

금산지역 형석광화작용과 관련된 화강암질암의 지구화학적 자료 해석

진호일* · 전효택* · 민경원**

Geochemical Data Analysis of the Granitic Rocks Potentially Related to Fluorite Mineralization in the Geumsan District

Ho-Il Chin*, Hyo-Taek Chon* and Kyoung-Won Min**

ABSTRACT: About forty ore deposits of $\text{CaF}_2 \pm \text{Au} \pm \text{Ag} \pm \text{Cu} \pm \text{Pb} \pm \text{Zn}$ are widely distributed in the Geumsan district and are believed to be genetically related to the Mesozoic Geumsan granitic rocks. Based on their petrogeochemistry and isotopic dating data, the granitic rocks in this district can be classified into two groups; the Jurassic granitic rocks (equigranular leucocratic granite, porphyritic biotite granite, porphyritic pink-feldspar granite, seriate leucocratic granite) and the Cretaceous granitic rocks (seriate pink-feldspar granite, equigranular alkali-feldspar granite, equigranular pink-feldspar granite, miarolitic pink-feldspar granite, equigranular biotite granite). Spatial distribution of fluorite ore deposits, fluorine contents of granitic rocks and fracture patterns in this district suggest that three granitic rocks (equigranular biotite granite, equigranular pink-feldspar granite, miarolitic pink-feldspar granite) of the Cretaceous period be genetically related to the fluorite mineralization. In these fluorite-related granitic rocks, fluorine is most highly correlated with Cs (correlation coefficient $(r) > 0.9$), and also highly with MnO, U, Sm, Yb, Lu, Zn, Y, Li ($r > 0.7$). Statistically the variation of fluorine in the fluorite-related granitic rocks can be explained in terms of only three elements, such as Lu, CaO and Cs, and the fluorite-related granitic rocks can be discriminated from the fluorite-nonrelated granitic rocks by a linear functional equation of La, Ce, Cs and $F(Z_{\text{Ust}} = -1.38341 - 0.00231F - 0.19878\text{Ce} + 0.38169\text{La} + 0.54720\text{Cs})$. Also, equigranular alkali-feldspar granite is classified into the fluorite-related granitic rocks by means of the linear functional equation (Z_{Ust}).

서 론

금산지역 형석광화대는 옥천습곡대의 중심부에 위치하고 있으며, 주로 석회암과 반암류 및 화강암을 모암으로 하여 약 40개의 형석 및 금·은 광상등이 열수충진과 열수교대의 형태(지정만·계정, 1971; 지정만, 1975; 이대성 등, 1980)로 분포하고 있다(Fig. 1). 형석광상의 경우 광석광물로서 형석만이 산출되는 경우도 있으나, 많은 경우 금, 은, 동, 연, 아연 등을 수반하고 있으며, 중생대로 알려진 저반상의 금산화강암체와 공간적으로 가깝게 분포하고 있다. 따라서 이들 광상들과 화강암체 사이에는 성인적으로 밀접한 관련성이 있을 것으로 생각되어져 왔다(지정만, 1975). 그러나 금산화강암체에 대한 지구화학적 연구는 그동안 체계적으로 수행되어

오지 않다가, 최근에 이르러 진명식 등(1994)과 진호일 등(1995)에 의해 지질연대학적 및 암석지구화학적 연구가 수행된 바 있다. 특히 진호일 등(1995)은 금산 지역내에 다양하게 나타나고 있는 화강암류들을 야외에서의 산출상태와 조암 광물들의 육안 및 현미경하에서의 조직과 함량, K-장석류의 색과 상대적인 함량 등에 따라 크게 9가지 암상의 화강암류(등립 우백질화강암, 반상 흑운모화강암, 반상 홍색장석화강암, 세리에이트(seriate) 우백질화강암, 세리에이트 홍색장석화강암, 등립 알카리장석화강암, 등립 홍색장석화강암, 미아롤리 홍색장석화강암, 등립 흑운모화강암)로 구분한 바 있다(Fig. 2). 또한 암석학적 및 지구화학적 특징과 동위원소 연대측정 결과를 근거로 이러한 9가지 암상의 화강암류중 등립 우백질화강암(ELG), 반상 흑운모화강암(PBG), 반상 홍색장석화강암(PPFG), 세리에이트 우백질화강암(SLG) 등 4가지 화강암류는 주라기에, 그리고 세리에이트 홍색장석화강암(SPPFG), 등립 알카리장석화강암(EAFG), 등립 홍색장석화강암(EPPFG), 미아롤리 홍색장석화강암(MPPFG), 등립 흑운

*서울대학교 자원공학과(Dept. of Mineral & Petroleum Eng. Seoul Nat. Univ., Seoul 151-742, Korea)

**강원대학교 자원공학과(Dept. of Resources Eng., Kangwon Nat. Univ., Chunchon 200-701, Korea)

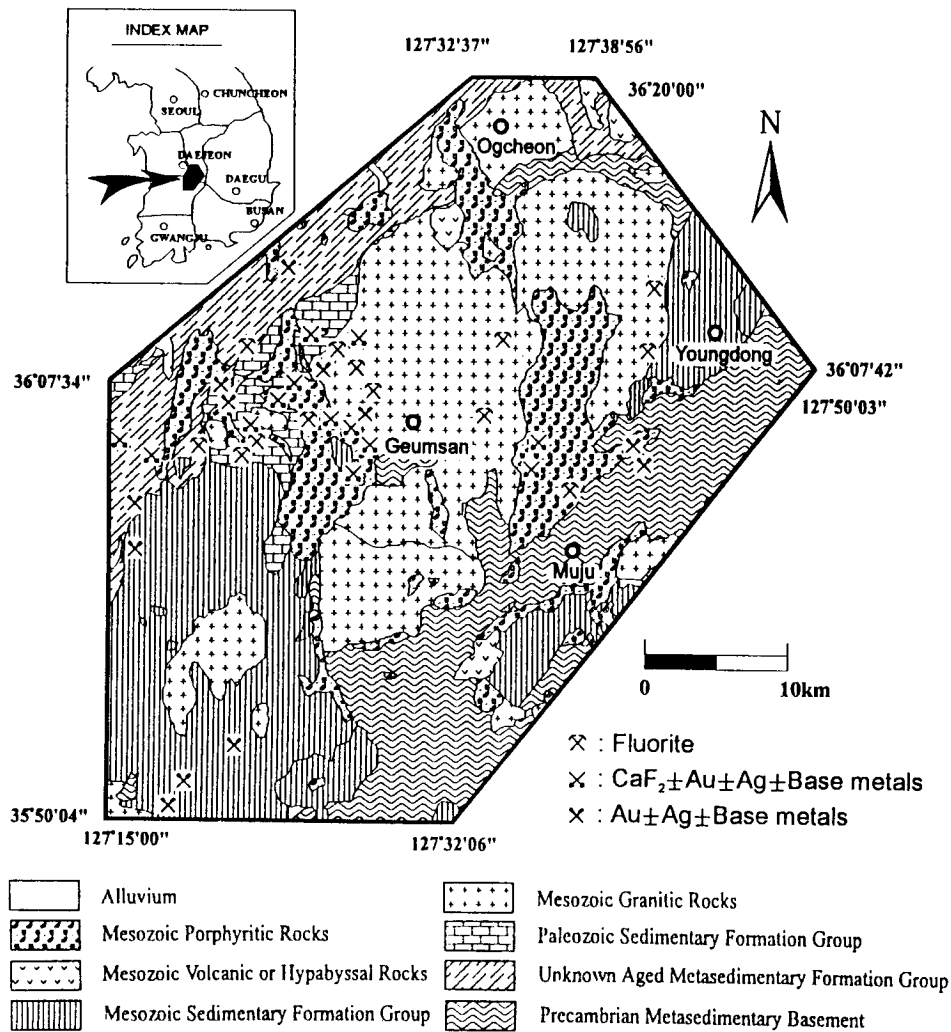


Fig. 1. Simplified geologic map and mine locations of the Geumsan district.

모화강암(EBG) 등 5가지 암상의 화강암류는 백악기에 각각 정지되었으며, 주라기 화강암류의 주된 분화과정은 분별결정작용에 의해, 백악기 화강암류의 주된 분화과정은 부분용융에 의해 이루어졌으며, 백악기 화강암류가 주라기 화강암류보다 좀 더 분화된 특징을 보이는 것으로 보고한 바 있다(진호일 등, 1995).

본 연구의 목적은 금산지역에 분포하는 9가지 암상의 화강암류를 대상으로 암석지구화학적 및 지질연대학적 연구에 의해 얻은 자료를 근거로 지질통계학적인 분석을 통하여, 형석광화작용과 관련 가능성 있는 화강암류를 찾아내어 그들의 지구화학적 특성을 규명하고, 형석광화작용 관련화강암류와 비관련화강암류들간의 지구화학적 차이점을 밝힘

으로써 형석광상 탐사에 있어서의 응용가능성을 모색하는데 그 목적이 있다.

지질 및 광상개요

본 연구 지역은 옥천습곡대의 중서부에 위치하고 있는 지역으로서 행정 구역상 충청남도 금산군과 충청북도 옥천군, 영동군, 전라북도 진안군과 완주군에 걸쳐 있으며, 1/250,000 지질도상에서는 대전도폭의 중앙 하부와 전주도폭의 중앙 상부에 해당되고, 1/50,000 지질도에서는 금산, 용담, 무주, 옥천 도폭과 일부의 대전, 장거리 도폭 등 6개 도폭에 걸쳐 있다. 연구 지역은 주로 편암과 화강편마암 및 호상편마암

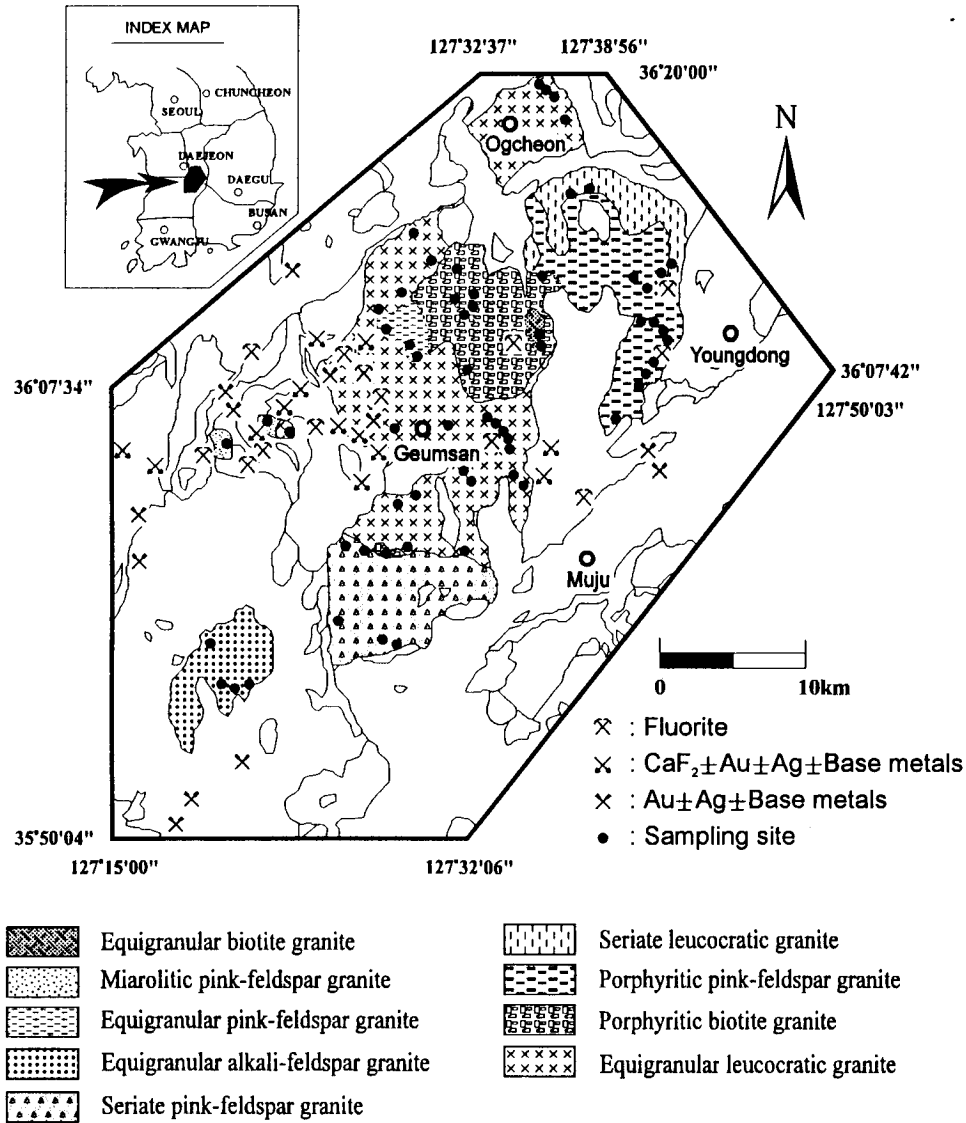


Fig. 2. Sampling sites and granitic rock types of the Geumsan district.

으로 이루어져 있는 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 기저로 하여 녹니석 편암, 천매암, 규암, 흑색 슬레이트, 결정질 석회암 및 석회 규산염암 등으로 구성되어 있는 시대미상의 변성퇴적층과 호상 및 결정질 석회암으로 이루어진 고생대 퇴적층이 분포하며, 이를 중생대 화강암류가 관입한 후 중생대 퇴적층(주로 역암, 사암, 셰일 등으로 구성)과 화산암 및 반심성암(대부분 유문암질 응회암과 석영안산암, 유문암 등으로 구성)이 그 상부를 덮고 있으며, 이를 다시 반암류(주로 석영반암, 규장반암, 미문상반암)가 관입하고 있다(Fig. 1).

본 연구 지역에는 약 40개의 형석 및 금속광상이 중생대 화강암체와 공간적으로 가깝게 분포하고 있으며, 주요 광종으로는 형석과 금, 은이며 경우에 따라 동, 연, 아연, 텅스텐 등을 수반하기도 한다(Fig. 1). 특히 형석만을 배태하는 광상의 경우 주로 석회암과 반암류 및 화강암을 모암으로 하는 열수충진 광상과 열수교대 광상이 혼재된 형태로 나타나며, 금·은 광상의 경우는 열극을 충진한 합금은 석영맥 광상의 형태가 우세하다. 그러나 많은 경우에 있어서는 열수충진 및 열수교대의 형태로 형석이 금, 은, 동, 연, 아연 등과 함께 배태되어 있다. 금산지역의 형석광화작용은 백악

Table 1. Abundances of fluorine in the Geumsan and some major Mesozoic granitoids in Korea. Number of analyzed specimens in parenthesis and unit in ppm.

Granitic rocks	Mean	Range	C.V.(%)***
Equigranular leucocratic granites(28)	601	260-930	25
Porphyritic biotite granites(7)	549	400-740	21
Porphyritic pink-feldspar granites(11)	557	350-860	26
Seriate leucocratic granites(3)	607	560-660	8
Seriate pink-feldspar granites(3)	690	350-1,000	37
Equigranular alkali-feldspar granites(4)	500	130-920	70
Equigranular pink-feldspar granites(5)	796	400-1,260	47
Miarolitic pink-feldspar granites(2)	820	710-930	19
Equigranular biotite granites(2)	1,750	1,700-1,800	4
Cretaceous Wolagsan granite mass*(39)	701	172-1,931	64
Cretaceous Bulgugsa granitoids** (172)	340	35-944	95
Jurassic Daebo granitoids*(26)	621	240-1,451	44
Average contents of granite that is differentiated from the calc-alkaline magma***	700		

*Source : Chon and Min(1989), Chon(1983)

**Source : Jin(1981)

***Source : Tauson(1974)

****C.V. : Coefficient of variation(%)=Standard deviation/Mean ×100

기의 반암류 및 이러한 반암류와 점이적인 관계를 갖거나 또는 후기에 관입한 화강암에 의해서 진행되었을 것이라고 보고된 바 있는데(지정만, 1975), 이러한 근거로는 반암류내에 부존하는 광상이 많다는 점과 이와같은 반암류와 점이적인 관계를 갖는 화강암중에 포획된 석회암이 광화된 경우가 발견된다는 점 등을 들고 있다. 또한 반암과 여기에 포획된 석회암을 직선적으로 접촉하는 화강암의 관입이 있고, 이러한 화강암내에도 소규모의 광체가 부존되며, 석영 반암중에 석회암뿐만 아니라 이를 관입 접촉하여 광화작용을 한 화강암이 동시에 포획된 점 등을 지적하여, 반암류와 형석광화작용을 일으킨 화강암류간에는 서로 선후를 달리하는 관입이 있었으며, 그러한 관입시기는 서로간에 큰 차이가 없었을 것으로 보고된 바 있다(지정만, 1975).

형석광화작용과 관련 가능성 있는 화강암류

본 연구를 위하여 가능한 신선한 화강암을 대상으로, 주로 도로변의 노두와 하천변에서 총 73개의 시료를 체계적으로 채취하였으며(Fig. 2), 주성분원소 11개와 불소를 포함한 미량원소 27개 등 총 38개의 원소를 분석하였다(진호일 등, 1995).

일반적으로 화성암중 불소 함량이 높은 암석의 분포와 형석광상의 분포간에는 밀접한 관련성이 있는 것으로 알려져 있다(e.g. Coats *et al.*, 1963 ; 전효택, 1983 ; 전효택 · 민경원, 1989). 따라서 금산지역에 분포하는 9가지 화강암류와 남한의 중생대 화강암류 및 옥천습곡대내에 분포하는 백악기 월악산화강암류에 대한 불소의 평균함량을 살펴보면(Table 1), 백악기에 해당하는 등립 흑운모화강암은 1,750ppm, 미아롤리 홍색장석화강암은 820ppm, 등립 홍색장석화강암에서는 796ppm으로 calc-alkaline 계열의 마그마로부터 분화된 화강암류중의 평균 불소함량(700ppm; Tauson, 1974) 뿐만 아니라 남한의 주라기와 백악기 화강암류중의 평균 불소함량(각각 621ppm, 340ppm; 전효택, 1983)과 황강리지역 형석광화대의 관련화성암으로 알려져 있는 월악산화강암류 중의 평균 불소함량(701ppm)보다도 높은 값을 보여주고 있다. 또한 금산지역 형석광화작용과 관련된 화강암류는 광상의 부존형태와 모암과의 접촉관계를 고려해 볼 때, 그 관입시기가 반암류와 비슷한 백악기 이후일 것으로 보고된 바 있다(지정만, 1975). 따라서 금산지역에 분포하는 9가지 화강암류중 그 관입시기가 백악기 말에 해당하는 반암류와 유사하고, 또한 형석광상의 분포위치 및 광상부존에 영향을 준 단열 구조의 방향(N20-50W; 지정만, 1975)과 화강암류들간의 공간적 관계 등을 고려해 볼 때, 형석광화작용과 밀접하게 관련 가능성 있는 화강암은 백악기 화강암류중 등립 흑운모화강암(EBG), 미아롤리 홍색장석화강암(MPFG), 등립 홍색장석화강암(EPFG) 등 3가지 암상의 화강암류로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 세가지 화강암류를 '형석관련화강암류(fluorite-related granitic rocks)'로, 그리고 나머지 여섯가지의 화강암류중 특히 형석광화작용과 관련 가능성이 희박한 것으로 판단되는 주라기의 4가지 화강암류(ELG, PBG, PPF, SLG)를 '형석비관련화강암류(fluorite-nonrelated granitic rocks)'로 각각 명명하고 이들 간의 지구화학적 차이점을 규명하고자 한다.

형석광화작용 관련화강암류의 지구화학적 특성

형석관련화강암류(9개 시료)와 형석비관련화강암류(49개 시료)간에 각 원소들의 평균함량중 어떠한 원소들이 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있는지 알아보기 위하여 T-test를 수행하였다. T-test 결과(Table 2)에서 보면 각 원소들에 대해 유의도가 0.05미만으로써 두 집단간에 유의한 차이를 나타내는 원소로는 SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MgO, CaO, K₂O, P₂O₅, Rb, Sr, Ba, Li, Cs, Hf, Th, U, La, Ce, Sm, Yb, Lu, Zn, Y, F 등 25개 원소와 L.O.I.이며, 이중 형석관련화강암류에서 SiO₂, K₂O, Rb, Hf, Th, U, Sm, Yb, Lu, Y, F 등 11개 원소의 평균함량이 높은 값을 보이고 있는데, 이러한 원소

Table 2. Analysis of T-test for major and trace element contents of fluorite-related granitic rocks and fluorite-nonrelated granitic rocks in the Geumsan district.(major elements and loss on ignition : unit in wt.% ; trace elements : unit in ppm)

Elements	Group	Mean	Std. Dev.	2-Tale Prob.
SiO ₂	PRO.	76.97	0.86	0.000
	BAR.	71.36	2.05	
TiO ₂	PRO.	0.06	0.01	0.000
	BAR.	0.39	0.15	
Al ₂ O ₃	PRO.	12.90	0.28	0.000
	BAR.	15.27	0.78	
Fe ₂ O ₃	PRO.	0.55	0.21	0.002
	BAR.	0.95	0.36	
FeO	PRO.	0.69	0.18	0.000
	BAR.	1.54	0.49	
MgO	PRO.	0.03	0.01	0.000
	BAR.	0.67	0.34	
CaO	PRO.	0.43	0.16	0.000
	BAR.	2.27	0.82	
K ₂ O	PRO.	4.25	0.18	0.000
	BAR.	3.50	0.65	
P ₂ O ₅	PRO.	0.01	0.00	0.000
	BAR.	0.12	0.05	
Rb	PRO.	208.4	51.8	0.001
	BAR.	125.4	28.3	
Sr	PRO.	16.7	6.9	0.000
	BAR.	419.6	117.0	
Ba	PRO.	56.8	27.3	0.000
	BAR.	741.9	180.4	
Li	PRO.	14.18	13.31	0.008
	BAR.	24.64	9.98	
Cs	PRO.	2.28	1.25	0.004
	BAR.	3.66	1.27	
Hf	PRO.	6.56	0.88	0.004
	BAR.	5.51	0.96	
Th	PRO.	27.4	7.00	0.000
	BAR.	14.1	4.48	
U	PRO.	4.35	1.74	0.014
	BAR.	2.53	1.05	
La	PRO.	21.1	10.4	0.000
	BAR.	43.1	13.1	
Ce	PRO.	48.9	15.1	0.001
	BAR.	75.3	22.3	
Sm	PRO.	6.39	0.51	0.000
	BAR.	4.78	1.28	
Yb	PRO.	4.99	0.94	0.000
	BAR.	0.79	0.21	
Lu	PRO.	0.66	0.13	0.000
	BAR.	0.10	0.03	
Zn	PRO.	36.9	11.3	0.000
	BAR.	59.1	15.4	
Y	PRO.	22.33	6.06	0.000
	BAR.	5.94	1.78	
F	PRO.	1013.3	496.9	0.032
	BAR.	583.9	139.2	
L.O.I.	PRO.	0.70	0.17	0.000
	BAR.	1.17	0.37	

PRO. : Fluorite-related granitic rocks(9 samples) ; BAR. : Fluorite-non-related granitic rocks(49 samples) ; Std. Dev. : Standard Deviation ; 2-Tale Prob. : 2-Tale Probability

들은 불소와 친화력이 비교적 좋은 것들로 분화 말기에 농축되는 원소들이다. 반면에 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MgO,

CaO, P₂O₅, Sr, Ba, Li, Cs, La, Ce, Zn 등 14개 원소와 L.O.I.의 평균함량은 형석관련화강암류에서 낮은 값을 나타내고 있다.

형석광화작용과 관련된 화강암류와 관련되지 않은 화강암류들에 있어서 원소들간의 상호 관련성을 알아보기 위해 상관계수를 구하여 도시해 본 결과, 형석관련화강암류에 있어서는 주성분 원소들에 비해 미량원소들의 상호간에 좋은 상관관계를 보이고 있는데(Fig. 3), 특히 불소는 Cs과 0.9 이상, 그리고 MnO, U, Sm, Yb, Lu, Zn, Y, Li 등의 원소와는 0.7 이상의 높은 양의 상관관계를 나타내고 있으며, Sr, Ba과는 -0.7 이하의 높은 음의 상관관계를 보여주고 있다. 그러나 형석비관련화강암류에 있어서는 미량원소들에 비해 비교적 주성분 원소들의 상호간에만 양호한 상관관계를 나타내고 있으며, 불소는 어떤 원소와도 좋은 상관성을 보이지 않는다(Fig. 4). 불소의 함량에 영향을 미치는 원소들의 기여도를 예측해 볼 수 있는 하나의 통계적인 방법으로 회귀분석(regression analysis)을 이용할 수 있는데, 본 연구에서는 불소의 함량을 종속변수로 하고 불소를 제외한 주성분 및 미량원소들의 함량을 독립변수로 하였다. 이러한 분석의 궁극적인 목적은 변수들간의 상관관계를 회귀식으로 도출한 후, 독립변수들의 변화에 따른 종속변수의 값을 예측하는데 있으며, 또한 회귀분석을 통해 회귀식에 포함된 독립변수들 중에서 어느 변수가 가장 예측력이 높은 것인지를 검증하는 데에도 이용될 수 있다(Davis, 1986). 따라서 본 연구에서는 금산지역에 분포하는 형석관련화강암류에서 불소 함량이 어떠한 원소들의 함수관계에 의해 변화하며, 또한 어떤 원소가 불소의 함량변화에 가장 중요한 영향을 미쳤는지를 규명하기 위해 분석한 38개의 원소들중 형석관련화강암류와 비관련화강암류들 간에 통계적으로 유의한 차이를 보인 21개의 친석원소들(SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, MgO, CaO, K₂O, P₂O₅, Rb, Sr, Ba, Li, Cs, Hf, Th, U, La, Ce, Sm, Yb, Lu, Y)만을 독립변수로 하여 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 수행하였다(Table 3). 다중회귀분석 방식으로는 중요한 변수(통계적 유의도가 높은 변수) 순으로 투입되다가 통계적으로 유의성이 없는 변수들만 남게되면 분석이 중단되는 단계별 투입방식(stepwise selection method)을 이용하였다. 총 21개의 원소를 독립변수로 하여 단계별로 투입한 다중회귀분석 결과, 3개의 원소(CaO, Cs, Lu)만이 유의한 변수로 회귀식에 포함되었고 나머지 원소들은 제거되었다(Table 3). 즉 3개의 원소만으로도 불소의 함량변화를 약 98.6%(R square) 설명할 수 있음을 나타내 주었는데, 도출된 회귀식은 $F(\text{ppm}) = 2153.637Lu(\text{ppm}) + 1262.831CaO(\text{wt.}\%) + 120.907Cs(\text{ppm}) - 1241.669$ 로 나타났다(Table 3; Fig. 5). 회귀식에 포함된 세 원소들중 Cs, Lu은 형석관련화강암류에 있어서 불소와 좋은 양의 상관관계를 보이는 원소들이며(Fig. 3), CaO는

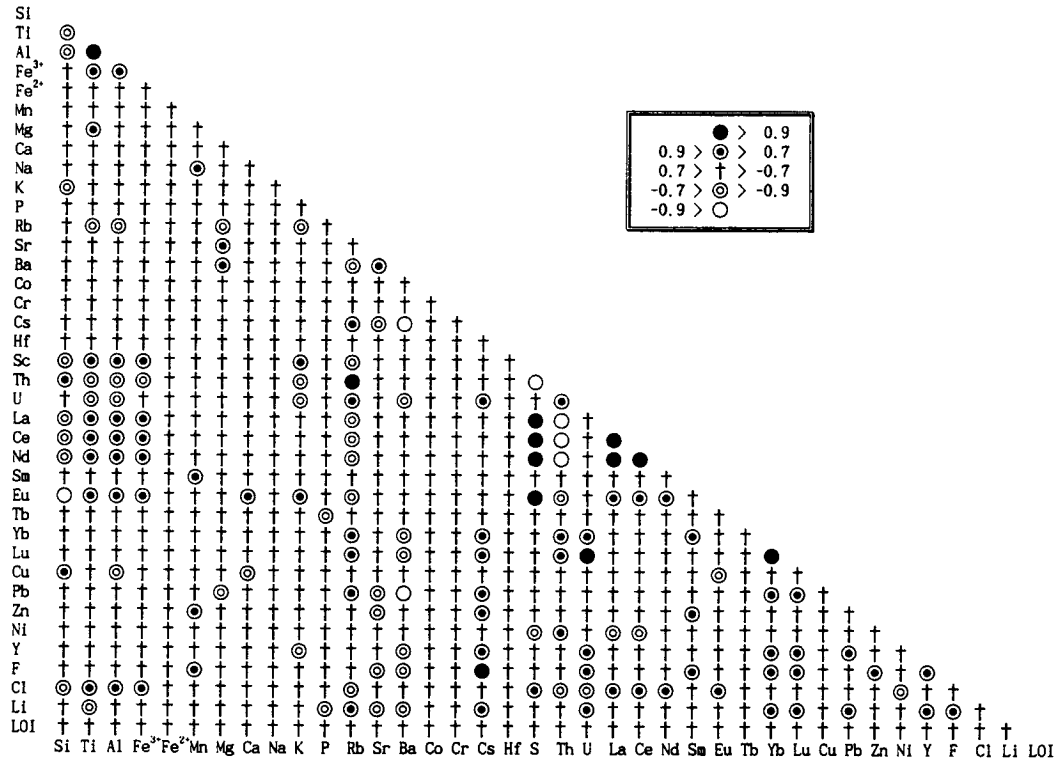


Fig. 3. Correlation coefficients of 37 elements(raw data) and loss on ignition for the fluorite-related granitic rocks(9 samples) in the Geumsan district.

불소와의 상관계수(r)가 0.5377로서 다른 두 원소들보다 상관관계가 비교적 적은 것으로 나타났는데, 이는 Ca와 불소를 함유하는 인회석, 형석 등의 수반광물보다 사장석의 영향으로 인해 두 원소들간의 상관성이 다소 감소되었기 때문으로 판단된다. 또한 산출된 회귀모델의 적합도를 검정한 결과 F값이 118.4이고 자유도가 (3, 5) 로서 0.0000(< 0.05)의 유의수준을 보여 산출된 회귀모델이 적합한 것으로 나타났다(Table 3). 표준회귀계수(standard regression coefficient)는 회귀계수(regression coefficient)를 표준화한 것으로 독립변수들마다 단위가 다를 경우 회귀계수만으로는 그 중요도를 판단할 수 없으므로, 단위를 표준화하여 회귀계수를 산출함으로써 독립변수들의 상대적 중요도를 나타내 주는데, 표준회귀계수의 절대값이 클수록 설명력이 높은 변수를 의미한다. 따라서 표준회귀계수를 구해본 결과, 금산지역에 분포하는 형석관련화강암류에서 불소의 함량변화에 가장 크게 영향을 미친 원소로는 Lu(0.540)이며, 다음으로 CaO(0.412), Cs(0.328)의 순으로 나타났다(Table 3).

다변수 통계처리 방법의 하나인 판별분석(discriminant analysis)은 두개 이상의 집단(종속변수)을 구분하는데 있어서

구분오류를 최소화 할 목적으로 집단간의 분산은 크게하고, 집단내의 분산은 최소가 되도록 독립변수들로 구성된 함수식을 도출하는 분석방법이다(Davis, 1986). 따라서 판별분석은 집단(종속변수) 구분에 도움을 주는 독립변수들을 알아내고, 독립변수들의 선형결합으로 이루어지는 판별식을 도출하며, 집단간 판별능력에 있어서 독립변수들의 상대적 중요도와 판별식에 대한 판별능력의 평가 및 새로운 판별대상에 대한 예측력을 평가하는데 유용하게 이용될 수 있다. 그러나 일반적으로 판별분석에 있어서 판별식을 도출하기 위해서는 투입되는 독립변수들이 다변량 정규분포를 이루어야 하며, 각 집단에 있어서 변수들간의 공분산 매트릭스가 동일해야 한다는 기본 가정을 만족해야 한다. 특히, 표본(시료)의 수가 많을 때에는 이러한 가정에 별로 큰 영향을 받지 않으나, 시료수가 적은 경우에는 상이한 결과를 초래할 수 있으므로 판별분석을 적용하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 형석관련화강암류(9개 시료)와 형석비관련화강암류(49개 시료)의 두 집단(종속변수)을 구분하는데 도움을 주는 원소(독립변수)들을 알아내고 이러한 원소들로 구성되는 판별식을 도출함으로써, 미지의 화강암류에 대한 형석광

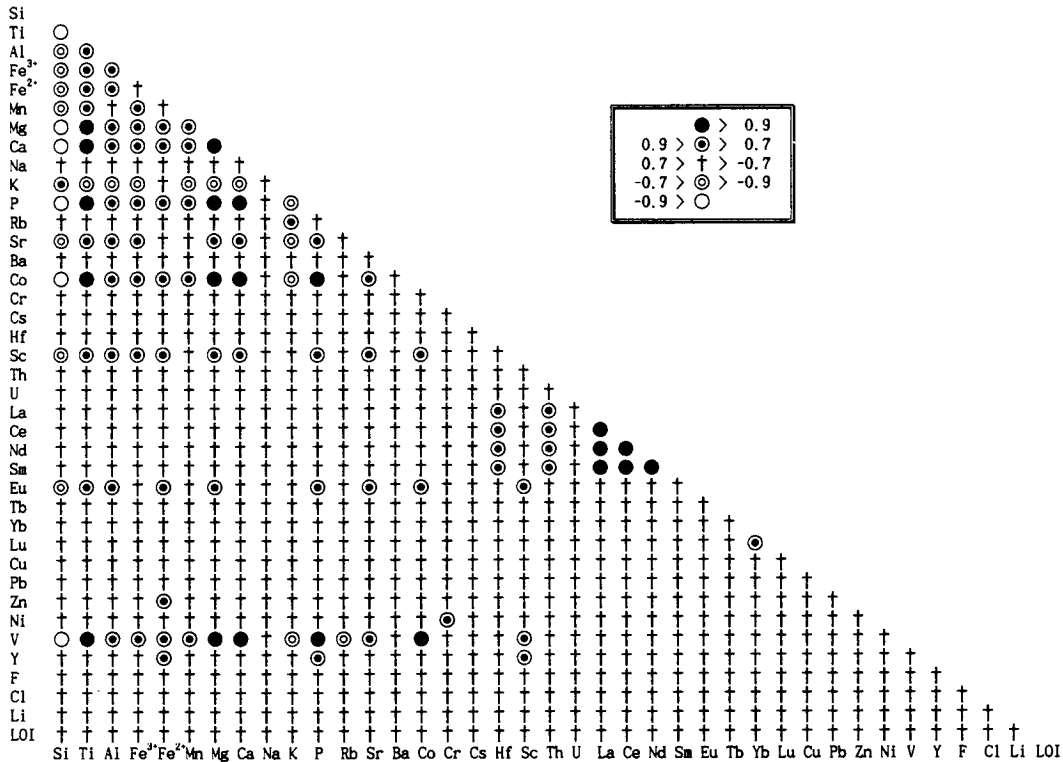


Fig. 4. Correlation coefficients of 37 elements(raw data) and loss on ignition for the fluorite-nonrelated granitic rocks(49 samples) in the Geumsan district.

Table 3. Multiple regression analysis of major and trace elements on F contents(ppm) for the fluorite-related granitic rocks(9 samples) in the Geumsan district.

SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, K ₂ O, P ₂ O ₅ Rb, Sr, Ba, Cs, Hf, Th, U, La, Ce, Sm, Yb, Lu, Y, Li					
Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean of Squares	F value	Significant F
Linear Regression	1947968.1	3	649322.7		
Residual	27431.9	5	5486.4	118.4*	0.0000(<0.05)
R Square	Variable	Regression Coefficient	Standard Regression Coefficient	T	Significant T
0.98611	Cs	120.907	0.328	2.747	0.0404
	CaO	1262.831	0.412	7.346	0.0007
	Lu	2153.637	0.540	4.630	0.0057
	(constant)	-1241.669		-4.933	0.0043

*: Significant at the α=5% level of significance

화작용의 관련성 여부를 예측하는데 기여하는 원소들을 선택할 목적으로 판별분석을 수행하였다. 또한 판별분석은 총

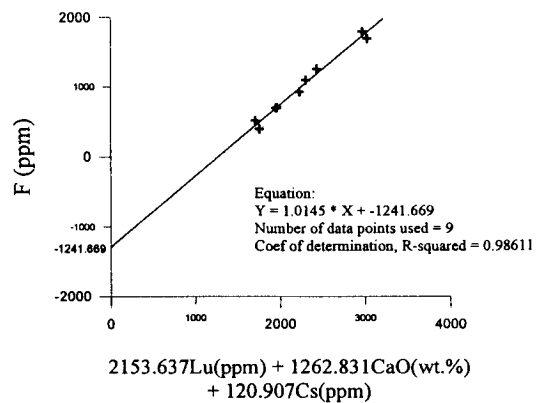


Fig. 5. Multiple regression function of some major and trace elements on F contents(ppm) for the fluorite-related granitic rocks(9 samples) in the Geumsan district.

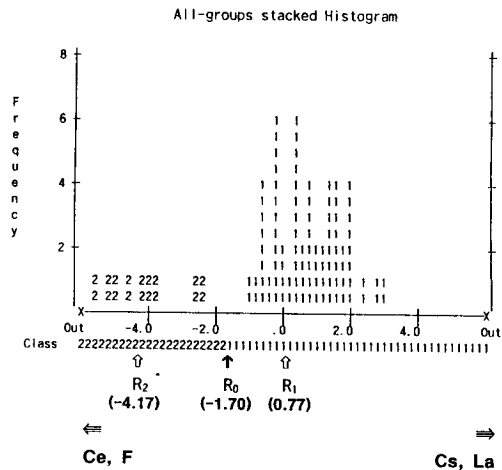
38개의 분석원소들중 카이-스퀘어 분포(chi-square distribution)를 통해 분석원소들의 정규분포성을 각각 검증하고, F-test를 실시하여 두 집단에 대한 공분산 매트릭스의 유사성을 검증한 후, 판별분석을 위한 기본 가정에 위배되지 않으

Table 4. Discriminant analysis of some trace elements for the granitic rocks in the Geumsan district.

Cs, La, Ce, F		
Statistics	Discriminant Function	
Eigenvalue	3.3006	
Percent of Variation(%)	100.00	
Canonical Correlation	0.8761	
Wilks' Lambda	0.2325	
Significance Level	0.0000(<0.05)	
Coefficient	Standardized Canonical Discriminant Function	Unstandardized Canonical Discriminant Function
Cs	0.70232	0.54720
La	4.86491	0.38169
Ce	-4.25509	-0.19878
F	-0.52504	-0.00231
(constant)		-1.38341
Classification	Group 1	Group 2
	100.0%	100.0%

Training set : Group 1 : Fluorite-nonrelated granitic rocks(49 samples)
 Group 2 : Fluorite-related granitic rocks(9 samples)

면서, 두 집단간의 평균함량에 있어 통계적으로 유의한 차이를 보이는 3개의 친석원소들(Cs, La, Ce)과 또한 이러한 기본 가정에는 완전히 부합되지는 않지만 형석광화작용과 밀접한 관련성이 있는 불소 등 4개의 원소만을 대상으로 하였다. 판별분석에 있어서 판별식의 도출을 위해서는 F 통계량과 Wilks' Lambda(λ = 집단내 분산/총분산)를 이용하여 유의한 변수를 단계적으로 투입하는 stepwise 방식(Fedikow and Turek, 1983)을 사용하였다. 판별분석 결과, 분석에 투입한 4개 원소들 모두가 형석관련화강암과 형석비관련화강암을 구분하는데 유의한 원소로 도출되었으며(Table 4), 또한 이러한 원소들의 선형결합으로 이루어진 표준화된 판별식(standardized canonical discriminant function)과 비표준화된 판별식(unstandardized canonical discriminant function)의 유의성을 검증한 결과, eigenvalue(집단간의 분산/집단내의 분산)는 3.3006을 나타냈고, 판별식의 설명력을 의미하는 정준상관계수(canonical correlation)는 0.8761을 보였으며 Wilks' Lambda는 0.2325, 유의수준은 0.0000(<0.05)로써 판별식에 의한 집단간 판별점수의 차이는 유의한 것으로 나타났다(Table 4). 일반적으로 표준화된 판별식은 자료의 원래 변수값(원소함량)을 평균=0, 표준편차=1로 표준화하여 이용할 경우에 적용되는 판별식으로서 변수들의 단위를 통일하여 적용할 수 있는 식이므로, 그 변수들의 계수들에 대한 절대값의 크기는 바로 집단구분에 있어서 상대적인 중요도를 의미하기도 하는데, 본 연구에서의 표준화된 판별식은 $Z_s = 4.86491La + 0.70232Cs - 0.52504F - 4.25509Ce$ 으로 도출되었다(Table 4).



$Z_{ust} = -1.38341 - 0.00231F - 0.19878Ce + 0.38169La + 0.54720Cs$
 Fig. 6. Plot of scores of discriminant function for the fluorite-related granitic rocks(group 2) and fluorite-nonrelated granitic rocks(group 1) in the Geumsan district.
 R_0 : Discriminant index ; R_1 : Centroid of Group 1 ; R_2 : Centroid of Group 2.

따라서 본 연구지역에서는 형석관련화강암류와 형석비관련화강암류를 구분하는데 있어서 La, Ce, Cs, F의 순으로 중요하게 기여하였는데, 특히 형석관련화강암류일수록 Ce와 F, 형석비관련화강암류일수록 La와 Cs이 두 집단을 구분하는데 중요하게 기여한 것으로 나타났다(Fig. 6). 한편 비표준화된 판별식은 원래의 자료(원소함량)를 그대로 대입하여 손쉽게 판별점수(discriminant score)를 구할 수 있는 식으로서 $Z_{ust} = -1.38341 - 0.00231F - 0.19878Ce + 0.38169La + 0.54720Cs$ 으로 도출되었다(Table 4). 이 식에 의해 구해진 각각의 시료에 대한 판별점수는 두 집단의 경계점인 판별지수(discriminant index; R_0)와 비교되어 어느 집단에 해당되는지를 판단할 수 있게 해준다. 여기서 두 집단의 판별지수(R_0)는 다음과 같이 계산된다.

$$R_0 = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

R_0 = 판별지수(discriminant index)

R_1 = 집단 1의 평균 판별점수(centroid)

R_2 = 집단 2의 평균 판별점수(centroid)

비표준화된 판별식에 의해 형석관련화강암류(9개 시료)와 형석비관련화강암류(49개 시료)의 시료들에 대한 판별점수를 구하고, 각 집단에서의 평균 판별점수(centroid)를 계산하여 산출된 판별지수(R_0)는 $R_0 = -1.7002$ 로 나타났다. 따라서 비

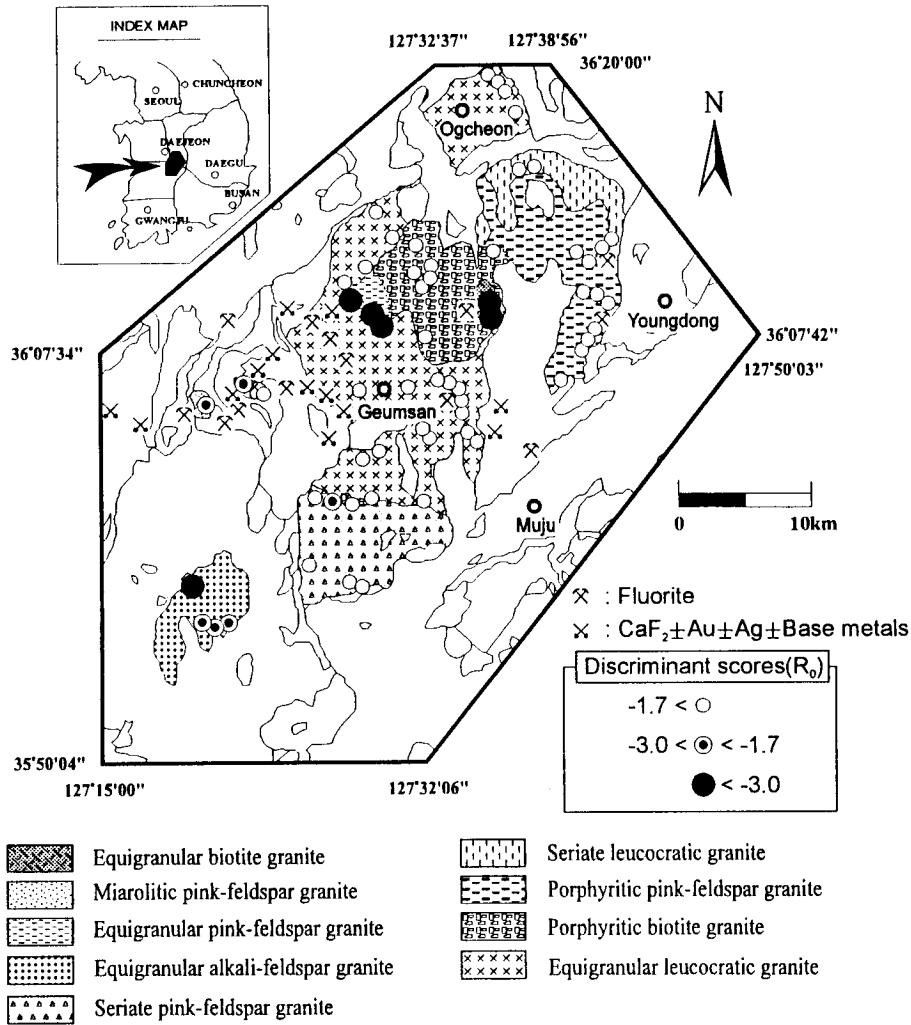


Fig. 7. Plot of discriminant scores on sample locations.

표준화된 판별식으로 부터 계산된 판별점수가 판별지수 R_0 (-1.70)보다 큰 경우 형석비관련화강암류로 분류되고, 작은 값을 갖는 경우에는 형석관련화강암류로 분류되는데(Fig. 6), 이러한 기준에 의하면 금산지역에 분포하는 형석관련화강암류와 형석비관련화강암류간의 판별력은 Cs, La, Ce, F 등의 4가지 원소로 구성되는 선형함수식에 의해, 실제로 형석비관련화강암류를 형석비관련화강암류로 올바르게 판별할 확률은 100%(49개 시료중 49개 시료)로 나타났고, 또한 형석관련화강암류를 형석비관련화강암류로 올바르게 판별할 확률도 100%(9개 시료중 9개 시료)를 보여주어, 전체적으로 두 집단을 올바르게 판별할 확률은 100%로 나타났다(Table 4). 또한 이와같이 얻어진 판별결과가 어느정도 판별력을 갖는

것인지 평가해 보기 위한 기준으로 C proportional 방식을 이용하였는데, C proportional 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C \text{ proportional} = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\text{집단 } i \text{의 빈도수}}{\text{전체 표본수}} \right\}^2 \times 100(\%)$$

즉, 이는 각 집단의 비를 제공하여 더한 확률로, 정확히 판별할 수 있는 확률을 비교기준으로 하는 것으로서 본 연구에서는

$$C \text{ proportional} = \left[\left(\frac{49}{58} \right)^2 + \left(\frac{9}{58} \right)^2 \right] \times 100 = 73.78\%$$

으로 나타나 비표준화된 판별식 $Z_{\text{cal}} = -1.38341 - 0.00231F$

Table 5. Geostatistical characteristics of the granitic rocks in the Geumsan district.

Petrography	Fluorite mineralization	Average fluorine contents (ppm)	Relatively enriched elements	Highly correlated elements with fluorine	Multiple regression analysis(F, CaO, Cs, Lu)	Discriminant analysis (Cs, La, Ce F)	Possibility of fluorite mineralization (Discriminant index = R_0)
Equigranular leucocratic granite			TiO ₂ Sr Al ₂ O ₃ Ba Fe ₂ O ₃ Li Fe ₂ O ₃ Li FeO Cs MgO La CaO Ce P ₂ O ₅ Zn	None			
Porphyritic biotite granite	Unrelated (49 samples)	579				La	$R_0 > -1.70$
Porphyritic pink-feldspar granite					Cs		
Seriate leucocratic granite					V		
Seriate pink-feldspar granite	?					$Z_{Cs} = -1.38341$ $-0.00231F$ $-0.19878Ce$	Impossible
Equigranular alkali-feldspar granite	?					$+0.38169La$ $+0.54720Cs$	Possible
Equigranular pink-feldspar granite	Related (9 samples)	1,122	SiO ₂ K ₂ O	Cs (>0.9)	F(ppm) = 2153.6Lu(ppm) + 1262.8CaO(wt.%) + 120.9 Cs(ppm) - 1241.7	Λ Ce F	$R_0 < -1.70$
Miarolitic pink-feldspar granite			Rb Hf	MnO U			
Equigranular biotite granite			Th U	Sm Yb (>0.7)			
			Sm Yb Lu Y F	Lu Zn Y Li			
			Sr Ba (<-0.7)				

-0.19878Ce + 0.38169La + 0.54720Cs에 의해 형석관련화강암과 형석비관련화강암간의 판별력은 약 26%(100% - 74%) 향상되었다.

형석광상 탐사에 있어서의 지질통계학적 응용 가능성

본 연구지역에 분포하는 9가지 화강암류중 형석광화작용과의 관련성 여부가 분명하지 않은 백악기의 세리에이트 홍색장석화강암(SPFG; 6개 시료)과 등립 알카리장석화강암(EAFG; 4개 시료)을 대상으로 판별분석에 의해 도출된 비표준화된 판별식을 이용하여 형석관련화강암으로서의 가능성을 검토하였다. 비표준화된 판별식으로부터 계산된 판별점수에 의하면 등립 알카리장석화강암류는 4개의 시료 모두 판별지수($R_0 = -1.70$)보다 낮은 값을 보여 형석관련화강암으로서의 지질통계학적 가능성을 나타내었다(Fig. 7). 이는 지금까지 등립 알카리장석화강암체 주변에서 형석광상이 발견된 적은 없으나, 이러한 화강암체를 대상으로 석산개발을 위한 시추조사에서 소폭의 형석맥이 발견된 바 있다는 점을 감안할 때, 특히 판별지수가 -3.0 이하의 낮은 값을 보이는 지점 부근에서는 형석광상의 부존가능성이 높을 것으로 판단된다(Fig. 7). 또한 세리에이트 홍색장석화강암류는 6개의

시료중 북서부의 암체 경계부에 위치하는 1개의 시료만이 -2.7의 판별지수를 보여 형석관련화강암류로 분류되었는데 (Fig. 7), 이는 세리에이트 홍색장석화강암이 관입 정치시 주변암에 의한 오염의 영향(진호일 등, 1995)으로 지구화학적 교란을 받아 생긴 결과로 판단된다. 따라서 판별분석의 비표준화된 판별식에 의해 구한 판별지수를 근거로 할 때 등립 알카리장석화강암은 형석관련화강암류로 생각되며, 세리에이트 홍색장석화강암은 형석비관련화강암으로 판단된다 (Table 5).

결론

금산지역에 분포하는 9가지 암상의 화강암류를 대상으로 암석지구화학적 및 지질연대학적 연구에 의해 얻은 자료(진호일 등, 1995)를 근거로 지질통계학적인 분석을 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 금산지역에 분포하는 9가지 암상의 화강암류중 그 관입시기가 백악기 말에 해당하는 반암류와 유사하며, 화강암류중의 평균 불소함량, 화강암류와 형석광상간의 공간적 관계 및 광상부존에 영향을 준 단열구조의 방향과 화강암류들간의 공간적 관계 등을 고려할 때 형석광화작용과 관련된 화강암은

등립 혹은모화강암, 미아몰리 홍색장석화강암, 등립 홍색장석화강암 등 3가지 화강암류로 판단된다.

2) 형석광화작용과 관련된 화강암류(형석관련화강암류; EBG, MPFG, EPFG)와 관련 가능성이 희박한 화강암류(형석비관련화강암류; ELG, PBG, PPF, SLG)간에 원소들의 평균함량에 대한 T-test 통계분석 결과 SiO₂, K₂O, Rb, Hf, Th, U, Sm, Yb, Lu, Y, F 등의 평균함량은 형석관련화강암류에서 통계적으로 유의한 차이를 보이며 높은 값을 나타내었는데, 이러한 원소들은 불소와 친화력이 비교적 좋은 것들로 분화말기에 농축되는 원소들이다. 반면에 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MgO, CaO, P₂O₅, Sr, Ba, Cs, La, Ce, Zn, Li 등의 평균함량은 형석비관련화강암류에서 낮은 값을 나타내었다.

3) 형석관련화강암류와 형석비관련화강암류들에 있어서 원소들의 상관계수를 구해 본 결과, 형석관련화강암류에 있어서는 주성분 원소들에 비해 미량원소들의 상호간에 좋은 상관관계를 보여 주었는데, 특히 불소는 Cs과 0.9 이상, 그리고 MnO, U, Sm, Yb, Lu, Zn, Y, Li 등의 원소들과는 0.7 이상의 높은 양의 상관계수를 나타내었으며 Sr, Ba과는 -0.7 이하의 높은 음의 상관계수를 보여 주었으나, 형석비관련화강암류에 있어서는 미량원소들에 비해 비교적 주성분 원소들의 상호간에만 양호한 상관관계를 나타내었으며, 불소는 어떤 원소와도 좋은 상관성을 보이지 않았다.

4) 금산지역의 형석광화작용과 관련된 화강암류를 대상으로 다중회귀분석을 수행한 결과 CaO, Cs, Lu 등 3개 원소만으로 불소의 함량변화를 약 98.6%(R-square) 설명할 수 있었으며, 이 중 Lu, CaO, Cs의 원소순으로 형석관련화강암류에서의 불소 함량변화에 크게 영향을 미친 것으로 나타났다.

5) 형석관련화강암과 형석비관련화강암간의 판별분석 결과, 투입한 4개 원소들(Cs, La, Ce, F) 모두가 두 집단을 구분하는데 유의한 원소로 도출되었는데, 형석관련화강암류일수록 Ce과 F, 형석비관련화강암류일수록 La과 Cs이 두 집단을 구분하는데 중요하게 기여한 것으로 나타났다. 또한 형석관련화강암류와 형석비관련화강암류간의 판별력은 Cs, La, Ce, F 등의 4가지 원소로 구성되는 선형함수식($Z_{\text{lin}} = -1.38341 - 0.00231F - 0.19878Ce + 0.38169La + 0.54720Cs$)에 의해 전체적으로 100%로 나타났으며, 판별식을 사용하지 않을 때보다 약 26%의 판별력이 향상되었다.

6) 형석광화작용과의 관련성 여부가 분명하지 않은 백악

기의 세리에이트 홍색장석화강암류와 등립 알카리장석화강암류를 대상으로 판별분석을 수행한 결과 비표준화된 판별식에 의해 구한 판별지수를 근거로할 때 등립 알카리장석화강암은 형석관련화강암류로 생각되며, 세리에이트 홍색장석화강암은 형석비관련화강암으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 연구수행과제(KOSEF 931-0400-005-2)의 일부이며, 또한 전략광물자원연구센터의 일부 연구비 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

이대성, 지정만, 이대운 (1980) 옥천지향사대에서 화성활동에 의한 광화작용의 유형에 관한 연구. 광산지질학회지, v. 13, p. 167-184.
 전효택 (1983) 월악산화강암체의 암석지구화학적 특징과 광화작용과의 관련성. 대한광산학회지, v. 20, p. 199-208.
 전효택, 민경원 (1989) 국내 불소 광화작용과 관련된 화강암류에서의 불소의 분포특징과 지시원소로서의 응용연구. 한국자원공학회지, v. 26, p. 342-353.
 지정만 (1975) 남한의 형석광상의 성인에 관한 연구. 광산지질학회지, v. 8, p. 25-56.
 지정만, 계정 (1971) 남한의 형석광상. 지질광상조사연구보고, 제 13호, p. 1-367.
 진명식, 신성천, 김성재, 주승환, 지세정 (1994) 옥천습곡대 중서부지역 화강암과 반심성암의 동위원소연대와 화성활동사: 동위원소지질연구 KR-93-1G-2, 한국자원연구소, 54p.
 진효일, 민경원, 전효택, 박영석 (1995) 금산지역에 분포하는 화강암류의 암석지구화학. 자원환경지질, v. 28, p. 123-137.
 Coats, R. R., Goss, W. D. and Rader, L. F. (1963) Distribution of fluorine in unaltered silicic volcanic rocks of the western conterminous United States. Econ. Geol., v. 58, p. 941-951.
 Davis, J. C. (1986) Statistics and data analysis in geology: John Wiley & Sons Inc., 602-607p.
 Fedikow, M. A. F. and Turek, A. (1983) The application of stepwise discriminant analysis to geochemical data from the host rocks of the Sillurian Pb-Zn-Ag deposit, Kimberly, B. C., Canada. Jour. Geochem. Explor., v. 18, p. 231-244.
 Jin, M. S. (1981) Petrology and Geochemistry of the Cretaceous Granitic Rocks in Southern Korea: Unpublished, Ph. D. thesis in Seoul National University, 144p.
 Tauson, L. V. (1974) The geochemical types of granitoids and their potential ore capacity (ed., M. Stemprok); Metallization Associated with Acid Magmatism. Geological Survey, Prague, v. 1, p. 221-227.

1995년 8월 8일 원고접수