에서의 조성 변화를 나타낸다. 만일 보은암체의 화강암질 암석들이 레일리 분별과 같은 단

Table 3. Crystal/liquid distribution coefficients used in this study

	quartz	K-feldspar	plagioclase	biotite	apatite	sphene	opaques
Rb	0.001	0.036	0.034	2.2	-	-	-
Sr	0.001	3.9	4.4	0.12	-	-	-
Ba	0.001	5.0	0.033	8.0	-	-	-
La	0.001	0.04	0.32	0.037	25	50	0.5
Ce	0.001	0.04	0.24	0.037	31	53.3	0.6
Nd	0.001	0.03	0.19	0.29	50	88.3	0.9
Sm	0.001	0.02	0.13	0.058	54	102	0.9
Eu	0.001	1.13	2.0	0.15	27	101	0.6
Gd	0.001	0.011	0.16	0.28	22	102	0.8
Dy	0.001	0.006	0.13	0.29	42	80.6	0.4
Yb	0.001	0.012	0.08	0.44	21	37.4	0.4

Data : Arth (1976), Albuquerque (1977), Condie (1978), Cullers et al. (1981), Henderson (1984)

순한 결정 분별의 결과로 생긴 산물이라면, 화강암질 암석에서의 Rb에 대한 Sr과 Ba의 조성 변화는 M과 M'의 선들을 따를 것으로 예상된다. Rb과 Sr의 관계에서(Fig. 8a), 보은 화강섬록암은 선 M 주위에 분산되어 결정분화가 주된 마그마과정인지 의심스럽다. 또한 Rb과 Ba의 관계에서도(Fig. 8b), 화강섬록암이 선 M'을 따르는 체계적인 변화를 전혀 보여주지 않는다. 한편, 비록 화강섬록암의 조성 분포가 M과 M'을 따르지 않더라도 두 선 M과 S 및 M'와 S'로 만들어지는 사변형 내에 위치하게 되면, 부분적 분별과정이 된다. 즉, 분화되어 나가는 화강암질 마그마의 조성이 결정들의 완전한 분별이 일어나지 않음으로 말미암아 영향을 받을 수 있음을 의미한다. 이러한 부분적 분별에 대한 검토는 우리나라 백악기 화강암류에 대한 Tsusue *et al.*(1986)의 연구에서 보고된 바 있다. 그러나 보은 화강암체의 경우 Rb과 Sr의 관계에서는 부분적 분별이 인정되지만, Rb과 Ba의 관계에서는 부정된다.

한편, 규장질암맥이 화강섬록암의 자체 분화산물로 간주될 수 있는가를 살펴보자. Fig. 8에서 보는 바와 같이 규장질암맥은 단순한 레일리 분별로도, 부분적 분별과정으로도 설명되지 않는다. 따라서 Fig. 8에서 나타난 레일리 분별 모델에 의한 계산 결과로부터는 규장질암맥은 보은 화강섬록암을 만든 마그마에서 분화된 것이 아니라는 결론이다.

REE 패턴에 있어서 레일리 분별은 Fig. 10b처럼 나타난다. 위에서와 마찬가지로 레일리 분별 만으로 화강섬록암과 규장질암맥의 패턴을 효과적으로 설명할 수 없다.

주성분원소의 함량변화에 따른 결정분화작용 모델

폐쇄계에 대한 분별정출과정에 대한 모델을 가정 하면서, Christoph(1990)는 주성분원소가 일정하게 고정되어 있는 경우(레일리 모델)와 대조적으로 주 성분원소 함량의 변화에 따른 미량원소 거동에 대한 효과를 제안했다. 그에 의해 제안된 보다 일반적인 수식적 형태는 아래와 같다:

$$\ln \frac{X_i}{X_{i0}} = (D_{i0} - 1) \ln F + c \cdot c \cdot (\ln F)^2 \quad (1)$$

여기서 X_i , X_{i0} , D_{i0} , F , 및 c 는 각각 미량원소 i 의 함량, 미량원소 i 의 초기 함량, 초기 전암분배계수, 잔액의 비율, 및 상수이다. (1)식에서 만일 상수 c 가 0의 값을 가지면, 이 식은 바로 레일리 분별의 식이 되는 것이다. 결국 Christoph의 식은 오른쪽 두번째 항이 변화하는 주성분원소 함량의 효과를 나타내는 것이 되고, 상수의 값과 잔액의 비율에 따라 초기함량에 대한 미량원소 i 의 함량이 영향을 받게 된다. $(\ln F)^2$ 의 값은 분화가 진행할 수록 양의 부호를 가지고 커지게 되므로 결국 (1)식에서 미량원소의 함량은 상수 c 의 부호와 크기에 따라 작게 혹은 크게 변화하게 된다.

Christoph의 식은 위에서 본 바와 같이 단순한 레일리 분별 모델 보다는 보다 복잡한 과정을 내포하고 있다. 여기서 보은암체를 구성하는 화강섬록암과 규장질 암맥에서 주성분원소 함량의 변화가 미량원소의 거동에 미치는 영향을 이 모델이 어떻게 설명할 수 있는지에 대해서 알아보자. Fig. 9는 Christoph에 의해 제안된 상기 (1)식에 대해 Rb, Sr, 및 Ba에 대해 J1718의 시료를 초기 마그마조성으로 잡아 모델 계산을 한 결과이다. 여기서 상수 c 의 값은 +0.5, 0, -0.1, -0.2, -0.5, -1.0의 6가지 경우를 고려하였다. 단, 위에서 언급한 바와 같이 $c=0$ 인 경우는 레일리 분별 모델의 결과와 동일하다.

Rb-Sr의 관계(Fig. 9a)와 Rb-Ba의 관계(Fig. 9b)에

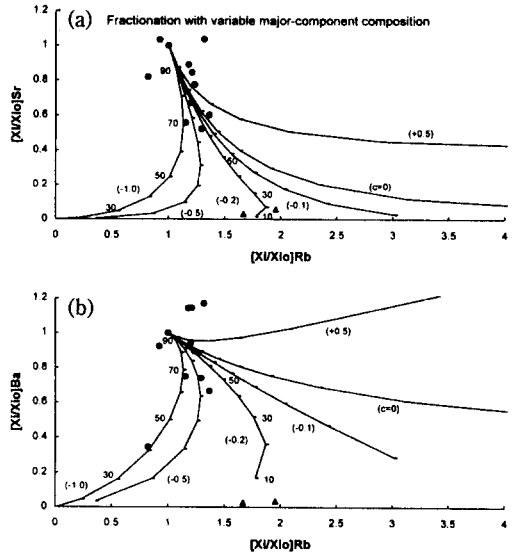


Fig. 9. Model calculation for fractionation with variable major-component composition based on Christoph(1990). (a) Rb and Sr relationship. (b) Rb and Ba relationship. Each abscissa and ordinate represents an elemental ratio of rock/initial magma. As Fig. 8 sample J1718 was assumed as the initial magma composition. For the constant c in Christoph's equation (1), six values were considered. Tick markers and numbers represent the fraction of melt remaining. Symbols are the same as Fig. 2.

서 보은 화강섬록암은 어떠한 상수값에 대해서도 Christoph가 제안한 분별모델을 만족하지 않는다. 오히려 Fig. 8에서 살펴본 레일리 분별보다 훨씬 분산이 심하게 나타난다. 다만 이 모델로 계산된 REE 패턴(Fig. 10c)에서는 이 모델이 레일리 분별보다 화강섬록암과 규장질암맥의 패턴에 약간 유사하다는 정도이다.

Christoph의 모델을 만족하지 않는 이유로는 보은 암체를 만든 화강암질 마그마의 과정이 레일리 분별과 마찬가지로 분별결정작용 만으로 이루어지는 않았다는 것을 들 수 있다. 또한 Christoph 모델의 기본 조건이 폐쇄계의 조건이 보은암체의 경우 만족되지 못했기 때문일 것이다. 즉, 마그마계의 내부에 외부에서의 영향이 부가되었을 가능성이 있고, 이를 검토하기 위해서 혼염작용의 영향을 살펴보았다.

결정작용과 동시성 혼염작용

화강암질 마그마과정에서 결정작용과 동시성 혼염

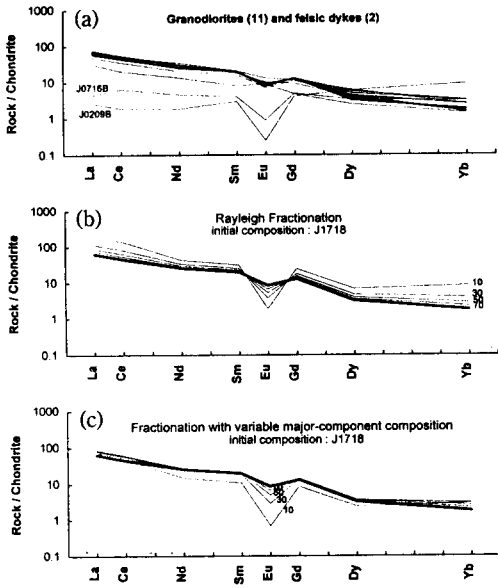


Fig. 10. Rare earth element(REE) patterns. (a) Patterns for the Boeun granodiorite(11 samples) and felsic dyke(2 samples). (b) Model calculations for the Rayleigh fractionation. (c) Model calculations for the fractionation with variable major-component composition based on Christoph(1990). For the calculations of (b) and (c), sample J1718 was assumed as the initial magma composition. Numbers in (b) and (c) represent the fraction of melt remaining.

작용(AFC, concurrent assimilation and fractional crystallization)은 Allegre and Minster(1978)가 기초한 모델 위에 Taylor(1980)와 DePaolo(1981)가 제안한 모델로, 주로 화산암질 마그마의 상승과정 중에 일어나는 혼염과정을 다룬 것이다. 이 모델을 화강암질 마그마에 구체적으로 도입한 사례는 Jwa(1991)에서 찾아볼 수 있다. 이 모델의 이론적인 배경과 계산 방법 등은 Jwa(1991)의 논문을 인용하고 여기서는 생략하기로 한다.

Fig. 11은 AFC의 모델계산에 의한 결과이다. 횡축은 각 원소의 전암분배계수(bulk distribution coefficient, D)를, 종축(Cm/C^0m)은 각 원소의 초기 마그마 조성(시료 J1718)에 대한 화강섬록암과 규장질암맥의 함량비를 나타낸다. 화강섬록암의 경우 전암분배계수의 값에 거의 무관하게 원소비(Cm/C^0m)의 값이 1인 부근에 대체적으로 도시되며, 규장질암맥은 전암분배계수가 증가함에 따라 매우 급격하게 원소비가 감소한다. 원소비의 값이 1에 근접하는 것은 분화가

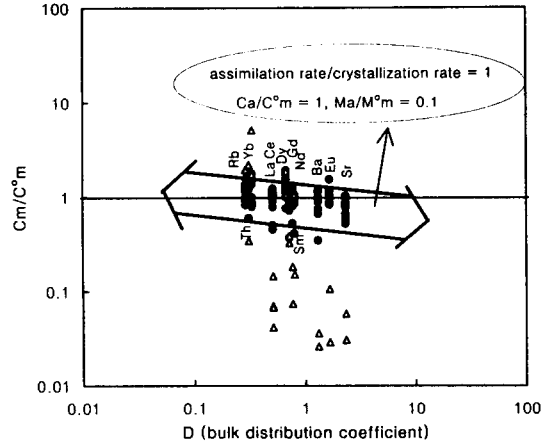


Fig. 11. Cm/C^0m versus bulk distribution coefficient(D) for the Boeun granodiorite and felsic dyke. Sample J1718 was assumed as the initial magma composition. The ordinate Cm/C^0m indicates a compositional ratio of rock/initial magma for each element. Area of arrow represents the variation range of the trace and rare earth elements with assimilation-fractional crystallization(AFC) in the granodiorite. Comparing the simulation results by Jwa(1991), the best fitting condition for the granodiorite suggests that composition of assimilated wallrock is similar to that of primary magma, assimilating rate is similar to crystallizing rate, and mass of assimilated wallrock is about 10% of that of the magma. Symbols: filled circle, granodiorite; open triangle, felsic dyke.

진행되더라도 잔존 마그마 내의 원소함량은 초기 마그마조성과 비슷한 채로 남아 있음을 가리킨다. 화강섬록암의 경우 전암분배계수가 1보다 큰 호정적 원소의 경우 원소비가 1보다 약간 낮고, 1보다 작은 불호정적 원소의 경우 원소비 1보다 약간 높은 정도이다.

화강섬록암에서 보이는 전암분배계수에 대한 원소비의 변화경향은 Jwa(1991)의 계산 결과들과 비교하면, 혼염되는 주변암석의 성분(Ca)과 마그마의 성분(C^0m)이 유사하고 또한 혼염작용의 속도가 결정작용의 속도와 비슷하며 혼염되는 질량(Ma)은 마그마 전체 질량(Mom)의 10% 내외인 경우의 계산 결과(Fig. 11의 화살표 영역)와 비교적 잘 일치한다. 만약 혼염작용보다 결정작용의 속도가 크다면 $D > 1$ 인 원소들의 감소가 현저해 지며, 혼염작용의 속도가 매우 커지게 되면 단순 혼합과정(횡축과 평행한 직선)과 유사하게 된다. 또 혼염되는 주변암석의 질량과 성분이 마그마의 그것들보다 클수록 Fig. 11의 화살표 영역은 위로 이동하게 되며, 그 역의 경우는 레일리분

별과 유사하여 $D>1$ 의 화살표 영역이 아래로 급강하하는 경향을 보이게 된다.

모델링의 결과, 보은 화강섬록암을 형성시킨 마그마과정이 결정작용과 동시성 혼염작용이었을 가능성이 지적된다. 여기서 고찰해 보아야 할 것은 화강암질 마그마와 혼염과정을 거친 대상물질이다. 이 혼염과정의 대상으로는 우선적으로 보은암체가 관입하고 있는 옥천층군의 변성퇴적암류를 고려할 수 있으나, 세가지 이유에서 그 가능성이 배제된다. 첫째 보은암체는 변성퇴적암류에 강한 열변성을 일으킬 정도로 둘 사이의 온도차이가 매우 컸고, 이러한 온도 차이에서는 혼염과정이 적절히 진행될 수 없었을 것이라는 것, 둘째로는 보은암체 내에 혼염작용을 지시할 만한 변성퇴적암류의 포획체가 전혀 발견되지 않는다는 것, 셋째로 변성퇴적암류의 화학조성(정창식과 장호완, 1996)은 위의 모델계산의 조건을 만족하지 않는다는 것 등이다. 따라서 보은암체를 형성시킨 화강암질 마그마는 지하에서 이미 혼염과정을 거친 마그마가 변성퇴적암류에 관입하여 온도차이로 말미암아 비교적 빠르게 냉각한 것으로 생각할 수 있다.

혼염과정의 대상이 무엇이나에 대한 의문은 아직 남아 있지만, 정창식과 장호완(1996)이 보고한 보은암체의 Sr 초생값이 0.7116임을 고려하면, 옥천층군 하부 혹은 보다 심부에 위치한 퇴적기원의 지각물질이었을 가능성이 있다.

규장질암맥의 경우 분별과정 및 AFC의 모델 계산에서 화강섬록암의 경향과 매우 다른 경향을 보이는 것은 이 암맥을 형성한 마그마는 그 성인이 다름을 지시한다.

결 론

보은 화강섬록암은 그 화학적 성질이 과알루미나질이며, 칼크-알칼리 계열을 따르는 화강암류이다. 그리고 보은암체를 형성한 마그마가 생성되고 관입한 환경은 활동성 대륙 주변부일 가능성이 있다. 한편, 옥천대의 보은암체를 동시대의 경기육괴의 인제-홍천암체와 비교하면 보은암체 쪽이 인제-홍천암체 보다 덜 성숙된 대륙호의 환경에서 형성된 것임을 알 수 있다.

주성분원소, 미량원소 및 희토류원소의 함량 변화

에 있어서 결정분화를 지시하는 경향성이 결여되어 나타나는 것은 화강암류의 화학적 성질을 지배하는 마그마과정이 단순한 분별작용의 모델 만으로는 설명되지 않음을 나타낸다. 또한 보은 화강암체를 형성시킨 마그마과정에 대해서 레일리 분별 및 주성분원소 함량변화에 따른 분별과정을 모델계산을 통해 검토해 보았으나, 어느 것도 보은암체의 지구화학적 경향성을 효과적으로 설명해 주지 않는다.

반면, 결정작용과 동시성 혼염작용(AFC)에 대한 모델 계산에서는 보은 화강섬록암을 형성시킨 화강암질 마그마는 옥천층군을 관입하기 이전에 퇴적기원의 지각물질과의 혼염과정을 거쳤을 가능성이 제기되고, 그 때의 조건으로는 혼염되는 주변암석의 성분(Ca)과 마그마의 성분(Com)이 유사하고 또한 혼염작용의 속도가 결정작용의 속도와 비슷하며 혼염되는 질량(Ma)은 마그마 전체 질량(Mom)의 10% 내외인 경우이다. 또한 분별과정 및 AFC의 모델 계산의 결과는 규장질암맥이 보은 화강섬록암으로부터 파생된 것이 아니라 다른 성인의 마그마로부터 유래되었을 가능성을 제시한다.

사 사

이 논문을 읽고 건설적인 비평을 해 주신 자원연구소 진명식박사님, 경북대학교 이운종교수님, 전남대학교 김용준교수님 및 기초과학지원연구소 정창식씨에게 감사드린다. 또한 화학분석을 해 준 프랑스 Ecole des Mines의 Jacques Moutte 박사, 실내의 작업에 도움을 준 서울대학교 조원식, 최원희에게 감사드린다. 이 연구는 과학재단 핵심전문연구(KOSEF 941-0400-007-1)와 1995년도 교육부 기초과학 학술연구(BSRI-95-5404)의 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

- 권성택, 이동호, 1992, 보은지역의 옥천 변성염기성암에 대한 암석·지구화학적 연구. 암석학회지, 1, 104-123.
 김옥준, 1971, 남한의 신기화강암류의 관입시기와 지각 변동. 광산지질, 4, 1-9.
 이대성, 박종심, 1981, 보은화강섬록암 서남부 접촉대에 대한 암석학적 연구. 광산지질학회지, 14, 55-76.

- 정창식, 장호완, 1996, 중부 옥천변성대의 화성, 변성 및 광화작용과 구조조적 연관성 연구(I): 보은지역 화강암류의 암석화학과 동위원소 지구화학. *대한지질학회지*, 32, 91-116.
- 조원식, 1992, 보은-속리산 일대에 분포하는 화강암류에 대한 광물학적 및 암석학적 연구. *서울대학교 석사논문*, 74p.
- 좌용주, 이종익, Kagami, H., 1995, 중부 옥천재 화강암류의 새로운 연대. *대한지질학회 학술발표회 요약집*, p17.
- Albuquerque, C.A.R.De, 1977, Geochemistry of the tonalitic and granitic rocks of the Nova Scotia southern plutons. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 1-13.
- Allegre, C.J. and Minster, J.F., 1978, Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38, 1-25.
- Arth, J.G., 1976, Behavior of trace elements during magmatic processes-a summary of theoretical models and their applications. *J. Res. U. S. Geol. Surv.*, 4, 41-47.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. and Webb, P.C., 1984, The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *J. Geol. Soc. London*, 141, 413-426.
- Cho, W.S., Jwa, Y.-J., Lee, J.I. and Lee, M.S., 1994, Petrography and mineral chemistry of the granitic rocks in the Boeun-Sogrisan area, Korea. *J. Petrol. Soc. Korea*, 3, 220-233.
- Christoph, G., 1990, Fractional crystallization in open systems of variable composition: correlations between element concentrations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 101, 34-41.
- Cluzel, D., Cadet, J. P. and Lapiere, H., 1990, Geodynamics of the Ogcheon belt (South Korea). *Tectonophysics*, 183, 41-56.
- Condie, K.C., 1978, Geochemistry of Proterozoic granitic plutons from New Mexico, U.S.A., *Chem. Geol.*, 21, 131-149.
- Cullers, R.L., Koch, R.J. and Bickford, M.E., 1981, Chemical evolution of magmas in the Proterozoic terrane of the St. Francois mountains, southeastern Missouri. 2. Trace element data. *J. Geophys. Res.*, 86, 10388-10401.
- DePaolo, D.J., 1981, Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 53, 189-202.
- Henderson, P., 1984, General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In: Henderson, P.(ed.) *Rare Earth Element Geochemistry*, 1-32, Elsevier Sci. Pub.
- Jwa, Y.-J., 1991, A study on Jurassic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. II. Effect of wallrock assimilation. *J. Geol. Soc. Korea*, 27, 13-23.
- Jwa, Y.-J. and Moutte, J., 1990, A study on Jurassic granitic rocks in the Inje-Hongcheon district, South Korea. I. Trace and rare earth elements geochemistry. *J. Geol. Soc. Korea*, 26, 418-427.
- Jwa, Y.-J., Moutte, J., Cho, W.-S. and Choi, W.-H., 1994, Petrochemistry of Mesozoic granites in the central Ogcheon belt and its tectonic implication. *Abst. 4th Int'l Symp. IGCP 321*, 48-49.
- Kim, H. S., 1971, Metamorphic facies and regional metamorphism of Ogcheon metamorphic belt. *J. Geol. Soc. Korea*, 7, 221-256.
- Lee, D. S., 1971, Study on the igneous activity in the middle Ogcheon geosynclinal zone, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 7, 153-216.
- McCarthy, T.S. and Hasty, R.A., 1976, Trace element distribution patterns and their relationships to the crystallization of granitic melts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, 1351-1358.
- Otoh, S., Jwa, Y. -J. and Lee, M. S., 1990, Mesozoic ductile shear deformation in East Asia: Examples from South Korea. *J. Geol. Geograph.*, 99, 388-390.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25, 956-983.
- Rayleigh, J.W.S., 1896, Theoretical considerations respecting the separation of gases by diffusion and similar processes. *Philos. Mag.*, 42, 493-498.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F., 1989, Chemical and isotopic 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.
- Taylor, Jr.H.P., 1980, The effects of assimilation of country rocks by magma on $^{18}O/^{16}O$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$ systematics in igneous rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47, 243-254.
- 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.

(1996년 11월 18일 접수)

(책임편집 : 진명식)

Petrochemistry and magma process of Jurassic Boeun granodiorite in the central Ogcheon belt

Yong-Joo Jwa

Department of Geology, Gyeongsang National University, Chinju, 660-701, Korea

ABSTRACT : Boeun granodiorite, which intruded into the metasedimentary rocks of the Ogcheon Group, show chemical natures of metaluminous and calc-alkaline. Generating and emplacing environment of the Boeun granodiorite would have been a active continental margin. Comparing to the contemporaneous Inje-Hongcheon granodiorite in the Gyeonggi massif, the Boeun granodiorite seems likely to have formed under more immature continental arc environment. Compositional changes of major, trace and rare earth elements in granodiorite and felsic dyke are not certain to indicate crystallization differentiation. From this fact, the simple fractional crystallization model would be in question to explain the magma process which controlled the formation of the Boeun granitic mass. The model calculations for Rayleigh fractionation, fractionation with variable major-component composition, assimilation-fractional crystallization(AFC) were carried out to examine the magma process of the mass. The results of former two models do not agree with the compositional variations in the mass. The AFC model can be, however, applied to the magma process. The conditions for AFC process are (1) composition of assimilated wallrock is similar to that of primary magma, (2) assimilating rate is similar to crystallizing rate, and (3) mass of assimilated wallrock is about 10% of that of the magma. These conditions deny a possibility that the assimilated wallrock was the metasedimentary rocks of the Ogcheon Group. This indicates that after having experienced the assimilation process in deeper crust, the granodiorite magma intruded into the Ogcheon group. Every model calculation suggests that the felsic dyke was differentiated not from the granodiorite magma, but from a different source magma.

Key words : Boeun granodiorite, felsic dyke, fractionation, assimilation, AFC