

국내 중생대 화강암의 대자율 특성과 화학조성

홍 세 선

한국지질자원연구원

Magnetic Susceptibility and Petrochemical Compositions of Mesozoic Granites in Korea

Sei Sun Hong

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

요약: 자기암석학적인 연구를 화강암에 적용시키기 위해서는 먼저 화강암의 자성 함량, 즉, 대자율에 대한 전반적인 이해와 암석의 화학적인 연구 기반을 바탕으로 화강암의 자기적 특성을 규명해야 한다. 이를 위해서는 자기 암석학적인 연구가 선행되어야 한다. 자성광물특성, 전암의 자기성질, 암석학적 연구, 지화학적인 연구와 자기이상 특성을 연구하여 암석에 기록되어 있는 자기특성을 이해함으로써 좀 더 명확한 지질학적인 해석과 자기탐사에서의 지질학적 응용을 증대시킬 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 국내의 화강암체들 중 포천, 지포리, 금산, 남원, 속리산, 용담, 태백산 지역, 마산, 진동화강암체 등 시대별, 지구조적으로 서로 다른 화강암들에 대한 대자율을 측정하고 이를 암석화학적 자료들과 비교하였으며 그 결과 암석의 진화경로, 지구조적인 차이, 화강암이 생성되는 암석화학적인 환경, 화강암의 정치심도에 따라 대자율이 반드시 정비례적이지는 않지만 서로간에 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

주요어: 대자율, 암석화학 파라미터, paramagnetic, weakly ferromagnetic, moderately ferromagnetic

Abstract: By relating mineralogy, petrology and geochemistry to observed magnetic properties, an understanding of the geological factors that control magnetic signatures is obtained. Magnetic susceptibility measurements and geochemical analyses were carried out for 160 samples in the Jurassic to Cretaceous granitoids, which is distributed to Pocheon, Jipori, Geumsan, Namwon, Songnisan, Yongdam, Masan, Jindong, and Taebaeksan areas. The magnetic properties of igneous intrusion in these granites reflect bulk rock composition, reduction-oxidation state, hydrothermal alteration which are controlled by tectonic setting, composition and history of the source region, depth of emplacement and nature of wall rocks.

Key words: Jurassic and Cretaceous granitoids, magnetic susceptibility, petrochemical parameter, paramagnetic, weakly ferromagnetic, moderately ferromagnetic

서 언

암석에서의 대자율은 암석 내 함유된 함철 불투명광물에서 주로 발생되며 특히, 강자성광물인 자철석의 함량에 의해 그 크기가 크게 좌우된다. 이러한 철의 분배는 화학조성, 철의 산화상태, 암석의 성인환경에 의존한다. 즉, 대부분의 지질학적 요인들이 암석자기의 성질에 영향을 준다(Clark, 1999). 그러므로 자성광물 특성, 전암의 자기성질, 암석학적 연구, 지화학적인 연구

와 자기이상 특성을 연구하여 암석에 기록되어 있는 자기특성을 이해함으로써 좀 더 명확한 지질학적인 해석과 자기탐사에서의 지질학적 응용을 증대시킬 수 있다.

비록 지구조 해석을 위해 변성암과 퇴적암 등에 대해서 고지자기 연구가 수행되고는 있으나, 국내에서의 화강암에 대한 자기암석학적인 연구는 아직까지는 기초적인 수준에 머물러 있으며 몇몇 연구자들에 의해 매우 제한적으로 연구되어 오고 있다. 국내 화강암에 대한 암석자기 연구는 대자율에 의한 국내 화강암의

*Corresponding author: Tel: 82-42-868-3102, E-mail: hss@kigam.re.kr

대자율 분포특성(Jin et al., 2001), 경상분지 내 화강암의 계열 분류(박태호와 좌용주, 2000)와 대자율 이방성 특성을 이용한 화강암의 일차 구조 해석 연구(Otoh et al., 1999; 이윤수 외, 2000) 등이 있을 뿐이다.

그러므로 이번 연구에서는 국내 중생대 화강암류에서 일반적인 분류에 이용되는 지화학적 파라미터와 대자율과의 상관관계를 논하고 암석의 대자율에 의한 암석의 분류에 대하여 고찰하여 보기로 한다.

연구방법

이 연구를 위해 경기육괴에 속하는 포천과 지포리 지역 유라기 화강암체, 옥천대 내의 금산지역 유라기 화강암, 영남육괴 내의 남원지역 유라기 화강암, 옥천대 내의 속리산, 용담 그리고 태백산 지역의 백악기 화강암, 경상분지 내의 마산, 진동지역 백악기 화강암 등 9개 지역 158개 사이트에 대해 대자율을 측정하고 이들에 대한 주성분 분석을 실시하였다(Fig. 1).

대자율 측정장비는 영국 Bartington사에서 제작된 MS2 magnetic susceptibility meter와 MS-2B sensor이며, 이를 이용하여 각각의 사이트에서 채취된 화강암 암편(5~7 시편)들에 대해 중량을 측정하여 이에 따른 중량대자율을 구하였다. 또한 동일 위치에서 채취된 시료들에 대해 지화학 분석을 실시하여 화강암의 분류의 요인이 되는 파라미터들을 구하였다.

대자율에 의한 화성암의 분류

암석에서의 대자율은 암석 내 함유된 철을 함유한 불투명광물에서 주로 발생되며 특히, 강자성광물인 자철석의 함량에 의해 크게 좌우된다. 이러한 철의 분배는 화학조성, 철의 산화상태, 암석의 성인환경에 의존한다. 즉, 대부분의 지질학적 요인들이 암석자기의 성질에 영향을 준다. Clark(1999)는 암석의 대자율(κ)을 근거로 하여 화성암은 다음의 5개 그룹으로 분류하였다.

1. diamagnetic (DIA) $\kappa < 0$
2. paramagnetic (PM) $0 < \kappa < 1.260 \times 10^{-6}$ SI
3. weakly ferromagnetic (WFM) 1.260×10^{-6} SI $< \kappa < 3.770 \times 10^{-6}$ SI
4. moderately ferromagnetic (MFM) 3.770×10^{-6} SI $< \kappa < 37.700 \times 10^{-6}$ SI
5. strongly ferromagnetic (SFM) $\kappa > 37.700 \times 10^{-6}$ SI

diamagnetic인 화성암체는 거의 드물며, 자철석 양이

0.01~0.1 vol.% 함유되면 WFM 관입암체로, 0.1~1 vol.% 함유하면 MFM으로, 1 vol.% 이상이면 SFM 관입암체로 생각할 수 있다. 자성광물이 흔적양(trace) 산출되면 대개 paramagnetic으로 구분할 수 있으며 이러한 암체에서 측정된 대자율은 대개 상자성광물의 영향에 의한 것이다. 상자성 광물은 잔류자기를 갖고 있지 않기 때문에 PM 관입암체의 잔류자화는 매우 약하다.

이 연구에서는 이러한 대자율에 따른 화성암의 분류와 지화학적 분류(A/CNK), 기원에 따른 분류(I, S-type), 철-티탄 산화광물에 의한 분류(자철석 계열과 티탄철석 계열) 사이에 어떠한 상관관계를 가지고 있는지를 파악하고자 하였으며, 또한 암석의 자화에 영향을 주는 지질학적인 요인들(철함량, 근원암 환경, 정치심도)과의 관련성을 검토하였다.

화강암의 대자율과 암석화학 파라미터 비교

포천지역 화강암

이 화강암류는 서울-의정부-포천북부의 북동향의 대상분포하며 주변의 경기편마암 복합체를 관입한 대보 화강암질 저반의 일부로서, 1/5만 포천도폭(미발간), 기산리도폭(미발간)일대에 걸쳐 넓게 분포하는 유라기 화강암류이다. 이 화강암류는 구성광물의 특성과 분포지역에 따라 서부-남서부의 흑운모화강암, 동부의 석류석 흑운모화강암 그리고 북동부의 복운모화강암으로 구분되며, 이 중에서 전자 둘은 넓은 분포지역을 이루나 후자는 소규모로 분포한다. 여기에서는 전자 둘에 대해 논하기로 한다.

흑운모화강암은 담회색 또는 미약한 담홍색을 띠는 중립질 내지 조립질 화강암으로 포천천의 서부와 남서부에서 넓게 분포하며 다소 낮은 지형을 이룬다. 석영-알칼리장석-사장석(QAP) 모우드 삼각도에서 섭장-본조화강암 영역에 걸치나, 대부분 본조화강암에 속한다(윤현수의, 2002). 석류석 흑운모화강암은 회색, 담회색, 담홍색을 띠는 중립질 내지 조립질 화강암으로 흑운모화강암과 달리 대부분 높은 지형을 이룬다. 전반적으로 미립의 석류석이 산출되고, QAP 모우드 삼각도에서 본조화강암에 해당한다. 이들 화강암의 남쪽 연장부에서 보고된 절대연대(윤현수, 1995)는 둘 다 166 ± 7 Ma(흑운모화강암, K-Ar 흑운모), 165 ± 2 Ma(석류석 흑운모화강암, K-Ar 흑운모)로서 유라기 중기에 해당한다.

흑운모화강암은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 녹니석, 인회석, 스펀, 저어론, 갈염석 및 불투명광물 등으로 구성되며, 석류석 흑운모화강암은 석영,

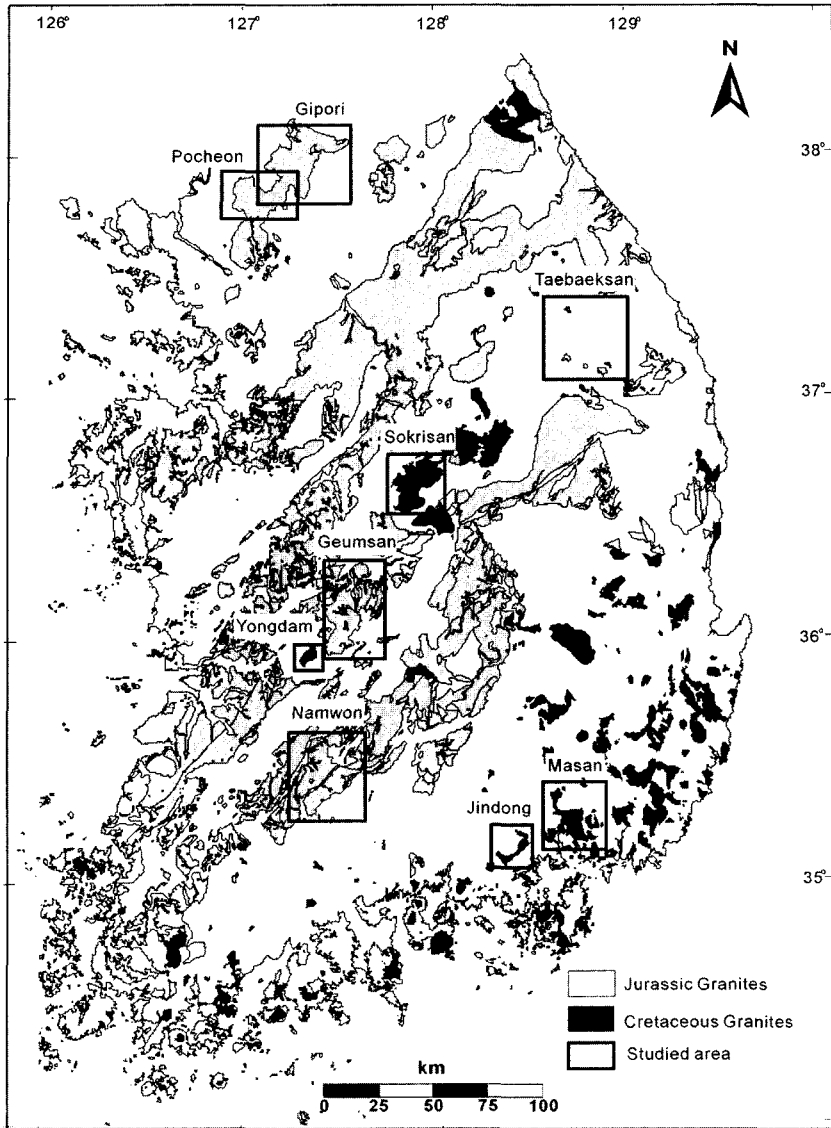


Fig. 1. Distribution of the studied granitoids in South Korea.

알칼리장석, 사장석, 흑운모, 백운모, 녹니석, 인회석, 지어콘, 석류석과 불투명광물 등으로 구성된다.

$A/CNK(Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O))$ 몰 비는 흑운모 화강암 0.93~1.27, 석류석 흑운모화강암 1.03~1.21로서, 모두 과알루미나암질에 해당한다(Fig. 2). 이들 화강암류는 SiO_2 대 $(Na_2O + K_2O)$ 의 관계(Irvine and Barager, 1971)에서 서브알칼리 계열에, 그리고 $AFM(Na_2O + K_2O, Fe_2O_3(t), MgO)$ 삼각관계도에서 칼칼알칼리 계열에 속하며 분화말기에 해당하는 경향을 이룬다.

이 포천화강암체에서는 약 56개 지점에 대하여 대

자율을 측정하였으며 이 중 화학조성자료가 있는 20개 시료에 대해 지화학 파라미터와 대자율사이의 관계(Table 1)를 살펴보았다. Fig. 2에서 보듯이 흑운모화강암과 석류석 흑운모화강암의 평균 대자율값은 각각 9.3×10^{-3} SI와 0.065×10^{-3} SI로 약 100배 이상의 차이를 가지며, 전형적인 북봉분포의 특징을 보인다. 자성강도에 의한 화강암의 분류상 흑운모화강암은 MFM 화강암과 산화형 화강암에, 석류석 흑운모화강암은 PM 화강암과 환원형 화강암에 속한다. 또한 흑운모화강암은 자철석계열이며 대부분 I형 화강암에, 그리고 과알루

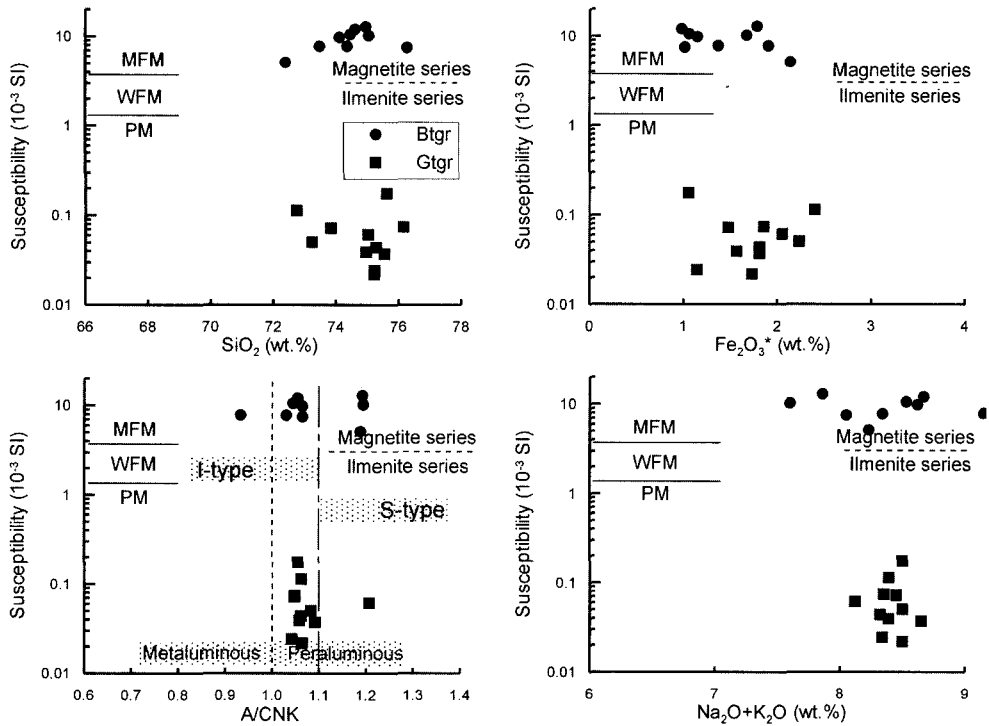


Fig. 2. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Pocheon area.

미나질 화강암 영역에 도시된다. 석류석 흑운모화강암은 티탄철석계열이며 I형 화강암에, 그리고 과알루미나질 화강암 영역에 도시된다. 두 화강암체는 SiO₂나 Fe₂O₃* 함량 변화에 따라 대지율값이 일정하게 변화하는 경향을 나타낸다. 즉, 흑운모화강암의 경우 SiO₂ 함량이 증가함에 따라 대지율은 증가하며 Fe₂O₃* 함량이 증가함에 따라 대지율은 감소하는 경향을 보이며 석류석 흑운모화강암의 경우 흑운모화강암과는 정반대되는 경향이 관찰된다. 이러한 서로 다른 경향은 흑운모화강암과 석류석 흑운모화강암이 서로 다른 관입환경 또는 서로 다른 근원물질의 차이에서 형성되었음을 시사한다고 할 수 있다.

또한 현미경관찰에서도 흑운모화강암의 불투명광물은 대부분 자철석과 티탄철석으로 구성되어 있는 반면 석류석 흑운모화강암에서는 불투명광물이 거의 관찰되지 않는다.

지포리지역 화강암

지포리 도폭내 화강암류는 주라기의 흑운모 화강암, 함석류석 흑운모 화강암, 반상화강암, 복운모 화강암 그리고 담홍색 각섬석 흑운모 화강암이 해당된다(윤현수 외, 2000).

흑운모 화강암은 담회색-회색을 띠는 세립질 내지 조립질암으로서 중립질이 우세하며 주구성광물은 석영, 사장석, 흑운모, 페사이트, 미사장석 등이며 부구성광물로는 인회석, 저어콘, 스펀 등이 나타난다. 반상화강암은 회백색-회색을 띠는 반정질암으로 바탕부는 중-조립질을 그리고 기질부는 대체로 2~3cm 정도의 크기를 이룬다. 반정은 홍색이나 회색장석으로서 곳에 따라 뚜렷한 자형-반자형을 이룬다. 주구성광물은 석영, 사장석, 페사이트와 흑운모이다. 부구성광물은 인회석, 스펀, 갈염석, 저어콘과 불투명 광물이다. 산출되는 반정은 3~5cm로서 장석이 주이다. 복운모화강암은 담회색-회색을 띠는 중립질암으로서 간혹 유색광물부가 수cm 이하의 크기로 발달하며, 곳에 따라 단층조선이 잘 발달한다. 복운모화강암은 대체로 중립질의 조직을 보이며 사장석, 미사장석, 페사이트, 석영, 흑운모 등 흑운모화강암과 비슷한 광물조성을 나타내며 백운모가 특징적으로 산출된다. 담홍색 각섬석 흑운모화강암은 홍색을 띠는 중립질 내지 조립질암이다. 이 암의 남측 주변에서는 부분적으로 홍색장석의 반정이 발달하며, 유색광물부가 수cm 크기로 함유된다. 곳에 따라 수cm 크기의 공동이 발달하며, 수십cm 크기의 포켓상을 이룬 페그마타이트질 내의 공동에는 수cm 미만의 크기

Table 1. The magnetic susceptibilities and geochemical parameters of the Jurassic and Cretaceous granites from Korea.

Age	Area	Rock type	Sample no.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ *	A/CNK	Na ₂ O+K ₂ O	M.S.
Jurassic	Jipori area	Pobtgr	GP28-2	71.43	2.54	1.07	7.86	0.131
			GP30	67.87	3.54	1.03	8.09	0.955
			GP33	70.29	2.74	1.05	8.36	6.574
			GP67	71.21	2.54	1.04	8.16	6.879
			GP68	70.30	2.60	1.05	8.44	9.092
		Tmgr	GP29	71.97	2.19	1.13	8.30	0.064
			GP35	73.48	1.38	1.10	8.56	0.037
			GP39	73.76	1.48	1.08	8.62	0.052
			GP46	73.85	1.58	1.10	8.41	0.038
			GP60	72.81	1.77	1.07	8.62	0.049
		Btgr	GP78	72.79	1.84	1.07	8.65	0.050
			GP40	71.59	2.77	1.03	8.44	2.817
			GP43	75.10	1.50	1.07	8.48	0.062
			GP55	70.61	2.18	1.05	8.93	0.168
			GP57	71.36	2.26	1.05	8.64	0.093
			GP70	72.35	1.85	1.08	8.63	0.063
		Phbigr	GP77	72.16	1.87	1.06	8.79	0.067
			GP42	72.16	2.47	1.00	8.58	5.497
			GP74	72.77	2.49	1.02	8.34	9.607
			GP75	72.24	2.56	1.01	8.56	7.065
	Pocheon area	Gtgr	GP79	71.91	2.71	1.01	8.33	5.510
			1-1	74.10	1.14	1.06	8.62	9.815
			1-2	74.94	1.78	1.19	7.86	12.880
			1-3	74.35	1.36	0.93	9.15	7.814
			1-5	75.04	1.66	1.19	7.60	10.219
			1-6	72.38	2.13	1.19	8.23	5.141
			1-7	76.26	1.01	1.06	8.05	7.523
			1-8	74.45	1.05	1.04	8.53	10.575
			1-10	73.47	1.90	1.03	8.34	7.788
			1-11	74.60	0.98	1.05	8.67	12.050
			2-1	76.15	1.85	1.05	8.35	0.074
	2-2	75.02	2.05	1.21	8.12	0.061		
2-4	75.22	1.73	1.06	8.50	0.022			
2-6	75.28	1.81	1.06	8.32	0.044			
2-7	74.96	1.56	1.06	8.39	0.039			
2-8	72.74	2.40	1.06	8.39	0.114			
2-9	73.83	1.48	1.05	8.45	0.072			
2-11	75.54	1.81	1.09	8.65	0.037			
2-12	73.23	2.23	1.08	8.50	0.050			
2-14	75.61	1.05	1.05	8.50	0.176			
2-15	75.23	1.14	1.04	8.34	0.024			

의 수정들이 기벽에 수직으로 발달되기도 한다. 담홍색화강암은 석영, 사장석, 피사이트, 흑운모 외에 각섬석이 산출되는 것이 특징으로 장석은 주로 분홍색을 띠고 있다. 이들 화강암류는 모두 과알루미나질 화강

암에 속한다. 대부분의 시료는 1.1 이하의 alumina saturation을 나타내는 전형적인 I형 화강암 영역에 포함된다.

이 지포리 지역의 화강암에 대해서는 21개 시료에

Table 1. Continued.

Age	Area	Rock type	Sample no.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ *	A/CNK	Na ₂ O+K ₂ O	M.S.	
Jurassic	Namwon	LTM	NW67	74.20	1.86	1.05	6.61	3.153	
			Daesung3	69.13	3.3	1.03	6.74	3.848	
			Chukmun4	72.42	2.02	1.05	7.48	4.925	
		HTM	Yoolcheon1	68.01	2.74	1.05	7.45	0.277	
			A201	71.24	2.22	1.03	7.5	0.800	
			A225	73.44	1.71	1.07	7.49	0.072	
			A307	72.22	2.04	1.02	7.48	2.177	
			Uosung3	73.29	1.51	1.12	7.85	0.090	
			Kuteu2	71.34	2.14	1.06	7.77	1.485	
			Manbong1	71.54	2.19	1.08	7.61	0.628	
			NW51	73.38	1.8	1.09	7.71	0.013	
			Geumsan	Btgr	KG1	68.28	3.32	1.10	7.06
		KG2			69.13	2.79	1.10	7.46	0.082
		KG3			76.13	1.24	1.08	8.23	2.716
		KG4			70.64	2.45	1.12	7.41	0.098
	KG5	64.5			4.03	1.00	7.5	0.202	
	KG7	63.16			5.02	1.03	5.83	2.998	
	KG8	62.98			5.01	1.03	5.53	2.022	
	KG9	70.74			2.63	1.17	6.57	0.075	
	KG10	72.44			1.9	1.15	7.53	0.056	
	KG11	73.5			1.56	1.15	7.68	0.046	
	KG12	69.69			2.31	1.12	5.75	0.064	
	KG13	67.35			3.51	1.09	6.61	0.120	
	Pobtgr	KG14	64.8	4.45	1.06	6.14	0.177		
		KG16	73.72	1.65	1.07	8.7	1.874		
		KG20	64.78	4.37	1.04	6.1	8.061		
		KG21	67.47	3.96	1.04	6.52	4.790		
KG22		62.26	5.01	0.98	6.49	0.516			
KG23-2		65.63	4.38	1.03	6.23	0.946			
KG28		71.86	2.41	1.31	7.29	0.070			
KG32		74.33	1.09	1.23	7.85	0.039			
KG35		72.73	1.65	1.14	7.52	0.055			
KG17		70.81	2.33	1.07	7.59	4.902			
KG18	70.4	2.26	1.11	7.61	3.350				
KG24	69.29	2.74	1.08	6.8	4.750				
KG25	70.96	1.97	1.11	7.86	1.975				
KG36	72.46	1.99	1.15	6.85	2.529				

Btgr : Biotite granite, Gtgr : garnet biotite granite, Hbtgr : Hornblende biotite granite, Pobtgr : Porphyritic biotite granite, Tmgr : Two mica granite, Phbtgr : Pinkish hornblende biotite granite, LTM : Low TiO₂/MgO, HTM : High TiO₂/MgO group, Fe₂O₃* as a total Fe, M.S. : Magnetic susceptibility(10⁻³ SI).

대해 대자율값을 측정하였으며 이를 지화학 파라미터들과 비교하여 보았다(Table 1). Fig. 3에서 보는 바와 같이 이 지역 화강암들도 크게 두 그룹으로 구분될 수 있다. 한 그룹(반상화강암 그룹)은 반상화강암과 담홍색 각섬석 흑운모화강암이며 다른 그룹(복운모화강암 그룹)은 흑운모화강암과 복운모화강암 그룹이다. 이들

두 그룹은 지화학적 비교에서는 모두 과알루미나질이며 I형에 속하는 등 서로 다른 경향을 보이지 않지만 대자율의 측면에서는 뚜렷한 상이점이 발견된다. 앞의 포천지역의 화강암에서와 마찬가지로 두 그룹 사이의 대자율값은 100배 이상의 차이를 보이는 전형적인 북봉형태를 나타낸다. 반상화강암 그룹의 대자율값은

Table 1. Continued.

Age	Area	Rock type	Sample no.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ *	A/CNK	Na ₂ O+K ₂ O	M.S
			SR1	76.94	0.96	1.11	8.13	1.572
			SR2	77.02	0.99	1.12	8.03	2.562
			SR3	76.50	1.29	1.10	7.97	0.261
			SR4	77.06	0.92	1.08	8.02	2.560
			SR5	77.03	1.03	1.10	8.12	0.814
			SR9	77.47	1.00	1.09	7.83	0.044
	Songnisan		SR11	77.37	1.11	1.14	7.54	0.049
			SR12	76.17	1.23	1.10	8.2	0.946
			SR13	76.58	1.27	1.09	8.16	1.716
			SR20	76.58	0.92	1.12	8.33	0.274
			SR28	77.50	1.11	1.08	7.77	2.438
			SR15	68.05	3.35	1.07	8.41	0.472
			YD8	73.30	1.92	1.05	8.92	2.671
			YD11	74.02	1.68	1.05	9.11	2.824
			YD16	73.46	1.67	1.05	9.04	3.296
			YD20	73.10	1.84	1.04	9.11	2.675
			YD23	73.25	2.15	1.03	8.84	2.218
			YD25	72.50	2.15	1.03	8.96	2.315
			YD28	73.19	2.03	1.02	8.9	5.300
			YD30	74.05	1.84	1.04	8.51	2.935
	Yongdam		YD71	75.84	0.96	1.05	8.79	2.451
			YD75	75.83	0.85	1.02	8.75	5.210
			YD34	75.97	1.32	1.02	8.62	4.672
			YD44	76.01	1.16	1.03	8.69	3.452
			YD58	76.85	1.08	1.04	8.6	4.293
			YD62	76.42	0.97	1.01	8.67	5.452
			YD65	75.46	1.29	1.04	8.86	3.588
			YD67	75.85	1.19	1.03	8.68	3.052
			YD68	75.86	1.24	1.02	8.71	0.569
			YD76	75.93	1.39	1.03	8.56	2.952
			EP1	63.17	4.46	0.90	8.58	11.361
			EP2	59.66	6.14	0.79	7.43	27.981
	Eopyeong		EP3	64.04	3.29	0.81	7.99	3.302
			EP4	63.25	4.48	0.87	7.89	29.869
			EP6	61.73	5.37	0.87	8.31	24.145
			EP8	63.42	4.77	0.87	7.33	25.523
			JT1	66.43	3.70	1.00	7.31	6.086
	Jotanri		JT3	64.66	4.33	0.91	6.71	9.784
			JT4	63.93	4.88	0.92	6.57	11.153

0.9~10×10⁻³ SI이며, 복운모화강암 그룹은 모두 10⁻¹ 내지 10⁻² SI의 값을 보인다. 그러므로 전자는 MFM의, 후자는 PM의 특성을 나타낸다. 또한 SiO₂나 Fe₂O₃* 함량 변화에 따라 일정하게 감소하거나 증가하는(복운모 화강암 그룹에서) 경향을 보이며 이러한 패턴은 포천 화강암의 그것과 동일하다. 이들 두 그룹 역시 산화도

의 차이를 보여 산화형과 환원형으로 구분되며 이는 포천화강암과 마찬가지로 두 그룹사이에 서로 다른 지화학적 환경이 존재하였음을 지시한다.

금산지역 화강암

금산지역의 주라기 화강암체는 야외에서의 산출상

Table 1. Continued.

Age	Area	Rock type	Sample no.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ *	A/CNK	Na ₂ O+K ₂ O	M.S.
Cretaceous	Yeogdun		YG1	59.46	6.24	0.76	7.11	15.209
			YG2	55.54	8.20	0.68	5.95	14.879
			YG3	60.28	6.01	0.78	6.99	7.363
	Molunri		ML1	60.04	5.45	0.78	7.04	5.692
			ML3	66.80	3.13	0.96	8.09	8.202
	Masan		MS1	69.12	3.63	1.00	6.63	18.539
			MS2	68.54	3.81	0.98	6.78	21.797
			MS3	66.01	5.19	0.94	6.42	16.000
			MS4	61.97	6.36	0.91	5.74	30.598
			MS5	65.13	5.10	0.93	6.26	19.360
			MS6	60.30	6.07	0.85	5.78	30.424
			MS7	66.65	4.69	0.93	6.94	12.592
			MS8	66.65	4.83	0.96	6.44	19.082
			MS9	66.74	4.16	0.95	6.53	20.105
			MS10	69.41	3.09	0.99	7.24	10.947
			MS11	69.91	3.20	0.99	7.31	9.715
			MS13	69.31	3.30	0.98	7.09	8.601
			MS15	68.34	3.81	0.98	7.29	8.562
			MS16	68.43	4.00	0.96	6.94	10.804
	Jindong		MS17	70.05	3.12	1.00	7.2	10.659
			MS18	68.81	3.71	0.98	7.12	10.011
			MS19	72.81	2.35	1.03	7.09	11.704
			MS21	68.84	3.82	0.97	7.14	13.873
		altered pt.	MS12	71.22	2.69	1.02	7.29	0.082
	Jindong		JD1	64.05	5.41	0.91	6.25	23.018
			JD2	63.24	6.08	0.92	5.87	32.756
			JD6	59.24	6.83	0.95	5.04	22.111
			JD7	66.87	4.76	0.96	6.63	18.468
			JD9	70.02	3.56	1.02	6.92	2.851
			JD10	64.49	5.19	0.94	6.34	33.364
		JD12	67.33	4.60	0.98	6.23	16.724	
		JD13	67.60	4.31	0.98	6.25	29.288	
		JD17	64.39	5.00	0.95	6.08	37.530	
altered pt.		JD15	68.38	1.43	0.88	5.09	0.657	
altered pt.		JD11	65.49	1.31	0.92	4.9	0.073	
altered pt.		JD3	71.90	1.57	1.03	7.3	0.424	
altered pt.		JD5	61.89	4.80	0.85	3.84	0.311	
altered pt.		JD8	77.01	0.83	1.04	8.43	0.063	
gabbro	JD16	57.02	8.73	0.88	5.59	25.172		
gabbro	JD14	49.96	10.26	0.77	3.23	40.923		

태, 조암광물조성 등에 의해 크게 흑운모화강암과 반상 흑운모화강암으로 대별될 수 있다. 흑운모화강암은 금산을 중심으로 남북의 방향성으로 보이면서 주로 분포하며 반상 흑운모화강암은 금산을 중심으로 주로 북동부 일대에 분포하고 있다(홍세선과 홍영국, 2003). 금

산화강암체는 SiO₂가 62~72wt.% 내외로서 비교적 넓은 범위의 값을 가진다. SiO₂에 대한 주원소 산화물의 관계도에서 보면 금산화강암은 단일 마그마의 분화경향을 뚜렷히 가진다. Irving and Barager(1971)에 의한 (Na₂O + K₂O) 대 SiO₂의 관계도에 따르면 흑운모화강

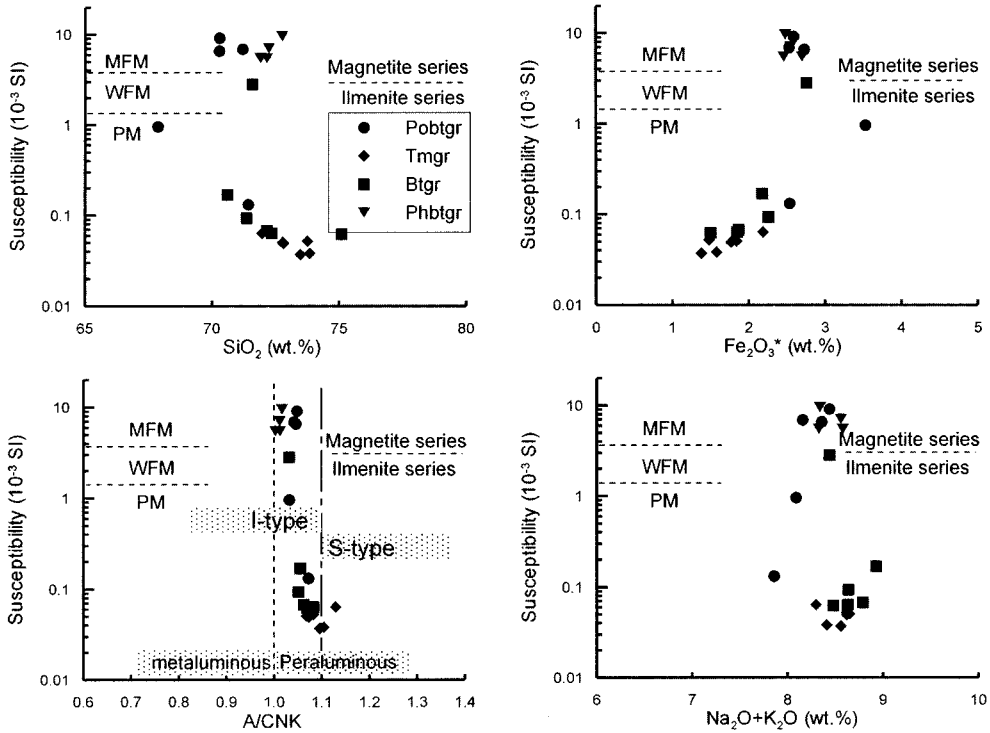


Fig. 3. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Jipori area.

암과 반상 흑운모화강암 모두 서브알칼리 계열에 속하며 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ 대 SiO_2 , AFM 삼각도에서 보면 켈크 알칼리 계열의 뚜렷한 분화경향을 나타낸다. 금산화강암체의 알루미늄 포화지수는 대부분 ~ 1.2 이내의 값을 보이며 ACF삼각도에서 보면 금산화강암체는 I-형과 S-형의 영역에 도시되며 알루미늄 포화지수와 SiO_2 의 그림에서 보면 Chappell and White(1974)가 제안한 I-형과 S-형의 구분 기준인 $\text{ASI} = 1.1$ 내외의 I-형과 S-형에 둘다 도시된다.

금산화강암체에서는 총 36 사이트에서 대자율이 측정되었으며 그 중 화학분석이 실시된 26개 시료에 대해 대자율과 지화학 파라미터 사이의 관계를 살펴보았다(Fig. 4). 흑운모화강암의 대자율값은 $10^{-2} \times 10^{-3}$ SI에서 8×10^{-3} SI의 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분포하나 대부분 1×10^{-3} SI 이하의 값을 갖는다. 반면, 반상화강암은 대부분 $1 \sim 5 \times 10^{-3}$ SI에 집중되어 있다. 흑운모화강암은 대부분 PM 영역에, 반상화강암은 WFM 내지 MFM 영역에 점시되며 일부 시료를 제외하고는 모두 티탄철석 계열에 속하고 있다. 실리카와 철의 함량과의 관계를 보면 이들도 역시 실리카 함량이 증가함에 따라 흑운모화강암과 반상화강암의 대자율값 모두 감

소하는 경향을 보이며 철의 함량이 증가함에 따라 두 암체의 대자율값 모두 증가하는 경향을 보이고 있다. 유색광물인 흑운모나 각섬석 둘 다 대자율값에 거의 기여를 하지 못하므로 이러한 철함량 증가에 따른 대자율의 증가경향은 자철석의 존재비와 관계있을 것으로 생각된다. 산화도에 따른 분류를 보면 흑운모화강암은 환원형에 반상화강암은 산화형에 속한다. 이러한 현상 역시 이들 두 암상사이에 지화학적 환경의 차이가 있었음을 지시한다.

남원지역 화강암

남원화강암체는 야외 산출상태, 광물조성에 따라 크게 각섬석-흑운모 토날라이트-화강섬록암(hornblende biotite tonalite-granodiorite), 반상 각섬석 흑운모 화강섬록암(porphyratic hornblende biotite granodiorite), 흑운모화강암(biotite granite), 복운모화강암(two mica granite)으로 구성되며 소규모의 섬록암, 반상화강암 등이 분포하고 있다(홍세선의, 1988). 흑운모화강암은 남원 화강암체의 대부분을 차지하며 서쪽 경계부에서는 반상조각이 관찰되기도 한다.

남원화강암체는 MgO-TiO_2 의 비에 따라 서로 다른

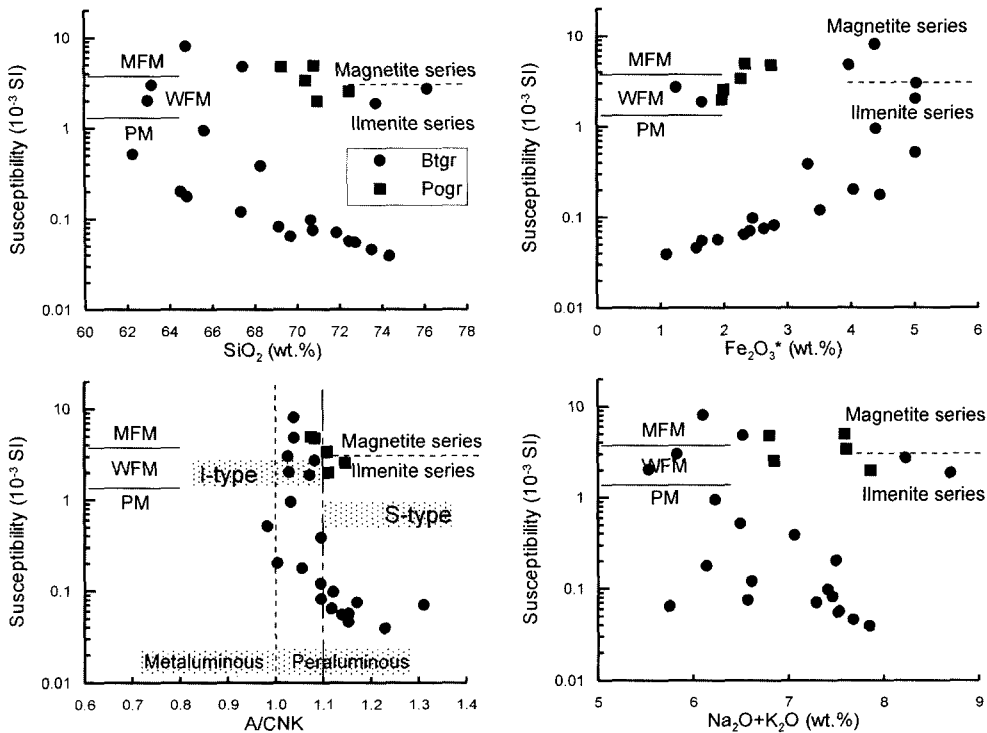


Fig. 4. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Geumsan area.

경향을 보인다. 각섬석-흑운모 토날라이트-화강섬록암, 반상 각섬석 흑운모 화강섬록암과 흑운모화강암의 일부는 low Ti/Mg(LTM) 그룹에 속하고 나머지 흑운모화강암과 복운모화강암은 high Ti/Mg(HTM) 그룹에 속한다(Kwon and Hong, 1993). 이들의 알루미나 포화지수 (ASI: alumina saturation index, mol $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$)는 대부분 0.95~1.1이내의 값을 보이며 노름강육을 포함한다. LTM군의 HBTGD와 loBG의 일부 암석만이 저알루미나질에 속하며 LTM군의 나머지 암석과 HTM군 암석 모두 고알루미나질이며 대부분 I형 영역에 도시된다.

남원화강암체에서는 총 62개 사이트에서 대자율이 측정되었다. LTM 그룹에 속하는 각섬석 흑운모화강암과 흑운모화강암의 대자율값은 대체로 $1\sim4 \times 10^{-3}$ SI의 범위를 보이나 3×10^{-3} SI 이상의 값이 대부분이며, HTM에 속하는 흑운모화강암과 복운모화강암의 대자율값은 $0.01\sim2 \times 10^{-3}$ SI의 범위를 나타낸다(Table 1). 이들은 실리카 함량이나 철함량의 변화에 따른 대자율값의 변화경향은 그다지 잘 나타나지 않으며 오히려 A/CNK가 증가함에 따라 대자율값이 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 5). LTM 그룹은 모두 자

철석계열이며 MFM에 도시되며 HTM 그룹은 대부분 티탄철석 계열이며 WFM 내지 PM 영역에 속한다.

마산지역 화강암

마산화강암은 마산시를 중심으로 분포하는 중립질 내지 조립질의 화강섬록암으로 부분적으로는 2~5 cm의 유색광물의 집합체(mafic enclave)들이 다수 산출되기도 한다. 또한 절리면들을 따라 녹니석화되어 있거나 철산화물의 의한 산화착색현상이 관찰되기도 한다. 또한 이로 인해 절리면 인접에서는 담홍색의 암색을 띠기도 한다.

주구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모, 각섬석등으로 구성되며 부구성광물로는 인회석, 저어콘, 스펀, 자철석 등이 산출된다. 이차 변질광물로는 녹염석, 녹니석, 견운모 등이 관찰되기도 한다. 사장석은 자형 내지 반자형이고 정상적인 누대구조가 잘 나타나며 사장석의 변질로 인한 녹니석도 보이기도 한다. 알칼리장석과 석영은 반자형 내지 타형으로 산출된다. 마산화강암은 60wt.%에서 72wt.%의 비교적 넓은 범위의 값을 나타낸다. A/CNK가 거의 모두 1이하의 값을 갖는 전형적인 I형 화강암이다(홍세선, 2003).

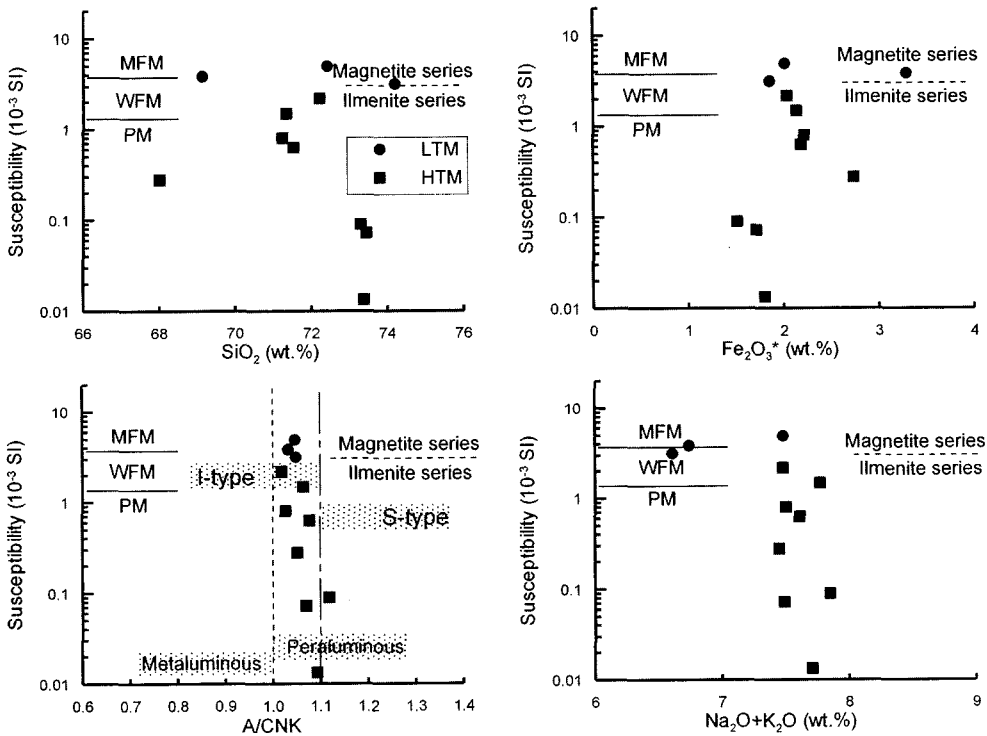


Fig. 5. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Namwon area.

마산화강암에서는 19개 지점에서 대자율을 측정하였다. 대자율값은 $8\sim 30 \times 10^{-3}$ SI로서 비교적 높은 값을 가진다(Fig. 6). 그러나 녹색으로 변질된 부분에서는 0.08×10^{-3} SI 정도로 약 100배 이상의 감소한 값을 가진다. 이들과 지화학적 파라미터와의 관계를 보면 SiO_2 가 증가함에 따라 대자율값은 감소하는 경향을 보이며 전철함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 미약하기는 하지만 A/CNK가 증가함에 따라 대자율은 감소하며 알칼리함량이 증가함에 따라 대자율은 일정하게 감소하는 경향을 나타낸다. 마산화강암의 대자율값으로 미루어 보아 모두 자철석 계열의 I형 화강암에 속하며 MFM 영역에 속한다. 마산화강암은 지화학적으로나 대자율로 보아 하나의 단일 마그마에서 분화가 일어난 것으로 판단되며 모두 산화형 화강암에 속한다.

진동지역 화강암

진동화강암체는 구성광물, 조직에 따라 반려암, 석영섬록암, 화강섬록암등으로 구성된다. 이 암체 주변으로는 백악기의 퇴적암류로 구성된 진동층이 주로 분포하는데 특히 암체의 북서부에는 함안층이 분포하고 있

다. 반려암과 석영섬록암은 광화작용이 발달되어 있는 오탁리와 주서리 부근에 소규모로 분포하며 화강섬록암은 이 암체에서 가장 넓은 분포를 보인다. 화강암의 실리카 함량은 60~70wt.%의 범위를 보이며 반려암은 50~57wt.%의 함량분포를 보인다(홍세선, 2003). 그러나 변질을 받은 부분에서는 SiO_2 72wt.%까지 높아지기도 한다. 진동화강암체는 A/CNK가 1.1 이하의 전형적인 I형 화강암이며 모두 저알루미나질에 속한다.

이 진동화강암체에서는 16개 지점에서 대자율이 측정되었으며 전체적으로 보아 마산화강암보다는 대자율값이 높은 편에 속한다. 반려암에서의 대자율값은 $25\sim 40 \times 10^{-3}$ SI의 범위로 비교적 균질하게 분포하며 화강암에서는 $3\sim 40 \times 10^{-3}$ SI의 값을 갖는다(Fig. 7). 그러나 변질을 심하게 받은 화강암에서는 대부분 1×10^{-3} SI 이하의 값을 갖는다. 특히, 이런 변질을 받은 부분은 흰색으로 변한 것이 많으며 곳에 따라서는 황철석을 함유하기도 한다. 실리카 함량이 증가함에 따라 대자율은 점차 감소하는 경향을 보이며 전철함량이 증가함에 따라 대자율은 미약하게 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 자철석이 초기에 정출하기 때문이다. 진동화강암은 I형, 자철석계열의 화강암이며 MFM 내지

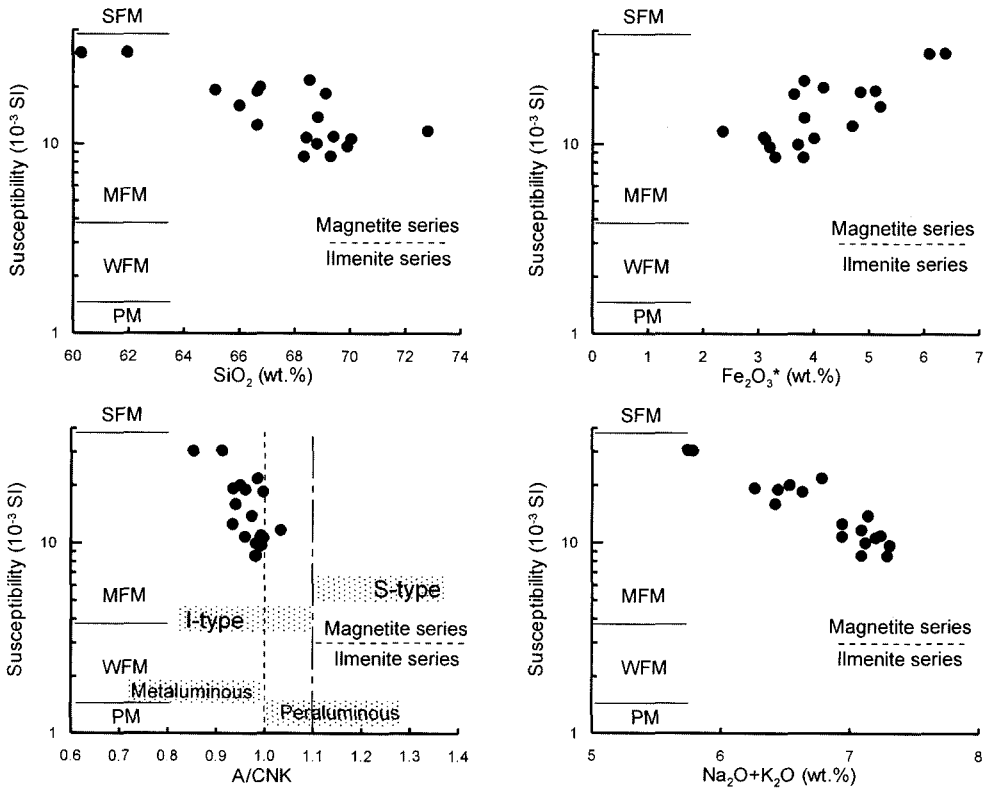


Fig. 6. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Masan area.

SFM에 속한다. 이들도 마산화강암과 마찬가지로 단일 마그마에서 분화된 것으로 생각되며 산화물들의 분화 경향이 서로 다른 직선상의 변화를 보이는 것으로 보아 근원물질은 차이가 있었을 것이다. 진동화강암은 모두 산화형에 속한다.

속리산지역 화강암

속리산 지역에 분포하는 담홍색 흑운모화강암은 백악기의 화강암으로서 주 구성광물은 석영, 알칼리장석, 사장석, 흑운모이며 알칼리장석은 대부분 퍼사이트로 구성된다. 또한 석영과 장석의 경계부에는 미르메카이트 조직을 보이기도 한다. 부성분광물로는 녹니석, 저어콘, 인회석, 불투명광물들이 관찰된다. 화강암의 분류에 따르면 담홍색 흑운모화강암은 알칼리장석이 50% 이상 차지하는 전형적인 화강암에 속한다.

이 담홍색 흑운모화강암은 SiO₂ 함량이 76.0~77.5 wt.%로서 매우 좁은 범위를 보이며 유색광물에 영향을 주는 Fe₂O₃*, MnO, MgO, CaO 등은 대부분 1wt.% 이하의 매우 적은 함량 범위를 보인다. Na₂O + K₂O 함량은 7.5~8.5wt.%로 비교적 높은 편이

다. 이 화강암체는 비알칼리 계열에 속하며 알루미늄아포화지수에 의하면 과알루미나질 화강암에, 성인적으로 보면 I-형에 근접하는 특성을 나타낸다.

속리산화강암에서는 12개 지점에서 대자율이 측정되었다. 대자율값은 0.04~2.5×10⁻³ SI의 범위를 보이며 실리카 함량이나 전철함량의 변화범위가 매우 제한적이어서 함량변화에 따른 대자율값의 변화는 알기 힘들다(Fig. 8). 속리산화강암은 대부분 A/CNK가 1 이상으로 과알루미나질이지만 I형과 S형의 경계부분이 집중된다. 또한 티탄철석계열에 모두 도시된다. 이 화강암은 경상분지 내의 마산, 진동화강암과 시기적으로 백악기이지만 대자율값이 매우 낮은 뚜렷한 차이를 보인다. 이러한 차이는 자철석이 적철석으로 변하여 대자율값이 떨어지는 것으로 IRM 획득실험으로 밝혀진 바 있다(Jin *et al.*, 2001).

용담지역 화강암

용담지역에 분포하는 화강암은 백악기의 담홍색을 띠는 중립질 내지 조립질의 화강암으로서 석영, 알칼리장석, 사장석, 저어콘, 녹니석 및 불투명광물 등으로

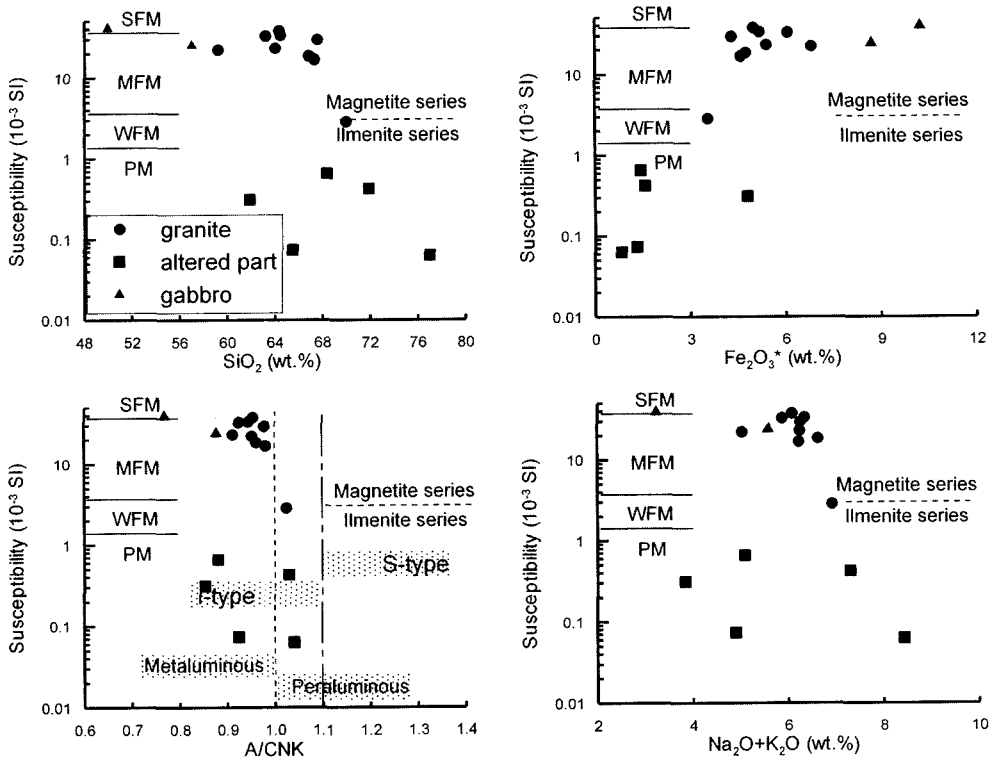


Fig. 7. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Jindong area.

구성되며, 조사지역의 동부와 서부에서 독립암체로서 발달한다. 서부암체의 절대연령 측정결과(K-Ar 법) 흑운모와 알칼리장석의 연령이 각각 109와 85 Ma로 보고된 바 있다. SiO_2 는 우측암체와 좌측암체에서 각각 75.57wt.%와 73.90wt.%의 값을 가져 거의 비슷한 함량 분포를 나타낸다(윤현수와 홍세선, 2002).

용담지역의 동부 암체와 서부 암체의 대자율은 대부분 $2\sim6 \times 10^{-3}$ SI로서 비교적 다른 암체들에 비해 좁은 범위의 값을 갖는다(Fig. 9). 이들은 실리카가 증가함에 따라 즉, 좁은 범위에서의 증가경향이라는 하지만 (72~77wt.%) 대자율값의 증가를 보이며 전철함량의 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 대부분 자철석계열과 티탄철석계열의 경계부분에 주로 점시되며 대부분 WFM에 속한다.

태백산지역 화강암

어평 화강암은 세립질 내지 중립질의 흑운모 화강섬록암으로 암체의 중앙부는 회색을 띠며 접촉부로 갈수록 흑운모, 각섬석이 다량 함유된 암회색의 섬록암상으로 전이된다. 이들 암석에는 유색광물의 집합체 (mafic enclave)들이 3~4 cm 내지 최대 20 cm까지의 크기를 보

이며 다수 분포되기도 한다. 또한 암체의 연변부에는 암석들의 쪼개짐이 매우 심하며 암맥의 관입이 매우 빈번하게 관찰되기도 한다. 절리면은 철산화물의 착색으로 장석이 분홍색을 띄기도 한다.

조탄리 화강암은 강원도 삼척군 하장면 조탄리의 삼조 금은광산 주변에 분포하며 섬록암, 화강섬록암, 화강암 등으로 구성되고 있다. 섬록암은 100여m의 연장을 보이며 대상을 길게 소규모로 노출되어 있으며 화강섬록암체는 조탄리 부근에서 북서방향으로 길이 600 m, 폭 250 m의 크기를 보이며 산출된다. 이 조탄리 화강암체의 관입 접촉부의 석회암은 일부 스카른화 또는 호온펠스화 되어 있기도 하다. 화강섬록암 중의 흑운모에 대한 K-Ar 절대연대는 108 ± 2 Ma(이찬희와 박희인, 1994)로 백악기에 속하며 역운화강암의 시대와도 유사하다.

물운리 화강암체는 강원도 정선군 동면 물운리 한치마을의 가산항 부근에 분포하며 석영섬록암, 석영몬조섬록암, 석영몬조반암, 화강섬록암, 반상화강암 등으로 구성된다. 화강섬록암 중 흑운모의 K-Ar 절대연대는 86 ± 1 Ma(박희인과 박영록, 1990)로 백악기말을 지시한다. 석영몬조섬록암, 화강섬록암, 반상화강암 내에

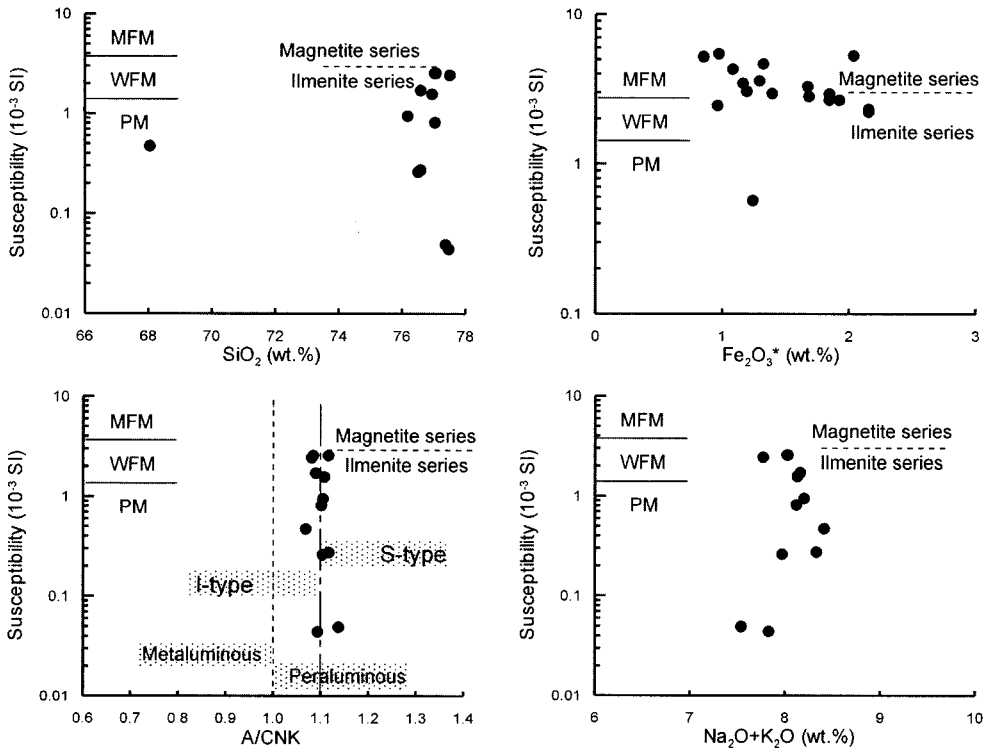


Fig. 8. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Songnisan area.

는 석영섬록암의 암편이 포획되어 있기도 하며 화강섬록암과 반상화강암 내에는 석영섬록암과 석영몬조섬록암의 암편이 포획되기도 한다. 몰운리화강암의 연변부로는 대체로 석영섬록암과 석영몬조섬록암이 분포하고 중심부로 갈수록 화강섬록암과 반상화강암이 분포한다.

역둔화강암체는 역둔리 북서부에 분포하며 섬록암, 석영섬록암, 화강섬록암, 반상화강암 등으로 구성되어 있다. 이들 중 석영섬록암의 전암 K-Ar 절대연대는 106 ± 3 Ma이다(박희인과 이찬희, 1990). 섬록암은 세립질의 입도를 보이며 석영섬록암, 화강섬록암은 중립질의 암상을 보인다. 이 역둔화강암체는 모든 조성상 섬록암, 화강섬록암, 화강암의 영역에 도시되며 사장석은 안데신의 단성분을 나타낸다. 또한 불투명광물로는 자철석, 황철석, 자류철석 등이 산출된다.

태백산지역의 백악기 화강암 모두 비알칼리화 칼크-알칼리 계열의 화강암에 속함을 알 수 있다. 또한 알루미늄 포화지수를 보면 0.7~1.4의 넓은 분포범위를 보이나 대부분 1.1이하의 값을 가지며 어평화강암, 조탄리섬록암, 역둔섬록암, 몰운리화강암은 저알루미나질 화강암에 속하며 모두 I-형 화강암에 속한다

태백산 지역의 화강암체는 암체마다 서로 다른 특성

을 보인다(Fig. 10). 어평화강암의 대지율값이 10×10^{-3} SI 이상으로 가장 높으며 그 다음이 역둔화강암체, 조탄리화강암체, 몰운리화강암체의 순으로 낮아진다. 그러나 모두 $4\text{--}40 \times 10^{-3}$ SI으로 MFM 영역에 속하며 자철석계열에 속한다. 실리카함량의 증가에 따라 대체적으로 대지율값은 감소하는 경향을 보이며 전철함량의 증가에 따라 대지율값은 증가하는 경향을 나타낸다. 모두 2×10^{-3} SI 이상으로 산화환경에서 고결되었음을 지시한다. 태백산 지역의 화강암체들은 대부분 섬록암의 화학조성을 가지고 있으며 대지율값도 다른 지역의 화강암체보다 훨씬 높은 편이다.

암석의 자기특성과 화성암 분류의 상호관계

각각의 암상마다 대지율의 변화 폭은 매우 넓으며 대지율값으로 암상을 분류할 수 있는 기준을 설정하기는 어려운 것으로 생각된다. 또한 현재 사용되는 분류 기준은 암석의 명칭이 광범위하여 자성을 기준으로 분류를 설정하기에는 사실상 어렵다. 그 이유는 대부분의 암석분류는 보통 미량으로 산출되는 자철석의 함량을 반영하지는 않기 때문이다. 또한 대부분의 암상에

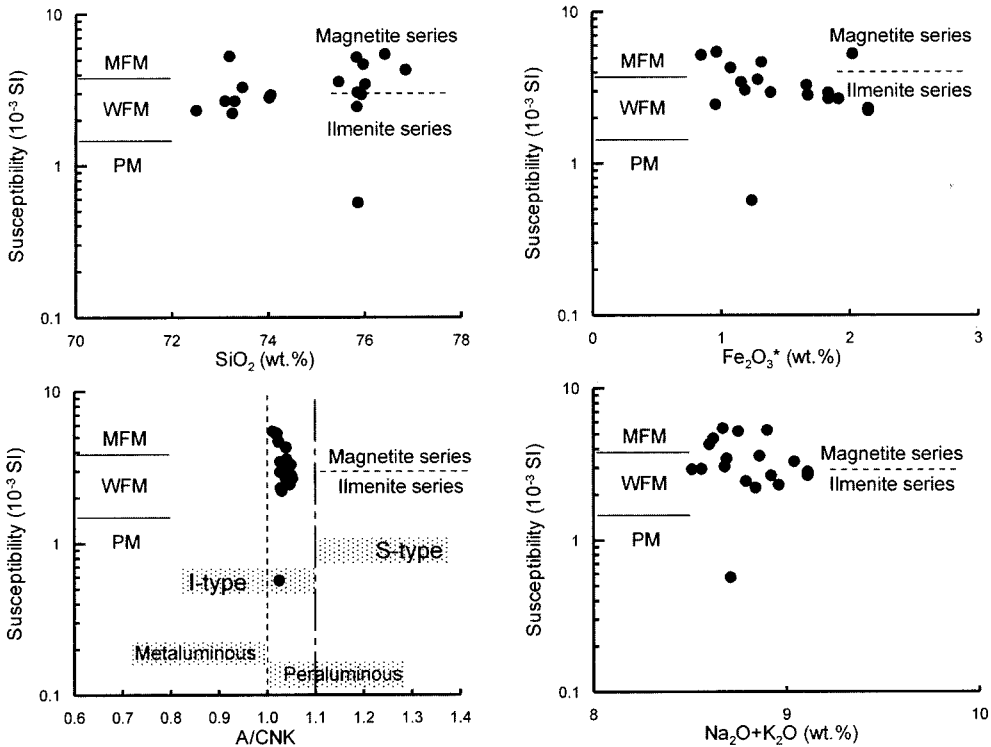


Fig. 9. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Yongdam area.

석의 대자율의 특징은 포천, 지포리, 금산, 남원지역의 쥬라기 화강암에서 보는 바와 같이 상자성 집단과 강자성 집단으로 구분되는 북봉형태를 보인다는 것이다 (Fig. 2, 3, 4와 5). 상자성 집단에서의 철은 주로 상자성 규산염광물 내에 Fe^{2+} 의 형태로 들어가며 MFM, SFM 암석에서는 Fe^{3+} 의 형태로 주로 자철석 내에 들어간다. 이렇게 분류된 집단 내에서 대자율값은 암상에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 상자성 집단의 경우 대자율은 특히, 화학조성과 직접 관계가 된다. 그러므로 뚜렷이 구분되는 대자율 집단은 원래의 암석 분류 체계에서는 고려되어지지 않은 지질환경을 반영할 수 있다. 산화가 아주 심한 암석에서는 자철석 보다 적철석을 함유하는 경우가 많아 자성강도는 WFM이 된다. 이렇게 분류된 집단 내에서 대자율값은 암상에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 상자성 집단의 경우 대자율은 특히, 화학조성과 직접 관계가 된다.

염기성 내지 산성 심성암에 대한 IUGS 분류는 국제적으로 공인을 받은 것이며 이 분류는 주로 사장석($An > 5$), 알칼리장석(K-장석, 알바이트), 석영(또는 준장석)의 세 조암광물의 상대적인 비를 기준으로 한 것이다.

이들 세 광물은 대부분의 화강암에서 90% 이상을 차지하므로 극소량 산출되는 자철석은 암석분류에 거의 기여하지 못하고 있다.

Whalen and Chappell(1988)에 따르면 Lachlan Fold Belt에서 대부분의 I형 화강암은 자철석계열이며 S형 화강암은 티탄철석계열이다. 또한 이 벨트에서 I형 화강암의 약 80%는 1×10^{-3} SI($80 \mu G/Oe$)보다 큰 대자율값을 보이며 대개는 2×10^{-3} SI($160 \mu G/Oe$)보다 크다. 반면 거의 모든 S형 화강암은 1×10^{-3} SI($80 \mu G/Oe$)보다 적은 값을 갖는다(Blevin, 1994, 1996). 또한 각각의 화강암 suite 내에서 SiO_2 함량이 증가함에 따라서 대자율은 체계적으로 감소한다. 화강암에서의 자철석 함량은 지역적인 편향성이 강하다. 이는 하부지각의 근원지의 조성이 서로 다름을 반영하는 것이다(Chappell *et al.*, 1988; Blevin, 1994). 호주내 LFB 내의 I형 화강암은 대개 산화형, 자철석계열 화강암이지만 Melbourne 기반부에서 산출되는 I형 화강암은 환원형, 티탄철석계열이다.

Ishihara(1977)는 칼크-알칼리 계열의 화강암을 철-티탄 산화광물의 존재 유무를 기준으로 자철석계열과 티

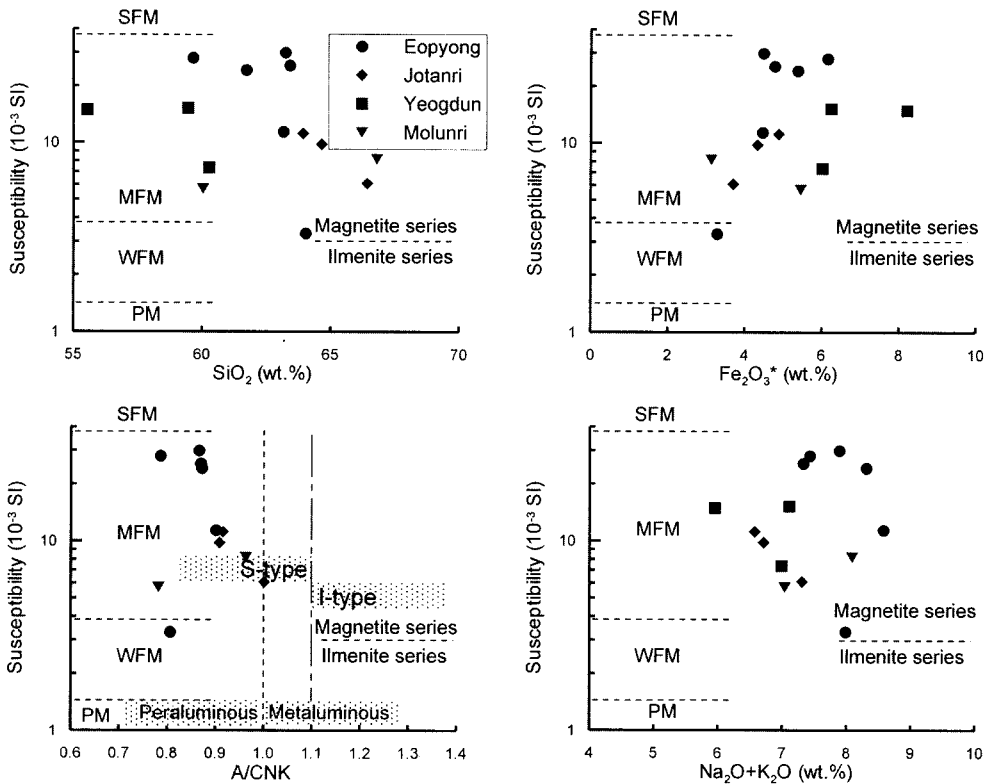


Fig. 10. The diagrams of magnetic susceptibility vs. geochemical parameters of the granitic rocks from the Taebaeksan area.

탄철석계열로 분류하였다. 이 분류는 직접적으로 암석의 자성과 관계있으며 광물탐사에 중요한 분류기준이 된다. 자철석계열은 자철석±티탄철석이 0.1~2vol.%이며 적철석, 황철석, 스펀, 산화된 Mg-rich 흑운모가 산출된다. 티탄철석계열은 자철석이 없으며, 티탄철석(<0.1vol.%)+자류철석, 흑연, 백운모, 환원된 Fe-rich 흑운모가 산출된다.

그러므로 자철석계열 화강암은 강자성을 나타내며 (MFM~SFM) 대자율은 $3.8\sim 75 \times 10^{-3}$ SI의 값을 가지며 반면 티탄철석계열은 상자성을 띤다. 자류철석이 티탄철석계열의 화강암에서 매우 미량 산출되기는 하지만 자성이 매우 약한 대부분 육각형 타입이므로 대자율에는 거의 기여를 하지 못한다(Whalen and Chappell, 1988). 자철석계열의 화강암은 티탄철석계열의 화강암보다 상당히 산화되어 있다. 이는 자철석계열의 화강암은 탄화물질과의 반응이 아주 미미한 상부맨틀이나 하부지각에서 발생되었음을 의미하며 반면 티탄철석계열의 화강암은 지각의 하부 또는 중부에서 발생되었으며 탄소를 함유한 지각암석에 의한 오염이 매우 심하

었다는 것을 의미한다.

또한 화강암의 정지심도가 낮을수록 강자성 암체의 비율은 증가한다. 천부관입 화강암의 경우 관입체의 약 70%가 강자성 암체이다(Pecherskiy, 1965). 경상분지 내 분포하는 천부관입의 백악기 화강암에서도 잘 일치함을 볼 수 있다. 마산과 진동지역 화강암의 각섬석의 AI 함량에 의한 고결압력은 대체로 1~2 kb 내외를 지시하며 대자율은 $10\sim 30 \times 10^{-3}$ SI 내외로 국내에 분포하는 화강암들의 대자율값들 중 비교적 높은 분포범위를 보이고 있다. 근원암, 화강암질 마그마의 발생심도 및 정지심도 사이에는 일반적인 상관관계가 있다. 심부에 위치한, 고온의 무수성 마그마는 얇은 지각레벨로 상승한다. 반면 상대적으로 저온의 함수성 마그마(예를 들어, 백운모가 많은 pelitic 물질의 부분용융에 의해 생성된)는 근원지에서 그렇게 멀리까지 상승되지는 못한다. 그러므로 전자의 마그마는 자철석계열의 화강암을 형성하기 쉬우며 후자의 경우 티탄철석계열의 화강암을 형성시킬 것이다.

Fig. 11은 화강암체의 시대별에 따른 대자율 분포를

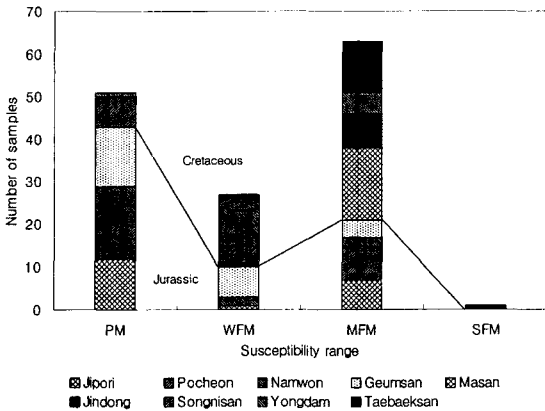


Fig. 11. Frequency diagram of magnetic susceptibilities of Jurassic and Cretaceous granites.

나타낸 그림이다. 이 그림에서 보면 백악기 화강암은 MFM이 가장 우세하며 그 다음으로 WFM, PM의 순으로 그 빈도수가 감소하며, 쥐라기 화강암은 PM이 가장 우세하며 MFM, WFM의 순으로 빈도수가 감소하여 서로 반대 현상을 보인다. 경상분지 내 백악기 화강암은 대부분 MFM에 속하지만 옥천대 내 백악기 화강암은 WFM내지 PM에 속한다. 이러한 화강암의 지역별 대자율의 지역별 편향성이 있다는 것은 근원지의 조성이 서로 상이하었을 가능성을 지시할 수 있다 (Chappell *et al.*, 1988; Blevin, 1994). 그러나 옥천대 내 백악기 화강암에서 보는 바와 같이 후기의 고온 산화에 의한 영향 때문에 대자율의 변화가 생길 수 있다 (Jin *et al.*, 2001).

Fig. 12는 SiO_2 함량 변화에 따른 대자율의 변화를 도시한 것이다. 대자율과 SiO_2 함량 사이에는 강자성 (FM)과 상자성(PM)의 뚜렷한 두 경향을 보인다. 상자성을 나타내는 쥐라기 화강암은 SiO_2 함량이 증가함에 따라 대자율이 감소하는 반비례 관계를 보이며 강자성을 보이는 화강암의 경우 SiO_2 함량 증가에 따라 대자율이 증가하거나(MFM 화강암) 대체로 일정한(WFM 화강암) 패턴을 보인다. 상자성을 보이는 백악기 화강암은 SiO_2 함량 변화범위가 매우 좁아 뚜렷한 특성을 나타내지는 않으며 강자성을 갖는 백악기 화강암은 SiO_2 함량 증가에 따라 대자율이 감소하는 경향을 나타내거나(MFM 화강암) 대체로 일정한(WFM 화강암) 패턴을 보인다.

일반적으로 SiO_2 함량이 증가함에 따라 전철함량은 계속 감소한다. 분화지수와 철함량의 관계를 보아도 화강암의 분화가 99.5% 진행되더라도 1wt.% 정도의 철은 함유하고 있다(Dodge, 1972). 그러나 대부분의 철은

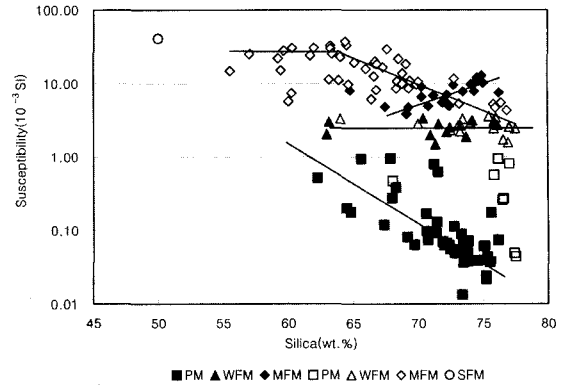


Fig. 12. Susceptibility versus SiO_2 contents for Jurassic and Cretaceous granitic rocks. Filled symbols: Jurassic granitic rocks, Open symbols: Cretaceous granitic rocks.

상자성을 띄는 규산염광물 내에 분배된다. 그러므로 대자율은 SiO_2 함량이 증가함에 따라 감소할 것이다. 강자성을 보이는 화강암은 자철석 함유 화강암이며 SiO_2 함량이 증가함에 따라(72wt.% 까지) 대자율은 점차 감소하는 경향을 보이지만 SiO_2 함량이 72wt.% 이상 증가하면 대자율은 급격히 증가한다(Blevin, 1994, 1996). 이러한 현상은 MFM의 특성을 보이는 쥐라기 화강암에서도 관찰할 수 있다.

결론

국내의 화강암체들 중 포천, 지포리, 금산, 남원, 속리산, 용담, 태백산 지역, 마산, 진동화강암체 등 시대별, 지구조적으로 서로 다른 화강암들에 대한 대자율을 측정하고 이를 지화학적 자료들과 비교하였다.

전체적인 경향은 대자율값이 증가함에 따라 실리카 함량은 감소하며, 전철함량은 증가하는 특성을 보인다. 즉, 전체적인 화성암 분화경향에서 보면 산성암 쪽으로 갈수록 대자율은 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 A/CNK에서도 마찬가지로 A/CNK의 값이 증가할수록 대자율 값은 감소하는 경향을 나타낸다.

그러나 지구조적인 측면을 고려할 때 동일한 지화학적 특성을 보이거나 시기적으로 비슷한 연대를 보이더라도 대자율값은 서로 차이가 난다. 옥천층군 내의 백악기 속리산, 용담지역 화강암의 대자율은 $0.1\sim 5 \times 10^{-3}$ SI인 반면, 경상분지 내의 백악기 마산, 진동지역 화강암의 대자율은 20×10^{-3} SI로 수배 내지 백배 정도의 현격한 차이를 나타낸다. 이는 화강암의 분화정도나 성인보다는 화강암질 마그마의 정치고결될 당시의 지화학적 산화환원 환경의 차이가 더 큰 요인으로 작용

하였을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 산업자원부 출연 연구과제인 “골재자원 부존조사 및 품질관리기술 연구”와 기초기반과제인 “자기특성을 이용한 화강암의 일차구조해석 기초연구” 과제의 수행으로 얻어진 연구결과와 일부임을 밝힌다. 이 논문을 읽고 세심하고 건설적인 지적과 의견들을 제시하여 주신 김용준, 김성원 심사위원님들에게 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 박태호, 좌용주, 2000, 경상분지에 분포하는 백악기~제3기 화강암류의 대지율의 지역적 변화. 지질학회지. 36, 487-498.
- 박희인, 박영록, 1990, 동원광산의 금-은 광화작용. 광산지질. 23, 183-199.
- 박희인, 이찬희, 1990, 둔전광산 북광상의 금-은 광화작용. 지질학회지. 26, 358-370.
- 윤현수, 1995, 포천-의정부일대에 분포하는 화강암류의 산상과 암석화학. 암석학회지, 4, 91-103.
- 윤현수, 홍세선, 이한영, 이병태, 2000, 지포리지역 석재자원 조사연구. 석재·골재자원부존조사 및 품질관리기술(석재편). 한국지질자원연구원. 25-113.
- 윤현수, 홍세선, 2002, 진안-금산지역 백악기 담홍색 화강암류의 암석학적 특성. 한국암석학회 한국광물학회 2002년도 공동학술발표회. 18-20.
- 윤현수, 홍세선, 이윤수, 2002, 포천-기산리 일대에 분포하는 유라기 대보화강암류의 암석 및 암석화학. 암석학회지, 11, 1-16.
- 이윤수, 윤현수, 진명식, 황재하, 2000, 대지율 이방성과 화강암 결에 관한 예비 연구. 한국지질자원연구원논문집. 5, 1-9.
- 이찬희, 박희인, 1994, 삼조광상의 금광화작용과 생성환경. 지질학회지. 30, 395-409.
- 홍세선, 김용준, 김정빈, 1988, 남원지역에 분포하는 남원 화강암체에 대한 암석지화학적 연구. 지질학회지, 24, 132-146.
- 홍세선, 홍영국, 2003, 충남 금산지역 유라기화강암의 지구화학적 특성. 대한자원환경지질학회 춘계 학술발표회. 294-297.
- 홍세선, 2003, 마산, 진동지역 화강암의 지화학적 연구. 대한지질학회 추계학술발표회. 99.
- Blevin, P.L., 1994, Magnetic susceptibility of the Lachlan Fold Belt and New England Batholith granites. AMIRA Project P147B Final Report (unpublished).
- Blevin, P.L., 1996, Using magnetic susceptibility meters to interpret the oxidation state of granitic rocks. 13th Australian Geological Convention. Geol. Soc. Aust., Abstracts. 41, 40.
- Chappell, B.W. and White, A.J.R., 1974, Two contrasting granite types. Pacific Geol., 8, 173-174.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., and Hine, R., 1988, Granite provinces and basement terranes in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. Aust. J. Earth Sci., 35, 505-521.
- Clark, D. A., 1999, Magnetic petrology of igneous intrusions: implications for exploration and magnetic interpretation: Exploration Geophysics, 30, 5-26.
- Dodge, F.C.W., 1972, Variation of ferrous-ferric ratios in the central Sierra Nevada Batholith, U.S.A: 24th International Geological Congress. Proceedings. Section 10. 12-19.
- Irvine, T.N. and Barager, W.R.A., 1971, A guide to the chemical classification of the volcanic rocks. Can. Jour. Earth Sci., 8, 523-542.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Mining Geol., 75th Anniversary volume, 458-484.
- Jin, M.S., Lee, Y.S. and Ishihara, S., 2001, Granitoids and their magnetic susceptibility in South Korea. Resource Geology, 51, 183-203.
- Kwon, S.T., Hong, S.S., 1993, Contrasting TiO₂/MgO ratios in the Namwon granitic complex. J. Petrol. Soc. Korea. 2, 41-51.
- Otoh, S., Jwa, Y.J., Nomura, R., Sakai, H., 1999, A preliminary AMS(anisotropy of magnetic susceptibility) study of the Namwon granite, southwest Korea. Geosciences Journal. 3, 31-41.
- Pecherskiy, D.M., 1965, Statistical analysis of the reasons for the varying magnetization of the granitoids of the Verkhoyansk-Chukocka fold region and the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. Int. Geol. Review, 7, 1963-1976.
- Whalen, J.B., Chappell, B.W., 1988, Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S-type granites of the Lachlan Fold Belt, southeast Australia. Am. Min., 73, 281-296.

(2003년 12월 15일 접수, 2004년 2월 23일 채택)