

상동 및 울진지역 주석 화강암질암의 지구화학 자료에 대한 다변량해석

전효택* · 정영욱** · 손창일*

Multivariate Analysis of the Geochemical Data of Tin-bearing Granitoids in the Sangdong and the Ulchin Areas, Korea

Hyo-Taek Chon*, Young-Wook Cheong** and Chang-Il Son*

ABSTRACT: Tin mineralizations in South Korea have been found only in the Ulchin and Sangdong areas. They appear to be in close spatial association with the Wangpiri granitoid in the Ulchin area, and the Nonggeori and Naedeogri granites in the Sangdong area. However, previous works have revealed that there are considerable differences in geological setting, mineralogical and geochemical compositions among these granitoids concerned.

The roles of discriminant and multiple regression analysis have been examined to establish geochemical differences among the tin-granitoids and to identify elements relating to tin mineralizations. The data set used in this study consists of 60 observations with 29 elements which are cited from pre-existing publications. A stepwise discriminant analysis determined the group of variables that differentiate between samples from four training sets; Buncheon, Wangpiri, Nonggeori and Naedeogri granitoids. These granitoids were most effectively discriminated on the basis of major elements FeO, CaO and P₂O₅ and also by the trace elements Rb and Zr. Results of the multiple regression analysis shows that the level of Sn in granitoids depends positively on ones of MnO, Rb and FeO and negatively P₂O₅.

Graphical representation of discriminant scores on sampling locations greatly aid recognition of differences in the geochemical characteristics in terms of spatial distribution of granitoids examined. The application of the discriminant analysis provides a potential means of identifying and comparing geochemical characteristics.

서 론

주석은 세계 여러곳에서 주석광화작용과 관련된 화강암류중에 부화되는 원소로 알려져 있으며 주석광상 및 관련 화강암에 대하여 지질학적, 광물학적, 지구화학적, 동위원소 및 유체포유물 등의 연구들이 최근에 활발히 진행되어 왔다(Schwartz and Surjono, 1990a,b; Lehmann and Hamanto, 1990; Pollard et al., 1991; Swanson et al., 1988; Witt, 1988; Coetzee and Twist, 1989; Charoy and Pollard, 1989; Heinrich, 1990).

국내의 주석광화작용은 선캄브리아기의 화강암질암과 공간적으로 밀접히 관련된 것으로 알려져 있으며 국내의 주석광상은 광범위한 선캄브리아시대의 화강암질암 분포

지역중 일부지역인 경북 울진지역과 강원도 상동지역에만 국한되어 분포되어 있다. 울진 및 상동지역 함주석 화강암은 지구화학적으로 친화강암원소들, 예를들면 Sn, Li, Rb, Be, F (특히 울진지역) 및 B (특히 상동지역) 등의 원소들이 부화되어 있다 (전효택 · 이덕원, 1987a,b; 전효택 등, 1989). 주석광상은 각각 greisen, albitite, 석영맥 (울진지역) 및 페그마타이트 (상동지역)에 배태되어 있으며 울진지역 주석광상은 Cornish style로, 상동지역 주석광상은 Thai style로 구분된다 (Manning, 1986; 이덕원, 1988).

현재까지 국내 주석광상에 대해 수행된 연구는 크게 2가지로 분류해 볼 수 있다. 즉 주석광상의 광물, 지질 및 함주석 화강암질암의 분화정출과정에 초점을 맞춘 주석광상의 성인, 지질년대 및 모델링 도출 (문상호, 1990; 김수영, 1988; Chon and Shimazaki, 1993)과 함주석화강암의 부화원소들 혹은 원소쌍의 대비를 이용한 암석지구화학적 연구 (전효택 등, 1986; 전효택 · 이덕원, 1987a,b;

* 서울대학교 공과대학 자원공학과 (Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

** 한국자원연구소 자원탐사연구부 (KIGAM)

Chon et al., 1988)들로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 함주석 화강암지대로 알려져 있는 상동 지역의 농거리화강암 및 내덕리화강암 그리고 울진지역의 분천화강편마암 및 왕피리화강암질암에 대한 기존의 화학 분석자료 (전효택 · 이덕원, 1987a,b; 이덕원, 1988)를 이용하여 편별분석 및 회귀분석을 통해 다변수 자료를 소수의 pseudo-variable로 자료를 축소화하여 첫째 암체간의 지구화학적 차이점을 나타내주는 원소들을 도출하고, 둘째 주석함량과 통계적으로 유의한 관련성을 갖는 원소들을 규명하며 셋째 pseudo-variable를 시료채취점에 점시하여 화강암질암의 지구화학적 동질감 혹은 이질감을 현시 (visualisation)하며 탐사활용성을 제시하고자 함이 본 연구의 목적이다.

대상암체의 지구화학적 특징

연구대상암체들은 모두 선캄브리아시대의 화강암질암이지만 각 암체의 규모, 형태와 광물조성 특히 수반광물들의 종류 및 함량에 있어서 상당한 차이를 보인다.

울진지역

울진지역의 주석광상들 즉 울진광산 (구 왕피리광산, 장재광산), 유창광산, 동석광산 (구 삼덕광산)은 분천화강편마암의 남단에서 북동쪽으로 돌출하여 왕피리지역을 지나는 암지상 암체 (왕피리화강암질암)의 경계부를 따라 밀집 분포한다 (Fig. 1).

울진지역에서는 석석이 상동지역과는 달리 페그마타이트에서는 거의 산출되지 않고 주로 석영과 백운모로 구성된 greisen과, 석영과 albite로 구성된 석영 albitite내에 산점상으로 분포한다. 광맥들은 일반적으로 모암과의 경계부에서 greisen화 하였으며 주로 백운모와 석영으로 구성되고, 석석, Li 운모, 황옥, 형석 등을 소량 함유하며 대부분 엽리구조를 보인다. 석석은 엽리구조에 직각방향으로 파쇄되어 그 쪼개진 틈을 석영과 백운모의 세맥들이 충전하고 있다.

상동지역

상동지역에서는 각희, 순경 및 성덕 주석광산들이 개발된 바 있는데 각희 주석광산은 농거리화강암에 인접하고 성덕 주석광산은 내덕리화강암에 가까운 반면, 순경 주석광산은 두 화강암체의 중간에 위치하고 있다 (Fig. 1). 이들 세 광산은 지질 광상학적 견지에서 동일광상의 부분들로

판단되고 두 화강암체간의 거리는 5 km 정도에 불과하다. 윤현수 · 이대성 (1986)에 의하여 측정된 성덕 및 순경광산 지역 페그마타이트들의 K/Ar 연대가 1,773~1,792 Ma로서 두 화강암체의 연대가 비슷하다. 이러한 공간적, 시간적 관계는 두 화강암체 중 적어도 어느 하나가 혹은 둘 다 이 지역 주석광화작용과 성인적으로 관련되었을 가능성을 암시하는 것으로 판단된다. 김수영 (1988)은 암석의 분화 지수와 화학성분 및 광물화학적 조성 변화에 대한 연구를 통하여 상동지역의 페그마타이트는 내덕리화강암에서 분화된 산물로 파악하고 이들 가운데 함석석 페그마타이트는 기체분화작용을 받아서 형성된 복합 페그마타이트로 해석하였다. 그러나 울진지역과 같은 greisen, albitite 또는 석영맥에 의한 광화작용은 확인되지 않는다.

지구화학적 특징

분천화강편마암의 일부 화학분석 자료를 제외하면 대부분은 비교적 SiO₂ 함량이 높으며 알칼리가 낮은 subalkaline 영역에 속하며 고도로 분화된 지구화학적 특성을 지닌다. 분천화강편마암에서는 SiO₂ 함량의 변화가 심한데 비하여 기타 암체에서는 SiO₂ 함량의 변화폭이 작다. MnO 함량의 경우 왕피리화강암질암에서 부화되어 있으나 농거리 및 내덕리화강암에서는 낮은 특징을 보이며 P₂O₅는 그 반대경향을 나타낸다. SiO₂에 대한 Li, Rb, F, Sn 및 Be의 함량변화는 분천화강편마암의 경우 다른 암체들에서보다 Li, Rb, F, Sn 및 Be의 함량이 낮게 점시되나 왕피리화강암질암에서 특징적으로 부화되어 있다. 분천화강편마암을 제외하면 CaO는 매우 고갈되어 있고 농거리 및 내덕리화강암에서 P₂O₅의 부화가 확인된다 (전효택 · 이덕원, 1987a,b; 이덕원, 1988). 울진지역 왕피리화강암질암에서는 형석, 황옥 및 석석이 수반되고 농거리 및 내덕리화강암에서는 전기석이 수반된다는 점에서 울진지역의 왕피리화강암질암은 F의 활동도가 높았던 암체로서, 상동지역의 농거리 및 내덕리화강암은 B의 활동도가 높았던 암체로 해석될 수 있어서 국내의 주석광상을 Manning (1986)에 따라 분류하면, 울진지역의 주석광상은 Cornish style (F-rich magmatic province)로, 상동지역의 주석광상은 Thai style (B and H₂O-rich magmatic province)로 구분할 수 있으며 따라서 울진 및 상동지역의 주석광상의 특성이 지역적으로 대비가 가능하다.

Mn/Fe 및 Ta/Nb의 분화특성은 F, Li 및 Rb의 활동도에 의해 지배되는데 Li 및 F이 풍부한 환경에서는 Mn의 부화가 촉진되며 lepidolite광상이 형성되지만 Li 및 F이 결여된 환경에서는 녹주석-콜럼바이트형 광상으로 진행된

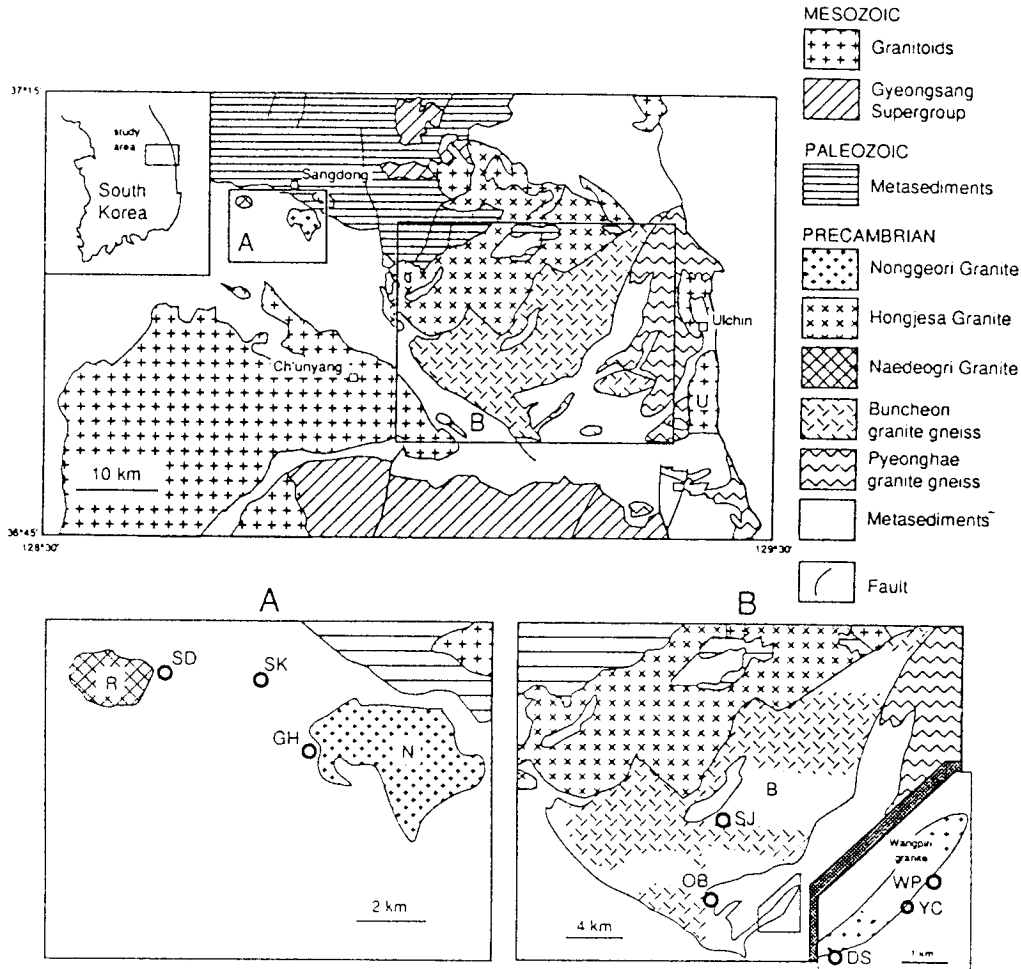


Fig. 1. Geological map of the Sangdong (A) and the Ulchin (B) areas. SD (Seongdug Sn mine); SK (Soonkyeong Sn mine); GH (Gakhi Sn mine); SJ (Ssangjeon W mine); OB (Ogbang W-F mine); WP (Wangpiri Sn mine); YC (Yuchang Sn mine); DS (Dongseog Sn mine); U (Ulchin granite); R (Naedeogri granite); N (Nonggeori granite); B (Buncheon granite gneiss).

다 (Cerny, 1986). 이러한 연구결과로 미루어 볼 때 상동 지역에 비해 울진지역 (왕피리화강암질암)의 Mn의 부화는 Li 및 F의 높은 활동도에 기인한 것으로 생각할 수 있으며 또한 이와같은 관점에서 김수영 (1988)은 상동지역의 합주석 페그마타이트는 Li 및 F이 고갈된 환경하에서 녹주석-콜럼바이트형 광상으로 진행되었다고 보고한 바 있다. Li-Sn-F 삼각도에 의한 울진지역 왕피리화강암질암 (전효택·이덕원, 1987a; 문상호, 1990) 및 농거리화강암 (전효택·이덕원, 1987b)은 합주석 화강암의 영역에, 농거리 화강암과 인접한 상동지역 내덕리화강암은 보통화강암의 영역에 투영된 바 있다.

다변량 해석 결과 및 고찰

합주석 화강암질암의 통계적 자료처리를 위하여 사용된 전암 화학분석 자료는 전효택·이덕원 (1987a,b) 및 이덕원 (1988)에 의해 발표된 문헌에서 Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P 등의 주성분과 Li, Rb, Be, Sr, Ba, La, V, Cr, Mo, Co, Ni, Cu, Ag, Zn, Cd, Pb, Zr, F 및 Sn 등의 미량원소를 발췌하여 통계처리 하였다. 자료의 수는 총 60개였으며 분석대상원소 (변수)는 총 29개였다. 이들 원소들의 화학분석 방법은 위에서 언급한 문헌에 수록되어 있다.

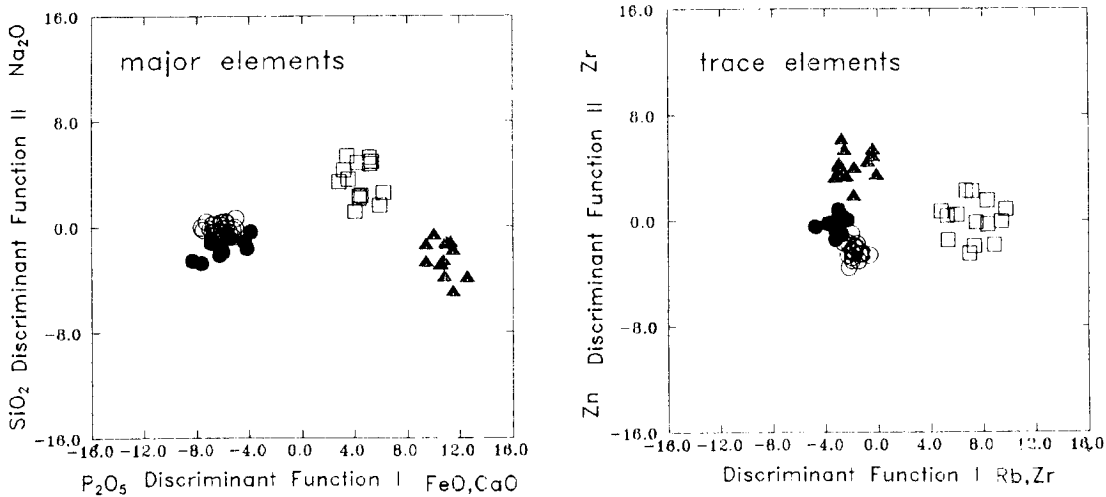


Fig. 2. Plot of scores of the first and second discriminant functions in Buncheon (▲), Wangpiri (□), Nonggeori (○) and Naedeogri (●) granitic rocks.

판별분석

연구대상 암체 즉 분천화강편마암, 왕피리화강암질암(이상 울진지역), 농거리화강암 및 내덕리화강암(이상 상동지역)에 대한 4개 암체간의 지구화학적 유사(차이) 정도를 파악하기 위하여 판별분석을 실시하였다. 판별분석시 판별식의 도출에는 F 통계량 및 Wilks' Lambda를 이용하여 단계적으로 변수를 투입하는 stepwise 방법을 이용하였다(Fedikow and Turek, 1983). 각 집단의 자료는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 제 1집단: 분천화강편마암들로 비생산성 화강암으로 알려진 암석집단으로 자료수는 총 13개였다.
- 제 2집단: 함주석 화강암으로 알려져 있는 왕피리화강암질암 암석 집단으로 자료수는 총 14개였다.
- 제 3집단: 농거리화강암의 자료군으로 자료수는 총 21개였다.
- 제 4집단: 내덕리화강암의 자료로서 자료수는 총 12개였다.

주성분원소 (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5)를 이용한 판별분석 통계결과가 Table 1에 수록되어 있으며 판별식에 의한 판별점수가 판별식 1 및 2를 축으로 하여 Fig. 2에 점시되어 있다.

판별식 1은 eigenvalue가 약 54.1로서 89.56%의 분산을 설명하며, 판별식 2는 eigenvalue가 약 4.7로서 7.83%의 분산을 설명한다. 판별분석 결과 4개 집단들을 구분하는데 있어서 판별식 1에 의하면 FeO (1.373), CaO (1.114),

P_2O_5 (-1.260)가, 판별식 2에 의하면 Na_2O (1.103) 및 SiO_2 (-0.812)가 다른 원소들에 비해서 상대적으로 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 즉, 판별점수도 (Fig. 2)에서 보면 울진지역의 분천화강편마암, 왕피리화강암질암 및 상동지역 화강암(농거리-내덕리화강암)으로 크게 3개 집단으로 구분된다. 그러나 자료들의 약 90%가 구분되며 나머지 10%는 농거리 및 내덕리 화강암들에서 중첩되므로서 상동지역의 농거리 및 내덕리화강암은 비교적 유사한 지구화학적 특성을 갖고 있는 암체임을 알 수 있다. 이와 같은 판별현상은 후마그마성 변질특성인 알바이트화작용 및 규화작용의 정도가 연구대상 암체들간에 차이가 있다는 것으로 생각된다.

미량원소 (Li, Rb, Be, Sr, Ba, La, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Zr, F, Sn)를 이용한 판별분석 통계결과 및 판별점수도가 각각 Table 1 및 Fig. 2에 나와 있다. 판별함수 1은 eigenvalue가 약 17로서 67.16%의 분산을 설명하며, 판별함수 2는 eigenvalue가 약 6.0로서 24.41%의 분산을 설명한다. 판별함수 1에 의하면 Rb (0.997), Zr (0.928) 등이, 판별함수 2에 의하면 Zn (-0.990), Zr (0.726) 등의 원소들이 이들 4개 화강암질암의 구분에 상대적으로 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 미량원소에 의한 판별점수도에 의하면 (Fig. 2) 판별함수 1의 Rb 및 Zr 등의 원소함량특성에 대하여 왕피리화강암질암이 그밖의 화강암질암들과 1차적으로 확연히 구분됨을 알 수 있다. 상동지역 화강암은 주성분 경우처럼 농거리 및 내덕리화강암들을 뚜렷하게 구분하지 않는다. 연구대상 암체들에서 황화광물이 확인되지 않는다는 점으로 미루어보아 canoni-

Table 1. Standardized canonical discriminant function coefficients and related statistics for major and trace elements of the granitoids in the Sangdong and Ulchin areas.

statistics	major elements		trace elements	
	discrim. func. 1	discrim. func. 2	discrim. func. 1	discrim. func. 2
eigenvalue	51.114	4.732	17.446	6.341
percentage of variation(%)	89.56	7.83	67.16	24.41
coefficients				
SiO ₂	0.345	-0.812	Rb	0.997 -0.115
TiO ₂	-0.964	0.513	Sr	-0.186 -0.344
Al ₂ O ₃	-0.672	0.001	La	-0.601 0.212
Fe ₂ O ₃	0.604	-0.258	Cr	-0.198 0.344
FeO	1.373	-0.064	Zn	-0.270 -0.990
MnO	0.327	0.524	Pb	0.323 0.129
MgO	-0.297	-0.656	Zr	0.928 0.726
CaO	1.114	-0.696	F	0.490 0.004
Na ₂ O	0.618	1.103	Sn	-0.126 0.567
K ₂ O	0.075	0.751		
P ₂ O ₅	-1.260	-0.275		
classification	97.39%		91.57%	

*Training set: group 1; Buncheon granitoid (13)
 group 2; Wangpiri granitoid (14)
 group 3; Nonggeori granitoid (21)
 group 4; Naedeogri granitoid (12)

cal 변수로서 Zn의 의미는 규산염광물 함량 및 Zn의 치환 정도가 암체들 사이에 달랐음을 시사한다.

주성분 및 미량성분에 의한 판별분석 결과, 첫째 울진 지역 화강암질암들은 상동지역 암체와 지구화학적 특성이 서로 다르며 둘째 울진지역의 분천 및 왕피리 화강암질암은 공간적인 지구화학적 차이가 확인된다. 이에 반해 상동지역 화강암들은 상대적으로 주성분 및 미량성분이 서로 유사한 특성을 보인다. 따라서 분천화강편마암, 왕피리화강암질암, 상동지역 화강암의 3개의 집단으로 연구 대상 암체가 구분됨을 알 수 있다. 이들 3개 집단의 Sn 함량은 분천화강편마암의 경우 약 3 ppm, 왕피리화강암질암이 약 96 ppm, 그리고 농거리 및 내덕리화강암이 약 14 ppm이었다. 따라서 분천화강편마암을 제외한 다른 암체들은 주석 자체의 함량으로 보아서 합주석화강암의 가능성을 가지고 있다.

한편 울진지역 분천화강편마암과 왕피리화강암질암 사이의 지구화학적 차이는 큰 반면 상동지역의 농거리화강암과 내덕리화강암 사이의 지구화학적 차이는 미미하였다. 그러나 암석의 구성광물 및 암상의 차이점이 기재되고 있고, 농거리화강암을 생산성, 내덕리화강암을 비생산성

Table 2. Standardized canonical discriminant function coefficients and related statistics for major and trace elements of the granitoids in the Sangdong area.

statistics	major element		trace elements	
	discrim. func. 1	discrim. func. 2	discrim. func. 1	discrim. func. 2
eigenvalue	5.31		24.03	
percentage of variation (%)	100		100	
coefficients				
SiO ₂	-0.820		Li	0.654
TiO ₂	2.628		Rb	0.380
Fe ₂ O ₃	-1.012		Ba	-0.743
FeO	-1.699		La	2.132
MnO	0.614		V	0.786
MgO	-0.709		Co	-0.627
Na ₂ O	2.960		Pb	-0.651
K ₂ O	1.751		Zr	-1.713
P ₂ O ₅	-0.709		F	0.645
			Sn	-0.654
classification	100%		100%	

*Training set: group 3; Nonggeori granitoid (21)
 group 4; Naedeogri granitoid (12)

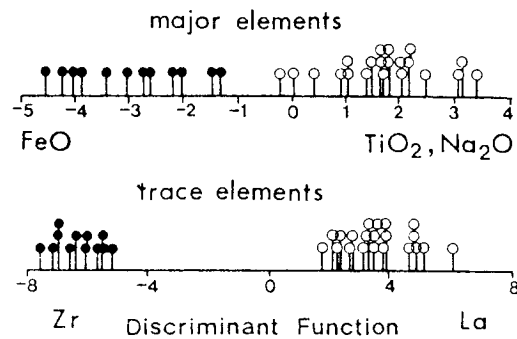


Fig. 3. Plot of scores of discriminant functions in Nonggeori and Naedeogri granites. Symbols are the same as Fig. 2.

화강암으로 구분하는 기존의 연구결과 (전효택·이덕원, 1987b; Chon et al., 1988; 이덕원, 1988)와 농거리화강암에서 내덕리화강암 및 페그마타이트로 분화되는 경향 (김수영, 1988) 등으로부터 농거리 및 내덕리화강암의 지구화학적 차이점도 기대되어 상동지역의 농거리화강암과 내덕리화강암의 두암체만의 판별분석을 실시하였다 (Table 2 및 Fig. 3). 판별식 1의 eigenvalue는 주성분 및 미량원소의 경우 각각 5.31 및 24.03으로서 분산 설명력은 모두 100%였다. 주성분원소의 경우 TiO₂ (2.628), Na₂O

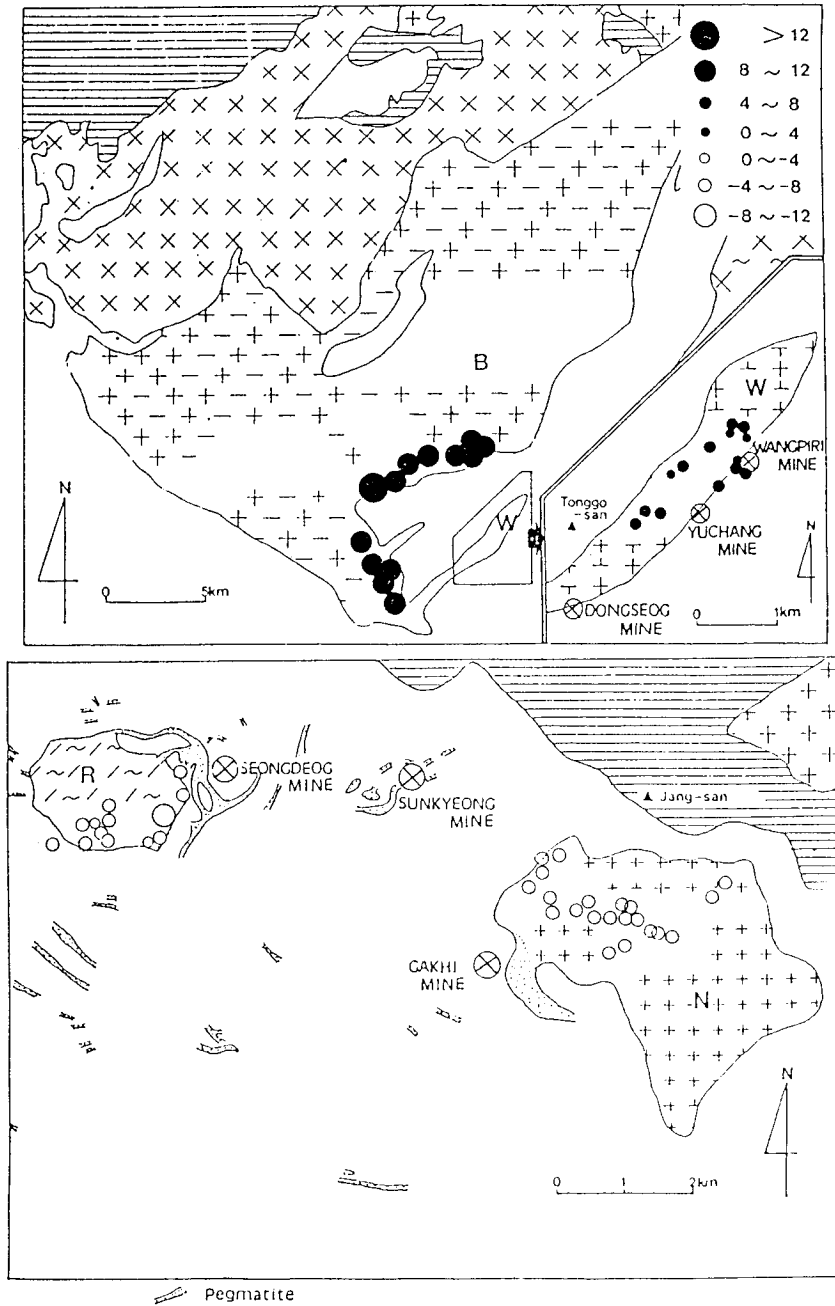


Fig. 4. Plot of discriminant scores of major elements on sample locations.

(2.960)에 의해서, 미량원소의 경우 La (2.132), Zr (-1.713)에 의해서 농거리화강암과 내덕리화강암이 구분되고 있음을 알 수 있다. 조암광물의 mode, 광물화학 및 암상으로부터 농거리화강암은 흑운모가 풍부하며 암체의 조직 등이 균질한데 비해 내덕리화강암에서는 유동구조가

관찰된다. 따라서 판별계수가 큰 이들 원소들의 의미는 구성 광물의 차이 혹은 마그마의 분화정도의 차이 등으로 해석할 수 있으며 한편 김수영 (1988)은 사장석 광물화학 자료를 통해 내덕리화강암이 좀더 sodic한 경향이 있음을 보고한 바 있다.

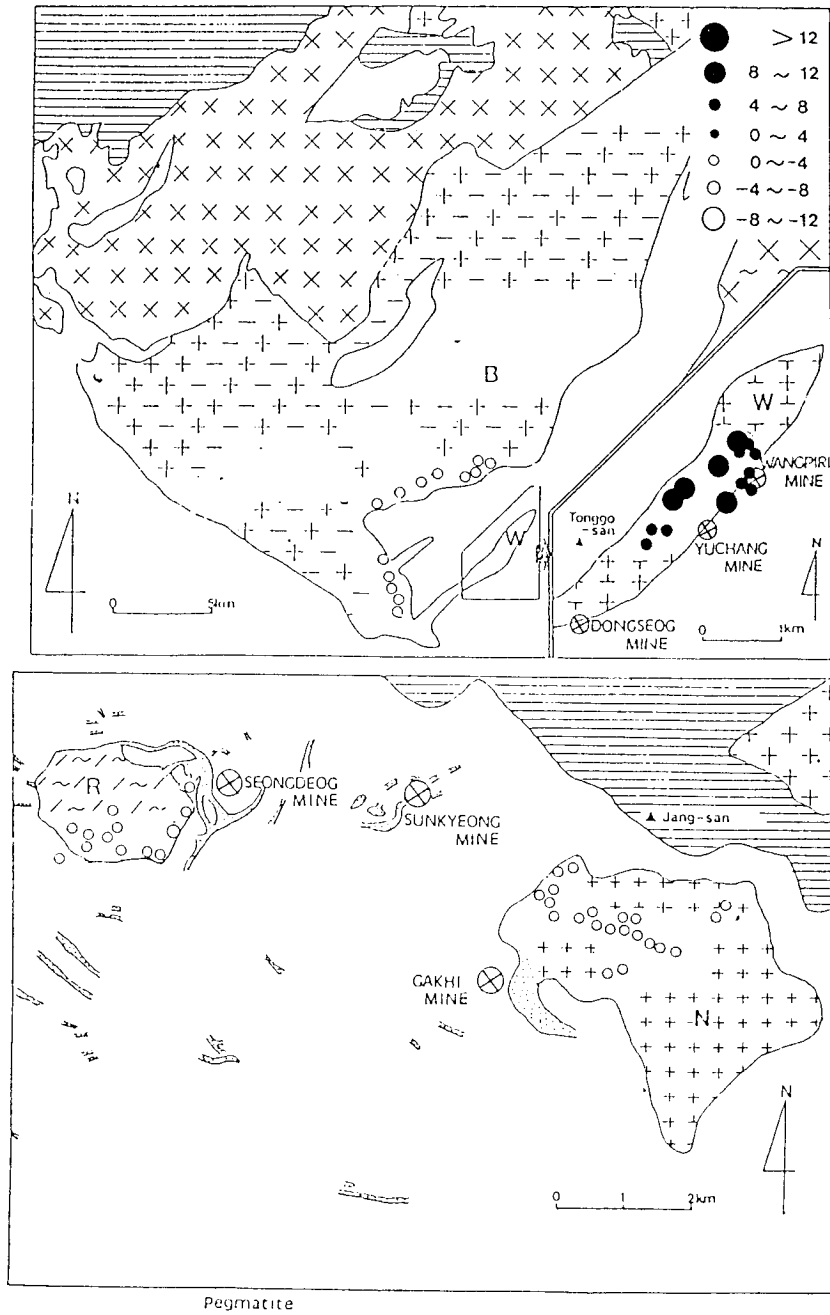


Fig. 5. Plot of discriminant scores of trace elements on sample locations.

판별점수의 점시 (plotting)

공간좌표 즉 시료채취점에 판별분석의 결과로부터 얻은 판별점수 (Table 1의 판별함수 1로부터 계산되는)를 도형의 크기로 점시한 결과 (Fig. 4, 5), 주성분 원소의 경우

주로 FeO, CaO 및 P₂O₅ 등의 함량차이로부터 각각의 암체인 왕피리화강암질암, 농거리화강암 및 내덕리화강암이 도형크기를 달리하여 구분되며 (1개의 시료는 도형크기가 크게 나타난다) 각 암체들은 균일한 크기의 도형이 점시되어 각 암체내의 화학적 특성은 유사한 것으로 나

타난다. 그러나 분천화강편마암은 도형의 크기가 편마암 체내에서도 약간씩 달라서 불균질한 지구화학적 특성을 보여주며 같은 울진지역의 왕피리화강암질암과 매우 이질적인 특성을 갖는 것으로 확인된다. 미량원소는 주로 Rb 및 Zr 등에 의해서 구분이 되는데 왕피리광산 주변의 도형크기는 서남부지역의 3개 시료 (유창광산 북쪽)와 유사하나 북연부의 왕피리화강암질암과 도형크기가 달라서 왕피리화강암질암중의 미량성분 특성은 동일암체에서조차 상당히 이질적 특성이 존재하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 상동지역의 내덕리 및 농거리화강암체에서는 도형의 크기가 매우 유사하여 거의 균질한 화학적 특성을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 판별점수의 시료채취점에서의 현지화 (visualisation)는 다변수 화학분석자료를 축소화하여 각 암체의 화학적 특성을 동시에 상호 비교해 준다는 점에서 주석광화 작용과 관련된 기타지역의 화학적 유사지역을 제시할 수 있다는 점에서 탐광에 활용될 기법으로 간주될 수 있다.

다중회귀분석

연구대상 암체중의 Sn 함량의 변화가 주성분과 미량원소들 중에서 특히 어떤 원소에 의해 영향을 받는지 혹은 주석함량이 어느원소와 상관성이 높은가를 규명하고자 다중회귀분석을 실시하였다 (각 암체별로 시료수가 적어서 각 암체별 회귀식은 구할 수 없었고 아래의 회귀분석 결과는 모든 암체시료 전체 (pooled)에 대한 회귀분석 결과이다).

주성분 및 미량원소 함량 변화에 따른 Sn 함량변화와 관련된 부분회귀계수, 표준화된 회귀계수 및 이들의 유의성 검증 등 다중회귀분석 결과가 Table 3 및 4에 수록되어 있다. 계산된 회귀모델의 적합도를 검증한 결과, 주성분의 경우 F값이 18.04, 미량원소의 경우 14.85로서 산출된 회귀모델은 F값의 임계치가 유의수준을 0.05로 할 경우 각각 약 2로서 임계값을 초과하여 그 모델을 적합하다고 볼 수 있다. 주성분 및 미량원소의 회귀식 중 결정계수 (coefficient of determination)는 각각 0.80 및 0.83이었다. 회귀식의 해석시 표준화된 회귀계수를 서로 비교함으로써 어떤 원소들이 Sn 함량의 변화를 더 큰 영향력을 미치고 있는가를 판단하였다.

표준화된 회귀식은 다음과 같다.

주성분의 경우 (Table 3)

$$Sn = -0.317P_2O_5 + 0.039TiO_2 + 0.075K_2O - 0.084Fe_2O_3 + 0.032SiO_2 - 0.226CaO + 0.456MnO - 0.055MgO + 0.254Na_2O + 0.333Al_2O_3 + 0.030FeO$$

Table 3. Computed ANOVA for significance of regression of major element content on Sn content.

Source of variation	Sum of squares	degree of freedom	mean of squares	F test
Linear regression	92404.94	11	8400.44	18.04 ^a
Residual	22350.81	48	465.64	

Variable	coefficient	Std. Coeff.	T	Sig. T
P ₂ O ₅	-134.315	-0.317	-1.983	0.0531
TiO ₂	31.099	0.039	0.161	0.8725
K ₂ O	3.928	0.075	0.431	0.6686
Fe ₂ O ₃	-31.423	-0.084	-0.942	0.3511
SiO ₂	1.227	0.032	0.176	0.8612
CaO	-28.291	-0.226	-1.930	0.0596
MnO	706.065	0.456	3.164	0.0027
MgO	-20.924	-0.055	-0.343	0.7328
Na ₂ O	21.242	0.254	1.315	0.1948
Al ₂ O ₃	18.507	0.333	1.407	0.1658
FeO	3.198	0.030	0.125	0.9013
(Constant)	-379.745		-0.559	0.5790

^aa; significant at the α=5% level of significance. r²(coefficient of determination)=0.80

Table 4. Computed ANOVA for significance of regression of trace element content on Sn content.

Source of variation	Sum of squares	degree of freedom	mean of squares	F test
Linear regression	95834.16	15	6388.94	14.85 ^a
Residual	18921.59	44	430.03	

Variable	coefficient	Std. Coeff.	T	Sig. T
F	0.019	0.502	2.695	0.0099
Zn	-0.075	-0.023	-0.247	0.8064
Cu	0.272	0.016	0.206	0.8374
Ni	1.726	0.051	0.541	0.5912
Pb	-0.083	-0.029	-0.285	0.7772
Zr	-0.683	-0.478	-1.781	0.0818
Be	-0.153	0.037	-0.438	0.6637
Sr	0.125	0.085	0.239	0.8121
Co	3.359	0.105	0.690	0.4937
Cr	-1.227	-0.061	0.357	0.7229
Rb	0.142	0.596	2.991	0.0045
La	0.300	0.067	0.301	0.7650
Li	-0.059	-0.211	0.977	0.3341
V	2.115	0.199	0.810	0.4223
Ba	-0.044	0.102	0.285	0.7770
(Constant)	-19.951		-0.869	0.3893

^aa; significant at the α=5% level of significance. r²(coefficient of determination) 0.83

미량성분의 경우 (Table 4)

$$Sn = 0.502F - 0.023Zn + 0.016Cu + 0.051Ni - 0.029Pb -$$

$$0.478Zr - 0.037Be + 0.085Sr + 0.105Co - 0.061Cr + 0.596Rb + 0.067La - 0.211Li + 0.199V - 0.102Ba$$

MnO의 부분회귀계수는 약 706, 그리고 표준화 회귀계수는 0.456으로서 기타 다른 회귀계수보다 크다 (Table 3). 따라서 다른 주성분함량이 일정하다고 볼 때 MnO의 변화에 따라서 Sn의 함량이 가장 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 미량성분의 경우 F 및 Rb의 부분회귀계수 (표준화계수)는 각각 0.019 (0.502) 및 0.142 (0.596)으로 나타났다 (Table 4). 특히 표준화 회귀계수에 의하면 Rb의 계수가 F보다도 상대적으론 더 크게 나타나 Sn 함량의 증가는 Rb 함량에 의해 더 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 Rb 함량을 분화지수로서 주석과 관련시킬 때는 Rb의 증가, 즉 암체가 분화될수록 주석의 부화를 생각할 수 있고, F의 경우는 주석의 이동자로서 F의 함량이 높아짐에 따라서 주석의 부화가 이루어졌을 것으로 사료된다.

상기 결과는 집단구분없이 모든 자료에 대한 회귀식이므로 자료들이 충분해서 집단들만을 분리해서 회귀식을 도출할 경우 주석 부화와 관련된 원소들의 상대적 중요성은 달라질 수 있다. 즉 울진지역 및 상동지역의 4개 집단을 서로 분리하여 회귀식을 구하였을 경우 지역간 주석광화작용의 특성차이로 인해 Sn에 대한 MnO, F 및 Rb의 중요도가 공간적으로 달라질 수 있고, 또한 B과 같이 분석이 안된 원소들과의 관련성도 고려될 수 있다.

연구대상 암체시료에서 F이 분석된 총 6개의 전암분석자료에 대한 다중회귀분석의 결과 (비록 회귀식의 적합도가 약 80% 정도로 약 20% 정도의 오차는 기대되지만) Sn 부화는 분석된 어떤 원소들 보다도 주로 MnO, P₂O₅, Rb 및 F 등에 상당히 좌우되는 것으로 나타났다.

결 론

국내의 주석광산이 분포하고 있는 경북 울진지역의 분천화강편마암과 왕피리화강암질암, 그리고 강원도 상동지역의 농거리화강암과 내덕리화강암에 대한 암석지구화학 자료에 대한 판별분석 및 다중회귀 분석결과는 다음과 같다.

1. 울진지역 왕피리화강암질암에서는 형석, 황옥 및 석석이 산출되며 상동지역 농거리화강암 및 내덕리화강암에서는 전기석이 수반된다. 따라서 울진지역의 왕피리화강암질암은 F의 활동도가 높았던 마그마환경으로, 그리고 상동지역의 농거리 및 내덕리화강암은 B의 활동도가 상당했을 환경으로 해석된다.

2. 판별분석 결과 주성분원소인 경우 FeO, CaO 및 P₂O₅,

그리고 미량원소의 경우 Rb 및 Zr 등의 원소에 의하여 연구대상 암체가 분천화강편마암, 왕피리화강암질암, 농거리-내덕리화강암으로 크게 3개 집단으로 분류되었다. 이들 3집단의 Sn 함량은 분천화강편마암의 경우 약 3 ppm, 왕피리화강암질암이 약 96 ppm 그리고 농거리 및 내덕리화강암이 약 14 ppm이었다. 따라서 분천화강편마암을 제외한 암체들은 합주석화강암의 가능성이 확인되었다.

3. 다중회귀분석 결과 Sn 함량에 대한 표준화된 부분회귀계수가 큰 원소로 MnO, P₂O₅, Rb 및 F 등이 유의한 것으로 나타나 이들 원소들은 Sn 부화와 매우 중요한 관계가 있음이 통계적으로 확인되었다.

4. 판별분석의 판별점수를 하나의 가상 변수 (pseudo variable)로 간주하여 시료 채취점에 점시한 결과, 암체의 지구화학적 유사정도를 현시화할 수 있었으며 이러한 기법은 제2의 주석 부화대 (혹은 기타 광증에의 응용)를 도출할 수 있는 탐광 지구화학적 기법으로의 가능성을 확인할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 지정 전략광물자원 연구센터의 연구비로 수행되었다.

참고문헌

김수영 (1988) 순경 페그마타이트와 이와 수반된 주석광물에 대한 성인적 연구. 연세대학교 이학박사 학위논문, 163p.
 문상호 (1990) 울진지역의 석광화작용에 관한 연구. 서울대학교 이학박사 학위논문, 184p.
 윤현수, 이대성 (1986) 함백분지 기반지역에 분포하는 선캄브리아 화강암질암류의 암석화학적 연구. 광산지질, v. 19, p. 195-214.
 이덕원 (1988) 상동-울진지역의 주석광화작용과 관련된 화강암류의 암석지구화학적 특징과 탐사에의 응용에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문, 153p.
 전효택, 이덕원, 홍영국, 김문영, 전용원 (1986) 국내일부 선캄브리아시대 화강암류의 주석함량. 대한광산학회지, v. 23, p. 62-71.
 전효택, 이덕원 (1987a) 울진지역 주석광화작용과 관련된 화강암류의 다원소 지구화학. 대한광산학회지, v. 23, p. 8-20.
 전효택, 이덕원 (1987b) 상동지역 주석광화작용과 관련된 선캄브리아시대 화강암류의 암석지구화학. 대한광산학회지, v. 24, p. 83-96.
 전효택, 홍영국, 김문영 (1989) 석포-분천-울진지역 선캄브리아시대 화강암질암의 암석지구화학적 특성과 생산성심성암으로서의 가능성. 대한광산학회지, v. 26, p. 66-78.
 Cerny, P., Gaod, B. E., Hawthorne, F. C. and Chapman, R. (1986) Fractionation trends of the Nb- and Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake Pegmatitic granite and its pegmatite aureole, Southeastern Manitoba. Amer. Mineral., v. 71, p. 501-517.

- Charoy, B. and Pollard, P. J. (1989) Albite-rich, silica-depleted metasomatic rocks at Emuford, Northeast Queensland. Mineralogical, geochemical, and fluid inclusion constraints on hydrothermal evolution and tin mineralization. *Econ. Geol.*, v. 84, p. 1850-1874.
- Chon, H. T., Ri, D. W., Kim, M. Y., Hong, Y. K. and John, Y. W. (1988) Multi-element geochemistry of Pre-cambrian granitoids in relation to tin mineralization in Korea: in E. Zachrisson (ed.), *Proc. 7th IAGOD Symposium* E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p. 547-558.
- Chon, H. T. and Shimazaki, H. (1993) K/Ar ages of tin mineralization in the Sangdong and Ulchin areas of Korea. in Y. T. Maurice (ed.), *Proc. 8th IAGOD Symposium* E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, p. 323-330.
- Coetzee, J. and Twist, D. (1989) Disseminated tin mineralization in the roof of the Bushveld granite pluton at the Zaaipplaats mine, with implications for the genesis of magmatic hydrothermal tin systems. *Econ. Geol.*, v. 84, p. 1817-1834.
- 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.
- Heinrich, C. A. (1990) The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition. *Econ. Geol.*, v. 85, p. 457-481.
- Lehmann, B. and Harmanto. (1990) Large-scale tin depletion in the Tanjungpandan tin granite, Belitung island, Indonesia. *Econ. Geol.*, v. 85, p. 99-111.
- Manning, D. A. C. (1986) Contrasting styles of Sn-W mineralization in peninsular Thailand and SW England. *Mineral. Deposita*, v. 21, p. 44-52.
- Pollard, P. J., Andrew, A. S. and Taylor, R. G. (1991) Fluid inclusion and stable isotope evidence for interaction between granites and magmatic hydrothermal fluids during formation of disseminated and pipe-style mineralization at the zaaipplaats tin mine. *Econ. Geol.*, v. 86, p. 121-141.
- Schwartz, M. O. and Surjono (1990a) The strata-bound tin deposit Nam Salu, Kelapa Kampit, Indonesia. *Econ. Geol.*, v. 85, p. 76-98.
- Schwartz, M. O. and surjono (1990b) Greisenization and albitization at the Tikus tin-tungsten deposit, Belitung, Indonesia. *Econ. Geol.*, v. 85, p. 691-713.
- Swanson, S. E., Bond, J. F. and Newberry, R. J. (1988) Petrogenesis of the Ear Mountain tin granite, Seward Peninsular, Alaska. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 46-61.
- Ueda, N. (1969) Evolution of the continent in northeastern Asia I: Reconnaissance survey of the geochronology of the Korean peninsular. *J. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 2, p. 96-97.
- Witt, W. K. (1988) Evolution of high-temperature hydrothermal fluids associated with greisenization and feldspathic alteration of a tin-mineralized granite, Northeast Queensland. *Econ. Geol.*, v. 83, p. 310-334.