

울산화강암 및 인접 사문암 중 주/미량 원소의 거동에 관한 지화학적 연구

이재영* · 이인호*

A Geochemical Study on the Behaviors of Major and Trace Elements in the Ulsan Granite and Its Contact Serpentinite

Jae Yeong Lee* and In Ho Lee*

ABSTRACT: Geochemical characteristics of iron-related Ulsan granite was studied in comparison with the Cretaceous granitoids from the metallogenic provinces of copper, lead-zinc and lead-zinc/molybdenum in the Gyeongsang Basin, and the variation of chemical compositions at the Ulsan granite/serpentinite contact was investigated. Ulsan granite is plotted in the regions of granite and granodiorite of Streckeisen's diagram. It shows differentiation trend of calc-alkali magma, and the magmatic evolution from granodiorite to granite is consistent with the general crystallization path of the Cretaceous granitoids in Gyeongsang Basin. Differentiation index(D.I.) of Ulsan granite is 86~95, which is higher than those of Jindong granites (D.I.=45~70) and Onjongri granites (D.I.=67~84), and there are differences in the content of some major and trace elements between Ulsan granite and other Cretaceous granitoids. At the Ulsan granite/serpentinite contact SiO_2 , K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , Rb, Sr, Ba which are abundant in Ulsan granite decrease toward serpentinite, while T.Fe, MgO, Ni, Cr which are abundant in serpentinite decrease toward Ulsan granite. Therefore, the geochemical characteristics of Ulsan granite is applicable to distinguish iron province from different metallogenic provinces where other Cretaceous granitoids occur in the Gyeongsang Basin, and it is possible to find serpentinite which was intruded by granite on the basis of chemical variations.

서 론

경상분지내에는 백악기-제3기초 화강암류를 관련암으로 하는 금속 및 비금속광상이 많이 발달하는데, 금속광상들은 분지의 동남단에서 내륙방향으로 대체로 동, 연-아연, 황수연-중석의 순으로 대상분포를 한다(김옥준, 1971; 이상만, 1972; Sillitoe, 1977). 이들 화강암류중 주/미량원소는 광산구의 광종에 따라 함량이 변화되 일정한 범위를 보이므로 화학조성에 의한 광상구의 구분이 가능하다(이재영, 1981; Lee, 1984; 이재영외, 1994).

그런데 분지의 동남단에는 동광상외에 울산·물금·김해 지역에 철광상이 많이 발달해 있음에도 철광상과 관련이 있는 화강암류가 다른 광종의 광산구에 있는 화강암류와 화학적 조성에 있어서 어떤 차이점을 가지고 있는 지에 대한 지화학적 연구(이재영외, 1992)는 매우 미흡하다.

따라서 본 연구에서는 경상분지내 울산·물금·김해 지역에 많이 분포하는 철광상 (우영균, 1983)의 관련 화강암류중에서 울산화강암을 선택하여, 경상분지내 타 광산구의 화강암류(진동,

연양-유천, 온정리) 및 암석학적으로 유사한 마산암류와 비교하고 화강암에서의 주/미량 원소의 거동을 연구하였다. 그리고 또한 울산화강암은 사문석화작용에도 관련 있는 것(박법정, 1989; 김규환외, 1992; 김규환외, 1993)으로 알려져 있으므로 인접 사문암에는 화학조성에 어떠한 변화를 주었는 지를 조사하였다.

본 연구는 열수변질대에서의 여러 가지 화학원소의 거동에 관한 연구에 중요한 기초자료가 될 수 있으며, 경상분지내 철광상뿐만 아니라 태백산분지내 철광화작용과 화강암과의 관계에 대한 연구에도 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

지질 및 광상 개요

지 질

본 역은 중심부에 백악기-제3기초의 화강암이 넓게 자리 잡고 있으며, 이의 관입을 받은 시대 미상의 결정질 석회암, 울산층, 화산암류 및 사문암이 화강암의 주변에 분포한다. 화산암류는 퇴적암류를 관입 내지 분출해 있으며, 사문암은 화산암류 다음으로 관입하였다. 소규모의 층적층은 이들 암류들을 부정합으로 덮고 있다. 울산단층과 양산단층은 본 역의 동, 서쪽에 각각 북

*경북대학교 자연과학대 지질학과 (Dept. of Geology, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea)

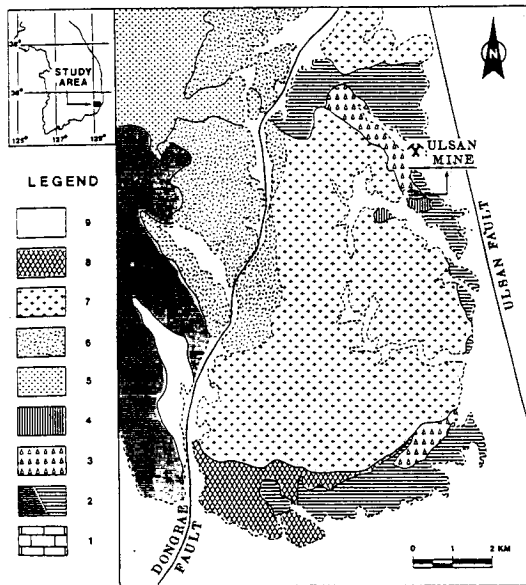


Fig. 1. Geologic map of Ulsan mine area, southeastern margin of Gyeongsang Basin. 1; Crystalline Limestone, 2; Ulsan formation, 3; Volcanic Breccia, 4; Serpentine, 5; Rhyodacite, 6; Hornblende-Biotite Granodiorite, 7; Biotite Granite, 8; Felsite, 9; Alluvium.

북서 및 북북동 방향으로 발달한다(Fig. 1).

결정질 석회암

본 암은 울산 철광상의 모양으로 백색 내지 담회색을 띠며, 노두 면적은 약 0.1 km^2 , 층후는 300 m인 소규모의 타원상으로 산출된다. 거정질 방해석맥이 다수 포함되어 있으며 층리구조는 뚜렷하지 않다. 울산층과는 부정합으로 피복되어 있다.

본 암의 기원은 80년대 초까지는 조선계 대석회암층(김옥준외, 1981)에 대비되는 지층(박양대, 유형대, 1968; 박기화외, 1980)으로 해석되었으나, 본 층이 조선누층군 석회암의 주 분포지와는 지리적으로 너무나 떨어진 경상퇴적분지 동남단에 소규모로 분포하고 있으므로(이러한 산출상태와 암상을 고려하여) 화성기원의 carbonatite(김정진외, 1987)로 해석되었다. 한편 최근의 연구로는 탄산염암의 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$)분석과 미량화학성분의 분석 결과에 따라, 옥천습곡대내에 분포하는 마천리층 및 조선누층군 삼태산층의석회암에 유사한 해성기원의 석회암으로 해석되고 있다. 그러나 자철광체와공존하는 거정질 방해석은 심부기원으로 해석되었다(김규환외, 1990).

울산층

본 층(박양대, 유형대, 1968)은 화강암체 주변에 광범위하게

분포하며, 언양도폭과 모량도폭의 대구층에 해당한다. 대구층은 함안층, 반야월층, 송내동층으로 세분되는데(장기홍, 1975), 본 층이 이들 중 어느 층에 대비 될수 있는지는 불명하다(박희인, 1977). 본 층은 주로 사암, 적색세일 및 회색세일로 구성되며, 부분적으로 응회질 사암이 협재되어 호층을 이루고 있다. 울산 화강암과의 접촉부는 호온펠스화 되어 있다.

화산암류

본 암류는 울산철광산의 북서쪽에 흑운모화강암과 울산층사이에 분포하며, 화강암과의 접촉부는 혼펠스화되어 있다. 본 암은 석영, 레타이트 안산암과 동질의 화산각력암, 그레이 와케 및 규암등 다양한 암편으로 구성되어있다(박기화외, 1980). 각력이 없는 화산암류는 과거에는 울산층이 혼펠스화 된 것(박양대, 1968)으로 생각했으나, 현재는 조면안산암(Choi, 1983)으로 보고 있다. 본 암의 반정은 대부분 알칼리 장석으로 래스(lath)상을 보이며, 트라카이트 조직을 가진다. 화산각력암에는 혼펠스화된 울산층의 각력이 소량 포함된다.

사문암

본 암은 결정질석회암 주위에 타원형으로 분포하며, 호계에서 달천리로 통하는 도로를 경계로 층적층에 의해 북동부(북부암체)와 남서부(남부암체)로 양분되어 있다(최수용, 1988). 암색은 대체로 암갈색 내지 암흑색이나 풍화면은 회백색을 띤다. 본 암의 주 구성광물은 감람석, 사방회석, 사문석, 투회석, 각섬석등이며, 활석, 녹리석, 자철석도 관찰된다(최수용, 1988; 박법정, 1989). 사문석의 주요광물은 lizardite와 chrysotile이며, 주로 감람석 결정의 경계면에서 산출된다(이효민, 1988).

남부암체에는 $\text{N}30^{\circ}\sim\text{E}80^{\circ}$ 방향의 소단층이 발달하며, 화강암과의 접촉부는 심하게 파쇄되어 망상의 열극이 발달하고 각력 사이에는 방해석, 석영등이 충전되어 있다. 또한 석면도 관찰되는데 광산개발 초기에는 고품위의 석면이 다량으로 산출되었다고 한다.

화강암

본 암은 울산 철광상의 관련암(이하 울산화강암이라 칭함)으로 울산광산의 북동쪽을 제외한 나머지 지역에 광범위하게 분포하며(원종배외, 1978), 전기한 암층들을 모두 관입하고 있다. 본 암의 주 구성광물은 석영, 장석 및 소량의 각섬석과 흑운모들이며, 관입시기는 흑운모의 K-Ar 연령측정 결과 58 Ma이며, 제 3기에 해당된다(이윤중외, 1976).

본 암은 울산철광상의 관련암이나, 사문암의 사문석화작용에

도 관여되어 있으므로 암석학적인 내용은 뒤에 별도로 기술코자 한다.

광 상

울산철광상

울산철광상은 시대미상의 결정질 석회암과 이를 관입한 제 3기 흑운모 화강암의 접촉부에 발달된 파이프상의 접촉고대광상(박기화 외, 1980)으로, 스카른 광체는 석회암과 화산암류에 걸쳐 배태되어 있다. 주 광체는 북서쪽으로 80° 경사된 타원형을 하고 있으며, 면적은 지표에서는 170 m×70 m가 되나 하부로 갈수록 작아지면서 -255 m 깊이에서는 60 m×25 m로 된다. 주 광석 광물인 자철석 외에 회중석, 황동석, 섬아연석, 방연석 등이 수반되나 이들은 경제적 가치는 없다. 기타 유비철석, 자류철석 등도 수반된다. 스카른 광물은 결정질 석회암에서 혼펠스화된 울산층쪽으로 갈수록 단사휘석, 단사회석석류석, 석류석의 광물조합을 보이며, 스카른을 형성시킨 유체는 본 광상 부근에 우세하게 발달하는 N20°~40°W 방향의 구조선을 따라 공급된 것으로 추정된다. 울산단층은 본 광상의 동쪽에서 북북서 방향으로 지난다(이기화외, 1992). 그리고 자철석은 스카른 형성 초기, 회중석은 후기, 기타 유화광물들은 스카른 형성 후기 내지 열수기에 걸쳐 형성되었다(박희인의, 1982; 김정진, 1989).

광상생성 온도는 426°C(Choi, 1983)~180°C(김정진, 1989)로, 이는 본 광상은 기성기에서 열수 후기까지의 복잡한 생성경로를 통하여 형성되었음을 의미한다.

사문석 광상

사문석은 각력 및 괴상으로 산출되며, 남북 양 사문암체에서 노천채굴되고 있다. 암색은 암록색, 암갈색, 암흑색을 띠며, 광물은 주로 lizardite, chrysotile로 구성되어 있다(이효민, 1988; 박법정, 1989). 남부 사문암체에는 N30-80E방향의 소단층이 발달하고 접촉부는 심하게 파쇄되어 망상의 열극이 발달한다. 북부 사문암체도 심하게 파쇄되어 각력상을 보이며, 각력사이에는 방해석, 석영등이 충전되어 있다(박법정, 1989). 사문암체가 흑운모 화강암이나 울산층과의 접촉하고 있는 부분은 사문석화가 잘 되어 있으며, 사문석의 함량은 93~98%정도 된다. 원암의 주요 광물인 사방휘석과 고토감람석은 거의 완전히 사문석화되어 관찰되지 않으며, 활석, 자철석 내지 크롬철석이 수반된다. 접촉부에서 사문암체 중앙부쪽으로 갈수록 사문석화의 정도가 낮아지며, 광물조성에 의한 분대(分帶)가 가능하다. 즉, 접촉부는 주로 사문석-활석의 광물조합을 보이나 사문암 중앙부쪽으로 갈수록 사문석의 함량은 감소하고 광물조합은 사문석-감람석-사

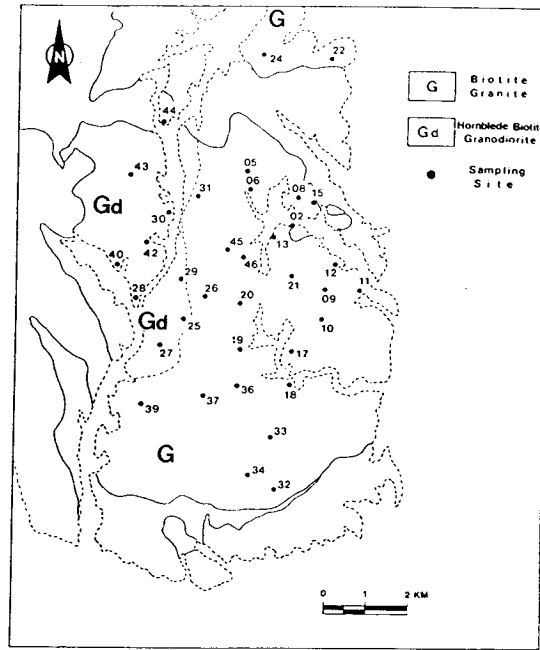


Fig. 2. Sampling locality map of Ulsan granite.

방휘석 → 사문석-사방휘석-감람석 → 사문석-사방휘석-감람석-녹니석으로 점변한다(박법정외, 1995). 남부 사문암체가 흑운모 화강암과의 접촉부에서 사문석의 함량이 높은 것은 흑운모 화강암의 열수작용에 기인된 것으로 해석되며, X선 회절분석 결과에서도 사문석의 함량이 높다(박법정, 1989). 북부 사문암체는 울산층 인접부에서 사문석의 함량이 높은 것은 약대를 따라 올라온 울산화강암의 열수에 기인되는 것으로 사료된다.

암석학 및 광상구

울산화강암

울산화강암에서 총 60개의 암석시료를 채취하여(Fig. 2) 박편을 제작하고 이 중 20개는 sodium dicobalt nitrate로 K-장식을 착색시켜 경하에서 점산하였으며, 31개는 화학분석하였다. 타 광상구의 화강암류는 기자료(진명식, 1981; Tsusue, 1984; 신영식, 1986; 최석원, 1986; 이준동, 1987)를 이용하였다. 본인들이 직접 연구했던 기자료는 화강암류의 화학조성에 의하여 경상분지내 광상구의 광종이 구분되므로, 본 연구에서는 다른 자료와의 비교를 위하여 제외하였다.

산출상태

울산화강암은 대체로 NS~NNS 방향의 구조선을 따라 분포

Table 1. The modal composition of Ulsan granite.

(Unit : v.%)

Sample No.	02	05	06	08	09	10	12	15	17	18	19	21	24
Quartz	26.1	34.5	25.8	26.5	26.2	33.0	27.8	26.0	27.1	30.2	22.8	33.6	41.0
K-feldspar	48.2	44.5	38.2	52.5	51.8	50.3	46.8	54.6	49.5	51.1	39.5	42.0	42.5
Plasioclase	21.0	18.5	32.2	16.2	17.8	14.7	19.1	15.2	19.1	15.7	32.0	17.8	14.5
Biotite	2.1	1.6	3.4	1.2	1.8	0.7	3.5	0.4	2.6	1.0	3.0	2.8	1.4
Hornblend	1.2	0.1	0.0	0.6	0.2	0.1	0.1	0.8	0.1	0.0	0.2	0.2	0.0
Chlorite	0.5	0.4	0.0	1.8	0.1	0.8	1.6	1.8	0.6	0.6	1.2	2.6	0.5
Opaque	0.4	0.4	0.2	0.0	1.6	0.1	0.8	0.0	0.3	0.2	0.5	0.4	0.0
Others	0.2	0.2	0.1	1.2	0.4	0.0	0.0	1.2	0.3	1.0	0.6	0.6	0.1
Total(%)	99.6	100.2	99.9	100.0	99.9	99.7	99.7	100.0	99.6	99.8	99.8	100.0	100.0

Sample No.	25	26	27	29	31	32	34	36	37	40	43	45	46
Quartz	22.0	18.0	22.1	22.8	25.4	34.8	28.8	33.1	19.0	25.4	21.4	22.5	33.2
K-feldspar	17.8	20.4	29.1	21.6	17.8	47.0	49.2	46.6	29.2	41.6	15.2	24.5	48.4
Plasioclase	49.4	53.4	41.8	49.3	48.6	12.6	15.0	16.5	37.1	27.6	54.8	48.2	16.5
Biotite	3.0	2.0	2.8	0.6	3.0	2.4	1.7	2.5	7.6	4.0	0.8	2.0	0.4
Hornblend	2.4	1.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.5	0.1	2.6	0.2	1.2	0.0	0.0
Chlorite	2.4	2.6	2.1	4.3	2.0	1.0	2.6	0.6	2.8	0.1	3.6	1.2	0.6
Opaque	1.8	1.4	1.2	0.3	0.6	1.2	1.2	0.0	0.3	0.2	1.0	0.5	0.8
Others	1.0	1.2	0.1	0.8	0.5	0.2	0.8	0.3	1.1	0.6	1.8	1.0	0.0
Total(%)	99.8	100.0	99.2	99.7	98.7	100.0	99.8	99.7	99.7	99.7	99.8	99.9	99.9

하는데, 농소면 시래리-달천리-천마산-외동읍-석계리-제내리를 연결하는 도로를 경계로 하여 2가지 암상으로 구분 할 수 있다.

박양대 등(1968), 박기화(1980)는 이 경계선을 경계로 동측의 것을 흑운모 화강암, 서측의 것을 각섬석-흑운모 화강암이라 하였고, 이윤중 등(1976)은 가대리 서남방 3 Km 지점의 암석을 각섬석-흑운모 화강섬록암으로 기재하고 이 암석의 흑운모 K-Ar연령을 58 Ma(제 3기)로 측정하였다. 실제 야외에서는, 두 암상의 경계는 매우 점이적이며, 또한 풍화가 심하여 확인하기 어렵지만, 울산도폭(박양대외, 1968)의 흑운모 화강암체 서쪽 경계부 부근에서 채취된 시료의 상당 수가 화강섬록암 영역에 점시된다(이인호, 1993). 흑운모 화강암은 회백색 내지 담홍색을 띠는 중립 내지 조립질이며, 중심부로 갈 수록 조립화되는 경향을 보인다. 절리는 수직으로 잘 발달되어 있다. 울산층과 화산암류는 울산화강암의 관입으로 그 접촉부는 부분적으로 혼펠스화되어 있다. 각섬석 화강섬록암은 회록색을 띠며 입도는 중립내지 세립질이 우세하고 흑운모 화강암과 점이적인 경계부를 공유하므로, 이 두 암체는 동원마그마기원으로서, 후자가 전자의 연변상으로 사료(이윤중, 1980)되고 있다.

모드 조성

흑운모 화강암은 주로 반자형 내지 타형의 석영, 소다장석, 사장석으로 구성되어 있으며 흑운모, 각섬석, 녹리석 및 자철석 등도 소량 함유한다. 사장석 반정과 세립의 석영 및 카리 장석

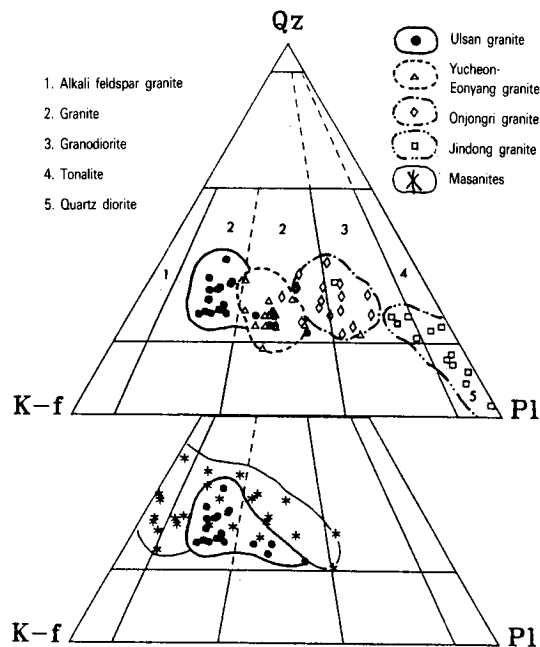


Fig. 3. Modal quartz-alkali feldspar-plagioclase diagram for the Cretaceous granitic rocks in the Gyeongsang Basin.

으로 된 반상조직은 관찰되지 않는다. 장석류는 대부분 심하게 풍화되어 전운모화되어 있으며, 각섬석, 흑운모도 상당 부분 녹리석화되어 있다(Table 1).

Table 2. The average content of major and trace elements of Ulsan granite.

	Biotite Granite	Hornblende-Biotite Granodiorite	Jindong Granite ¹⁾	Yucheon-Eonyang Granite ²⁾	Onjongri Granite ³⁾
SiO ₂	72.53	65.00	62.58	73.32	68.67
TiO ₂	0.32	0.62	0.60	0.27	0.39
Al ₂ O ₃	13.64	15.96	16.64	14.05	15.67
Fe ₂ O ₃	0.81	1.70	1.89	0.69	1.47
FeO	1.33	2.32	3.19	1.36	1.77
MnO	0.07	0.11	0.09	0.07	0.07
MgO	0.40	1.13	2.30	0.41	1.11
CaO	0.90	2.49	5.15	1.20	2.81
Na ₂ O	4.71	5.47	3.76	4.20	3.49
K ₂ O	4.10	2.85	2.06	4.06	3.63
P ₂ O ₅	0.07	0.22	0.18	0.07	0.12
H ₂ O	0.85	1.82	1.10	-	-
Ba	675.86	611.50	369.43	690.95	640.07
Co	37.76	27.70	14.08	4.89	9.07
Cr	4.05	5.10	65.83	20.84	9.93
Cu	2.90	4.10	58.05	7.79	11.86
Li	23.14	25.20	17.42	18.42	18.93
Nb	13.90	12.10	7.90	11.21	6.92
Ni	3.33	4.20	18.23	9.26	15.71
Pb	8.17	5.80	34.33	7.89	8.70
Rb	106.95	84.80	63.90	146.16	115.70
Sc	6.14	8.40	12.83	3.68	5.67
Sr	103.67	283.80	365.97	150.95	364.50
V	12.90	35.00	87.15	17.32	50.85
Y	42.24	35.70	13.75	26.79	19.15
Zn	63.29	196.20	59.24	40.11	37.14
Zr	34.10	22.00	155.62	21.74	20.60
La	41.43	38.50	17.08	36.32	31.64
Ce	79.00	73.40	34.50	64.42	51.14
Nd	47.71	46.00	17.60	24.47	21.50
Sm	7.01	6.88	-	5.21	4.24
Eu	0.79	1.26	1.00	0.65	0.68
Zn	63.29	196.20	59.24	40.11	37.14
Zr	34.10	22.00	155.62	21.74	20.60
La	41.43	38.50	17.08	36.32	31.64
Ce	79.00	73.40	34.50	64.42	51.14
Nd	47.71	46.00	17.60	24.47	21.50
Sm	7.01	6.88	-	5.21	4.24
Eu	0.79	1.26	1.00	0.65	0.68
Dy	4.77	4.09	1.70	3.36	2.89
Yb	3.72	2.68	1.19	2.69	1.83
Mo	-	-	3.10	2.00	7.10

Data from ¹⁾J.D. Lee(1987), ²⁾Y.S. Sin(1986), ³⁾S.W. Choi(1986), A. Tsusue(1984) and M.S. Jin(1981), ⁴⁾J.K. Lee(1986), ⁵⁾J.Y. Lee and J.K. Lee(1992).

모달 석영-카리장석-사장석도(Fig. 3)에 점시하면, 울산 흑운모 화강암은 화강암 영역에 점시된다. 그런데 철광상구인 김해-물금지역의 화강암류도 이와 점시영역이 거의 같으므로(이재영, 1992), 모달 조성도 (Fig. 3)에서 보는 바와 같이 화강암류의 관련 광상구를 구분하는데 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 한편,

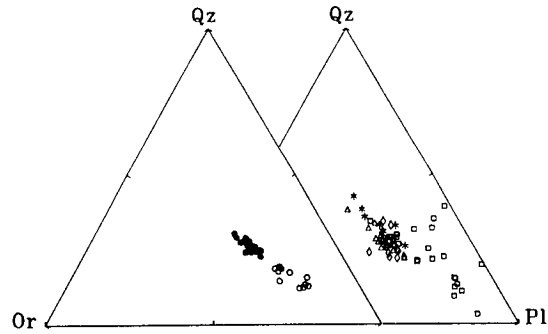


Fig. 4. Normative quartz-orthoclase-plagioclase diagram for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig.3.

화학분석자료에 근거한 암석화학적 분류에 의하면, 울산화강암은 아다멜라이트~화강섬록암의 영역 및 알칼리장석 화강암~화강암 영역에 점시되며, 마산암류와도 상당 부분 일치한다(이인호, 1993).

노움 및 화학조성

노움 석영-정장석-사장석도(Fig. 4)에 의하면, 울산화강암은 경상분지내 백악기 화강암류의 분화과정(진명식, 1981; 이준동, 1987)과 대체로 일치되는 영역에 점시된다. 분화정도는 진동화강암류보다도 현저히 더 진행된 영역에 점시되고 마산암류(이준동, 1987), 유천-언양화강암류(이진국, 1986; 이재영, 1989) 및 온정리화강암(이재영외, 1992)에 대하여는 약간 덜 분화된 영역에 점시된다.

AFM도(Fig. 5)에서도 울산화강암은 경상분지내 백악기 화강암류의 분화과정(진명식, 1981; 이준동, 1987)과 대체로 일치되는 영역에 표시되며, 칼크-알칼리 계열에 속한다. 본 도는 백악기 화강암류가 속하는 광상구의 구분에도 활용될 수 있다. 비교대상이 된 백악기 화강암류의 평균 화학성분치는 Table 2에 있다.

화강암류와 광상구

일반적으로 화성광상의 광종은 관련 암석의 암류와 밀접한 관계를 가지는데, 경상분지내 백악기 화강암류(Kim et al.1981; Lee, 1981)도 불국사 화강암류는 동, 연-아연, 금-은, 중석-취수연, 창연, 코발트, 철등의 광상과 관련되고 특히 흑운모 화강암에 이들 광상이 많이 발달한다. 그리고 마산암류는 동, 연-아연, 금-은, 철등의 광상과 관련되고 철(자철석)광상은 주로 미문상 화강암에 발달한다(이상만, 1972). 또한, 광상구와의 관계를 보면 동광상구는 화강섬록암과 석영섬록암(이재영, 1989; 이재영외, 1994; 이진국외, 1994), 연-아연광상구는 화강암(이진국, 1986;

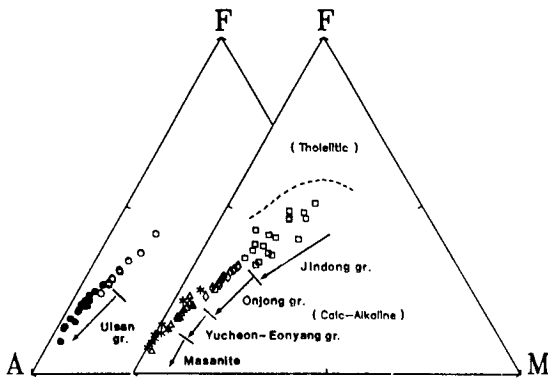


Fig. 5. A-F-M diagram for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

이재영, 1989; 이재영외, 1990), 연·아연/취수연광상구는 화강암과 화강섬록암(이재영외, 1992)에 관련되고, 철광상구는 화강암과 관련됨(이재영, 1992)이 본 연구의 결과 구체적으로 재확인되었다(Fig. 3 참조).

한편, 경상분지내에는 안산암, 조면안산암, 석영반암, 장석반암등(김상욱, 1982)을 모음으로써 백악기말-제3기초 화강암류(김옥준, 1982)의 열수작용과 관련이 있는 고령토, 벤토나이트, 남석등의 비금속 광상이 발달한다. 이들 비금속 광상은 주로 모암의 암류와 암질에 따라 광종이 다르다.

지구화학

울산화강암

분화지수(D.I.)

경상분지내 광상구의 광종은 관련 화강암류의 화학조성과 밀접한 관계를 가지고 있으므로(Lee, 1984; 이진국, 1986; 이재영, 1989), 분화지수는 철광상구의 울산화강암을 동광구의 진동화강암, 연·아연 광상구의 유천·연양 화강암, 연·아연/취수연 광상구의 온정리 화강암류로부터 구분하는데 이용될 수 있다(이재영외 1992, 이재영외, 1994). 그런데 이것은 울산화강암은 단지 5개 시료의 분석치로서 타 광상구의 화강암류와 비교한 것이므로, 본 연구에서는 이를 구체적으로 확인하기 위하여 총 31개 시료를 분석하고 비교검토하였다. 울산 화강암의 분화지수는 철광상과 관련있는 흑운모 화강암이 86.5~95.2로, 연·아연 광상구의 유천·연양 화강암(85~95)과는 많이 중첩되나, 동광상구의 진동화강암류(50~78) 및 연·아연/취수연 광상구의 온정리 화강암(74~82)과는 현저히 구분된다. 그리고 철광상과 관련이 많은 마산암류(95~98)와는 매우 가까운 값을 보인다. 따라서 분화지수는 경상분지내 백악기 화강암류가 속하는 광상구의 주광

종을 구분하는데 효과적인 지시요소가 될 수 있다.

주원소

경상분지내 화강암류의 주원소 함량(Table 3)은 분화지수와 밀접한 관계를 가지고, 관련 광종에 따라 현저한 차이를 보이며, 분화지수에 각 주원소의 함량을 결합한 관계도(Fig. 6)는 각 화강암류가 속하는 광상구의 광종을 구분하는데 매우 효과적인 척도가 될 수 있다. Fig. 6에서 보는 바와 같이, 분화지수가 증가함에 따라 SiO_2 , K_2O 함량은 증가하고 CaO , MgO , Al_2O_3 등은 감소하는 정상적인 분포경향을 보이며, 화강암류는 관련 광상구의 광종에 따라 서로 다른 영역에 점시되므로 울산화강암은 타 광상구의 화강암류와 비교적 쉽게 구분할 수 있다.

그리고 울산화강암은 철광상과 관련이 많은 마산암류와 분화지수가 일부 중첩되지만 SiO_2 , FeO , TiO_2 , P_2O_5 함량에 현저한 차이를 보이므로 이들 원소의 함량으로라도 구분할 수 있다.

1) 칼륨

K함량은 일반적으로 염기성암에서 낮고 산성암에서 높는데, 울산화강암의 K함량도 분화가 진행될수록 증가하며, 이러한 현상은 경상분지내 백악기 화강암류의 경향과 대체로 일치한다. 울산화강암의 K함량은 3.18~4.58%(평균=4.10%)로 분화지수에 대하여 비례적 증가를 보이며, 진동화강암과 온정리화강암으로 부터 현저히 구분된다. 유천·연양화강암과는 일부 중첩되지만, 분화지수에 대하여 K함량이 다소 높게 점시되므로 구분이 가능하다. Na함량은 K함량과는 반대로 분화가 진행됨에 따라 증가하지는 않고 오히려 감소하는 경향을 보인다. 울산화강암의 Na함량은 4.09~4.99%(평균=4.71%)로 마산암류와는 유사하나 진동화강암류 및 온정리화강암($Na < 4.0\%$)과는 현저히 구분된다. 유천·연양화강암과는 분화지수가 중첩되나 울산화강암의 Na함량이 다소 높게 나타나므로 구분이 가능하다.

2) 칼슘

Ca함량은 일반적으로 염기성암에서 높고 산성암에서 낮는데, 울산화강암의 Ca함량도 분화가 진행될수록 증가하며, 경상분지내 백악기 화강암류의 경향과 일치된다. 울산화강암의 Ca함량은 0.37~1.63%(평균=0.9%)로 분화지수에 대하여 반비례적 감소를 보이며, 마산암류와는 일부 중첩되지만 다소 높고, 경상분지내 타 광상구의 백악기 화강암류들과 비교해 볼 때, 대체로 구분이 가능하다. 연·아연 광상구의 유천·연양 화강암과는 구별이 어렵다.

3) 마그네슘

Mg함량도 암석분화가 진행됨에 따라 감소하며, 경상분지내

Table 3. The major oxides and normative compositions of Ulsan granite.

Biotite Granite(D.I.=86.45-95.19)																
	02	05	06	08	09	10	11	13	17	18	19	20	21	22	24	32
SiO ₂	72.29	73.42	70.06	73.34	73.52	73.17	71.92	71.92	71.99	71.99	72.79	67.84	72.26	75.03	75.22	74.13
TiO ₂	0.36	0.26	0.45	0.29	0.33	0.34	0.37	0.31	0.34	0.36	0.31	0.55	0.35	0.14	0.17	0.29
Al ₂ O ₃	13.52	12.88	14.02	13.50	13.15	13.57	13.74	13.68	13.65	13.96	13.94	15.66	13.70	12.99	12.90	12.95
Fe ₂ O ₃	1.29	0.90	0.70	0.10	0.46	0.98	1.51	0.68	0.52	1.31	0.38	1.38	1.00	0.43	0.60	0.77
FeO	0.97	1.36	2.08	0.85	1.15	0.77	0.92	1.78	2.09	1.00	1.51	1.82	1.37	0.88	0.77	1.22
MnO	0.07	0.05	0.07	0.07	0.08	0.05	0.08	0.06	0.09	0.09	0.04	0.09	0.04	0.04	0.05	0.09
MgO	0.53	0.32	0.55	0.31	0.42	0.23	0.44	0.42	0.43	0.39	0.32	0.70	0.50	0.18	0.18	0.34
CaO	0.77	0.67	1.14	1.06	0.79	0.52	0.95	0.97	0.67	0.80	1.16	1.63	0.37	0.66	0.67	0.60
Na ₂ O	4.85	4.46	4.90	4.91	4.76	4.90	4.89	4.66	4.81	4.99	4.33	5.50	4.51	4.25	4.09	4.62
K ₂ O	3.89	4.44	3.80	4.54	4.23	4.19	4.25	3.92	4.03	4.01	3.99	3.18	3.97	4.60	4.58	4.34
P ₂ O ₅	0.08	0.05	0.12	0.06	0.07	0.07	0.09	0.07	0.07	0.09	0.07	0.14	0.08	0.03	0.03	0.05
Ig. Loss	0.97	0.91	1.70	0.62	0.80	0.95	0.68	1.30	0.92	0.86	0.83	0.16	1.56	0.55	0.61	0.41
Qtz	25.26	0.05	0.07	0.07	0.08	0.05	0.08	0.06	0.09	0.09	0.04	0.09	0.04	0.04	0.05	0.09
Or	23.30	26.65	22.94	26.98	25.24	25.06	25.32	23.59	24.14	23.93	23.95	18.98	23.98	27.53	27.46	25.88
Ab	44.20	40.74	44.89	44.39	43.23	44.56	44.28	42.56	43.84	45.27	39.47	49.83	41.43	38.67	37.26	41.86
An	3.35	2.02	5.00	1.39	2.04	2.17	3.03	4.41	2.88	3.46	5.34	7.23	1.33	2.78	3.16	1.80
Co	0.14	0.00	0.06	0.00	0.00	0.20	0.00	0.20	0.37	0.16	0.63	0.60	1.67	0.00	0.07	0.00
Di	0.00	0.83	0.00	2.79	1.16	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.68
Hp	1.70	1.71	3.82	0.43	1.72	0.78	0.78	3.15	3.78	1.37	2.64	3.19	2.44	1.30	1.13	1.69
En	1.48	0.73	1.55	0.21	0.87	0.65	0.78	1.17	1.20	1.10	0.90	1.94	1.42	0.46	0.50	0.78
Fs	0.22	0.99	2.27	0.23	0.85	0.12	0.00	1.98	2.58	0.27	1.74	1.25	1.02	0.85	0.62	0.91
Ilm	0.51	0.37	0.64	0.41	0.47	0.48	0.53	0.45	0.48	0.51	0.44	0.77	0.50	0.20	0.23	1.41
Mt	1.37	0.96	0.75	0.11	0.49	1.04	1.55	0.72	0.55	1.38	0.40	1.46	1.07	0.46	0.64	0.81
Hm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ap	0.17	0.11	0.25	0.13	0.15	0.14	0.19	0.15	0.16	0.18	0.17	0.30	0.18	0.06	0.06	0.11
D.I.	92.76	94.00	89.49	94.74	93.98	95.19	92.99	90.92	91.78	92.94	90.39	86.45	92.82	94.94	94.72	94.50

Biotite Granite					Hornblende-Biotite Granodiorite										
	33	34	36	39	40	26	27	28	29	30	31	42	43	45	46
SiO ₂	72.61	72.09	72.86	72.68	71.92	64.42	65.13	61.71	65.70	65.68	63.88	63.70	63.79	67.31	68.70
TiO ₂	0.34	0.34	0.26	0.27	0.67	0.62	0.91	0.60	0.51	0.68	0.61	0.65	0.65	0.44	0.46
Al ₂ O ₃	13.41	13.54	13.76	13.70	14.23	16.81	16.42	15.91	15.26	15.28	16.36	16.38	16.21	15.76	15.18
Fe ₂ O ₃	1.17	0.87	0.63	0.66	0.66	1.52	1.92	2.46	0.93	1.58	1.66	3.08	2.53	0.38	0.91
FeO	1.22	1.37	1.56	1.67	1.67	2.42	1.75	3.85	2.87	1.67	1.90	1.86	2.35	2.65	1.86
MnO	0.12	0.12	0.05	0.06	0.06	0.14	0.10	0.14	0.16	0.11	0.09	0.11	0.07	0.07	0.07
MgO	0.42	0.50	0.34	0.38	0.40	1.11	0.95	1.90	1.00	0.86	0.95	1.32	1.52	0.87	0.77
CaO	0.73	0.85	1.09	1.27	1.53	2.91	2.50	3.26	1.92	2.28	2.37	2.41	3.04	2.32	1.86
Na ₂ O	4.76	4.80	4.59	4.50	4.77	5.86	6.35	5.21	4.86	5.07	5.11	5.98	5.47	5.40	5.38
K ₂ O	4.14	4.12	4.00	4.10	3.71	2.64	2.39	2.30	3.30	3.31	3.51	2.82	2.14	2.87	3.23
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.02	0.18	0.40	0.18	0.16	0.18	0.31	0.28	0.15	0.13
Ig. Loss	0.78	0.94	0.57	0.36	0.46	0.95	1.35	1.78	2.78	3.26	3.08	1.37	1.52	1.21	0.92
Qtz	25.00	23.93	25.52	25.17	23.76	11.30	11.96	11.57	17.12	16.75	13.55	11.11	14.31	16.23	18.23
Or	24.77	24.70	23.86	24.46	22.11	15.61	14.16	13.82	20.13	20.19	21.31	16.74	12.80	17.14	19.25
Ab	43.29	43.71	41.68	40.76	43.17	52.72	57.21	47.65	45.01	46.95	47.12	53.96	49.84	48.98	48.68
An	3.00	3.26	5.07	5.14	6.51	11.82	9.31	13.47	8.62	9.44	10.87	9.57	13.41	10.41	7.82
Co	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.31	0.00	0.06	0.00	0.00
Di	0.16	0.43	0.00	0.64	0.54	1.06	1.55	0.25	0.00	0.95	0.00	0.36	0.00	0.18	0.52
Hp	1.90	2.42	2.66	2.62	2.70	4.52	2.54	8.46	6.18	2.95	3.70	3.53	5.38	5.70	3.61
En	1.14	1.28	0.94	0.95	1.00	2.75	2.02	5.25	2.86	2.11	2.70	3.48	4.27	2.38	2.01
Fs	0.77	1.14	1.72	1.67	1.69	1.77	0.51	3.21	3.32	0.83	1.01	0.05	1.11	3.32	1.61
Ilm	0.48	0.48	0.36	0.37	0.38	0.94	0.87	1.29	0.86	0.74	0.97	0.85	0.91	0.63	0.65
Mt	1.24	0.92	0.67	0.70	0.70	1.59	2.01	2.62	1.00	1.70	1.78	3.24	2.68	0.40	0.96
Hm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ap	0.15	0.15	0.13	0.14	0.14	0.43	0.38	0.86	0.39	0.34	0.38	0.64	0.60	0.32	0.27
D.I.	93.07	92.34	91.07	90.39	89.04	79.63	83.34	73.05	82.25	83.89	81.98	81.81	76.95	82.36	86.16

Table 4. The trace elements of Ulsan granite.

(Unit = ppm)

	Biotite Granite															
	02	05	06	08	09	10	11	13	17	18	19	20	21	22	24	32
Ba	794.0	739.0	745.0	729.0	598.0	753.0	703.0	750.0	755.0	817.0	793.0	588.0	705.0	282.0	340.0	697.0
Co	16.0	32.0	25.0	29.0	79.0	56.0	25.0	34.0	44.0	24.0	28.0	29.0	33.0	37.0	60.0	26.0
Cr	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	3.0	4.0	4.0
Cu	3.0	6.0	2.0	3.0	4.0	2.0	2.0	3.0	3.0	2.0	11.0	2.0	5.0	2.0	1.0	1.0
Li	14.0	17.0	16.0	9.0	20.0	33.0	18.0	18.0	23.0	16.0	16.0	16.0	18.0	22.0	25.0	36.0
Nb	13.0	13.0	13.0	15.0	16.0	17.0	15.0	12.0	15.0	13.0	12.0	16.0	14.0	15.0	11.0	17.0
Ni	4.0	2.0	2.0	3.0	5.0	2.0	3.0	3.0	4.0	4.0	6.0	2.0	3.0	4.0	3.0	3.0
Pb	8.0	10.0	7.0	9.0	9.0	7.0	6.0	10.0	5.0	10.0	2.5	12.0	9.0	7.0	5.0	12.0
Rb	94.0	98.0	79.0	110.0	109.0	111.0	101.0	90.0	97.0	98.0	85.0	80.0	98.0	146.0	152.0	121.0
Sc	6.0	6.0	7.0	6.0	6.0	6.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	8.0	6.0	3.0	3.0	6.0
Sr	91.0	74.0	167.0	66.0	74.0	64.0	113.0	119.0	84.0	118.0	150.0	249.0	80.0	54.0	62.0	58.0
V	14.0	10.0	19.0	10.0	12.0	11.0	16.0	14.0	14.0	14.0	15.0	21.0	14.0	5.0	5.0	10.0
Y	38.0	42.0	34.0	52.0	58.0	47.0	53.0	40.0	54.0	41.0	34.0	52.0	28.0	32.0	22.0	46.0
Zn	48.0	59.0	52.0	72.0	91.0	58.0	50.0	51.0	74.0	73.0	60.0	105.0	67.0	27.0	44.0	67.0
Zr	26.0	29.0	45.0	50.0	34.0	46.0	65.0	27.0	40.0	42.0	21.0	24.0	38.0	29.0	25.0	28.0
La	45.0	47.0	42.0	47.0	48.0	49.0	46.0	45.0	44.0	45.0	42.0	43.0	29.0	33.0	32.0	48.0
Ce	89.0	84.0	81.0	88.0	94.0	85.0	89.0	87.0	89.0	90.0	78.0	82.0	53.0	58.0	60.0	94.0
Nd	39.0	37.0	38.0	43.0	41.0	55.0	41.0	36.0	39.0	40.0	35.0	43.0	24.0	20.0	19.0	94.0
Sm	6.8	6.7	7.0	7.6	8.5	10.4	8.0	7.1	7.9	7.7	6.5	6.5	4.7	4.3	3.9	7.5
Eu	0.8	0.7	1.1	0.7	0.7	1.0	1.0	0.8	0.9	1.0	0.8	1.4	0.5	0.3	0.3	0.7
Dy	4.5	4.6	3.8	5.8	6.0	6.4	6.0	4.5	6.1	4.9	4.2	6.7	3.0	3.3	2.0	5.1
Yb	3.3	3.6	2.8	4.6	5.0	4.5	4.9	3.1	4.6	3.6	2.9	2.7	2.7	3.4	2.1	4.0

	Biotite Granite				Hornblende-Biotite Granodiorite											
	33	34	36	39	40	26	27	28	29	30	31	42	43	45	46	
Ba	798.0	710.0	638.0	663.0	596.0	680.0	555.0	519.0	802.0	507.0	681.0	621.0	580.0	575.0	595.0	
Co	36.0	55.0	53.0	33.0	39.0	29.0	24.0	17.0	19.0	30.0	19.0	40.0	27.0	34.0	38.0	
Cr	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0	6.0	4.0	8.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	
Cu	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	3.0	2.0	5.0	17.0	2.0	2.0	1.0	2.0	4.0	3.0	
Li	24.0	25.0	29.0	47.0	44.0	13.0	19.0	32.0	31.0	26.0	22.0	44.0	23.0	17.0	25.0	
Nb	15.0	15.0	13.0	11.0	11.0	13.0	15.0	11.0	13.0	11.0	12.0	12.0	11.0	11.0	12.0	
Ni	3.0	6.0	2.0	4.0	2.0	5.0	3.0	7.0	5.0	1.0	7.0	4.0	3.0	4.0	3.0	
Pb	17.0	15.0	2.5	6.0	2.5	6.0	5.0	2.5	19.0	2.5	2.5	5.0	7.0	6.0	2.5	
Rb	113.0	118.0	114.0	119.0	113.0	68.0	65.0	95.0	75.0	90.0	96.0	113.0	71.0	82.0	93.0	
Sc	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	10.0	10.0	16.0	6.0	7.0	6.0	6.0	8.0	6.0	6.0	
Sr	78.0	85.0	114.0	129.0	148.0	346.0	285.0	418.0	239.0	184.0	294.0	155.0	414.0	276.0	227.0	
V	13.0	13.0	12.0	14.0	15.0	36.0	31.0	89.0	30.0	18.0	26.0	15.0	50.0	28.0	27.0	
Y	61.0	45.0	35.0	36.0	37.0	39.0	52.0	41.0	36.0	28.0	21.0	38.0	37.0	30.0	35.0	
Zn	96.0	98.0	39.0	53.0	45.0	98.0	54.0	92.0	1344.0	66.0	80.0	46.0	89.0	53.0	40.0	
Zr	45.0	48.0	12.0	18.0	24.0	22.0	38.0	19.0	20.0	20.0	18.0	20.0	18.0	21.0	24.0	
La	45.0	42.0	32.0	29.0	37.0	39.0	45.0	36.0	42.0	43.0	35.0	40.0	37.0	35.0	33.0	
Ce	88.0	85.0	61.0	55.0	69.0	74.0	84.0	71.0	81.0	83.0	64.0	73.0	71.0	67.0	66.0	
Nd	88.0	85.0	61.0	55.0	69.0	38.0	40.0	37.0	40.0	40.0	64.0	73.0	71.0	28.0	29.0	
Sm	8.2	7.6	5.9	5.4	6.1	7.2	8.2	7.5	7.8	7.8	5.1	6.4	7.0	5.6	6.2	
Eu	0.9	0.8	0.7	0.7	0.8	1.6	1.4	1.4	1.4	1.3	0.8	1.3	1.0	1.0	1.0	
Dy	6.8	4.9	3.8	3.8	4.0	4.5	6.0	5.1	4.6	3.3	2.1	4.1	4.3	3.1	3.8	
Yb	5.3	3.7	3.3	3.2	3.3	2.8	4.1	2.9	2.7	2.1	1.4	3.4	2.8	2.1	2.5	

백악기 화강암류에서도 같은 양상을 보인다. 울산화강암의 Mg 함량은 0.18~0.70%(평균=0.40%)로 연-아연 광상구의 연양-유천 화강암과 많이 중첩되지만, 경상분지내 타 광상구의 화강암들과 구분이 가능하다. 마산암류에 비하면 Mg함량이 약간 높아

구분에 도움이 된다.

4) 철

2가철 및 3가철의 함량은 암석분화가 진행됨에 따라 감소하며

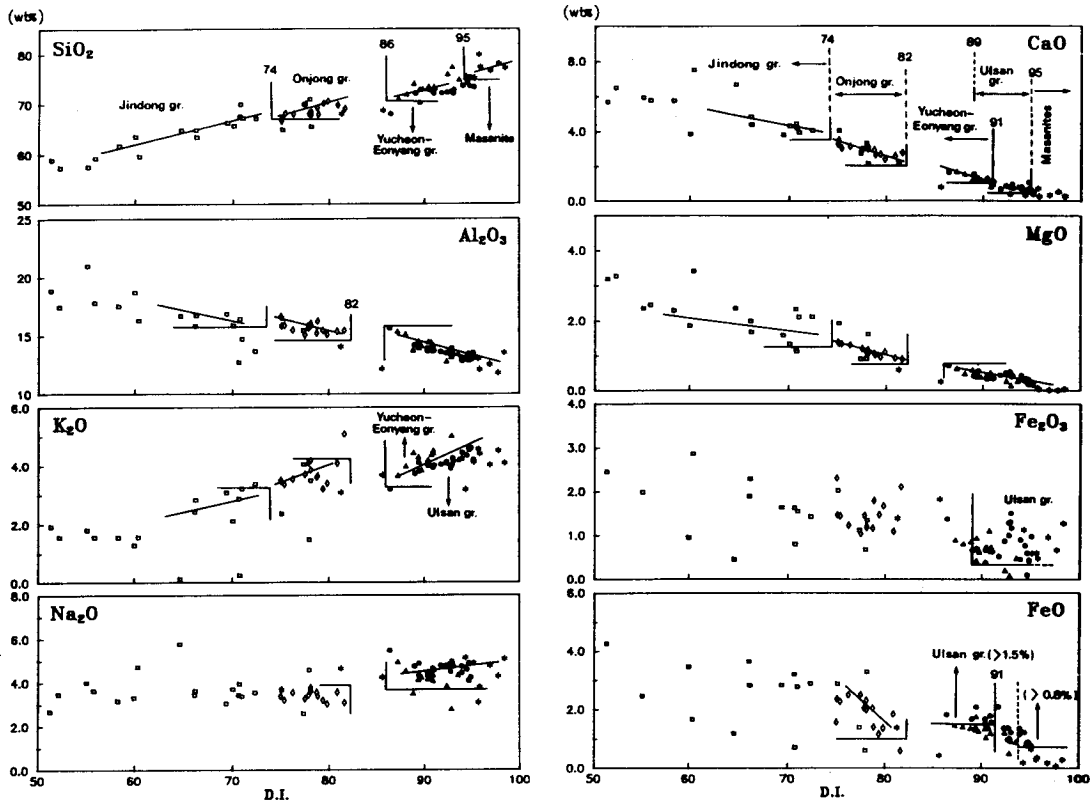


Fig. 6. Variation of major oxides versus D.I. for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

경상분지내 백악기 화강암류도 같은 경향을 보여준다. 울산화강암의 3가철의 함량은 0.1~1.51% (평균=0.81%)로서 진동화강암 및 온정리화강암과는 현저히 구별이 되고, 분화정도가 비슷한 유천-연양 화강암 및 마산암류와는 구분이 어렵다. 2가철의 함량은 0.04~2.09%(평균=1.33%)로 분화지수에서는 많은 부분이 중첩되지만 유천-연양화강암 및 마산암류와 확연하게 구분된다. 즉, 울산화강암은 유천-연양 화강암과 비교해서 분화지수 91 이하의 영역에서 2가철의 함량이 높게 나타나며($Fe^{2+} > 1.5\%$), 마산암류에 비해서 전체적으로 높은 함량($Fe^{2+} > 0.8\%$)을 보인다.

5) 미량원소

경상분지내 백악기 화강암류의 미량원소 함량(Table 4)도 광상구의 광종을 구분하는데 지시성이 있으므로(이재영, 1989; 이재영외, 1994; 이진국의, 1994) 주원소와의 치환성 및 광상구의 광종을 고려하여, Rb, Sr, Cu, Pb, Co를 선택하여 그 함량을 분화지수에 대하여 비교하였다(Fig. 7). 그리고 미량원소간 및 주원소에 대한 미량원소의 함량과 비도 일부 비교하였다.

6) 루비듐

Rb는 K-광물에 허용되어 화강암에서는 주로 흑운모나 백운모,

K-장석에 포함된다. 울산화강암의 Rb함량은 80~140 ppm(평균=107 ppm)로, 분화지수에 비례하는 양상을 보이며, 경상분지내 타 광상구의 화강암류와 구분이 가능하다. 유천-연양화강암과도 유천-연양화강암체는 대체로 Rb>140 ppm 영역에 점시되고 울산화강암은 Rb<140 ppm 영역에 점시되므로 확연히 구분된다(Fig.8). 이는 울산 화강암이 유천-연양화강암보다 정장석(이재영, 1992) 및 K의 함량이 대체로 낮은 것과 관련이 있다. 또한 K/Rb비로도 구분이 가능한데 울산 흑운모 화강암은 K/Rb=260~390이고, 유천-연양화강암체 및 온정리화강암은 K/Rb=170~260이다. 진동화강암체와는 K의 함량(K>2.8%)만으로 구분이 가능하다.

7) 스트론튬

Sr은 K에 다소 포획되나 주로 Ca에 허용되므로, 화강암에서는 사장석에 들어 있다. 따라서 스트론튬의 함량은 칼슘처럼 분화지수에 대하여 역비례적 관계를 보이며, Ca함량이 높은 진동화강암과 온정리화강암에서 높고, 반대로 Ca함량이 비교적 낮은 울산화강암과 유천-연양화강암에서는 낮아 울산화강암은 유천-연양화강암과는 일부 중첩되지만 경상분지내 타광상구의 화강암류와 구분이 가능하다. Sr-Ca도(Fig.9)에서 보면 울산화강암은

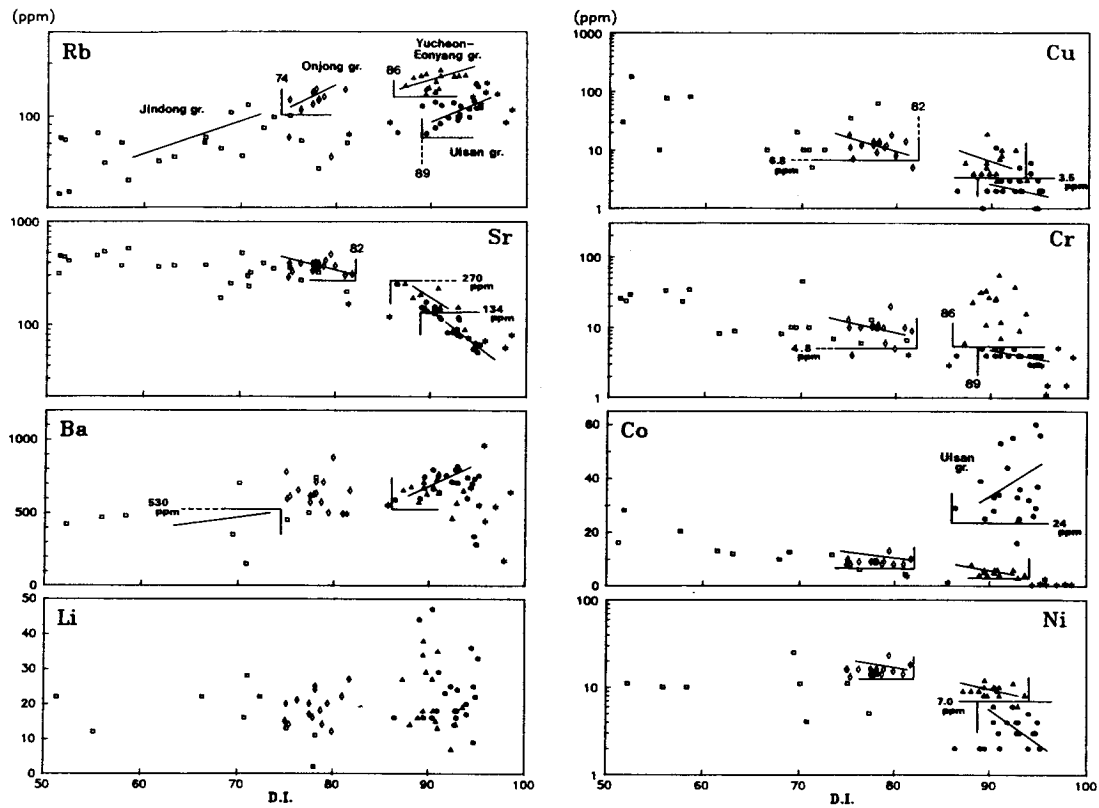


Fig. 7. Variation of trace elements versus D.I. for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

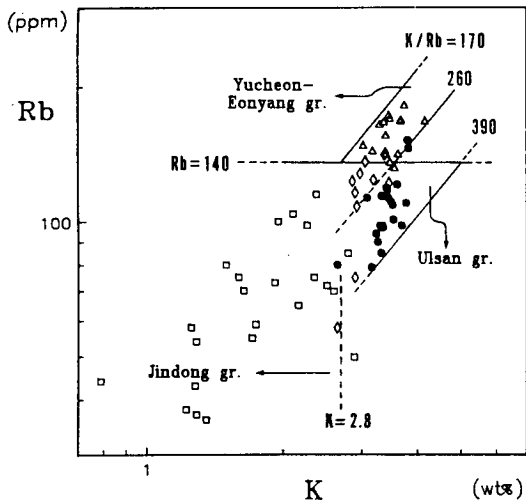


Fig. 8. Variation of Rb against K content for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

Ca=1.5%, Sr=270 ppm을 경계로 하여 진동화강암 및 온정리화강암과 구분되고, 또한 Sr=134 ppm을 경계로해서 유천-언양 화강암과의 구분이 가능하다. 울산화강암은 Ca/Sr=76를 경계

로해서 진동화강암과 구분되고, K/Rb=270을 경계로하여 유천-언양 화강암 및 온정리화강암과 구분이 가능하다(Fig. 10). 즉, 울산화강암은 Ca/Sr=76, K/Rb=270의 영역에 제한적으로 점서되어 경상분지내 타광상구의 화강암체들과 명백하게 구분이 된다.

8) 루비듐/스트론튬

Rb는 K-광물에 허용되어 운모류나 K-장석에 포함되고, Sr은 칼슘광물에 허용되면서 마그마에서 빠져 나오게 된다. 따라서 Rb/Sr은 K, Ca의 함량 및 분화지수와 밀접한 관계를 가진다. Rb/Sr-K/Rb도에 의하면 울산 화강암은 유천-언양 화강암과는 일부 중첩되지만 진동화강암류(Rb/Sr<0.25) 및 온정리화강암(Rb/Sr<0.5)과는 현저히 구분되며, 유천-언양 화강암과도 K/Rb=270을 경계로 하여 구분된다(Fig. 11).

9) 동

동은 자연계에서는 주로 황화물로서 산출되나 마그마 분화과정에서 Fe²⁺를 함유하는 조암광물에도 포함될 수 있으므로, 경상분지내 일반 백악기 화강암류의 Cu함량은 Fe²⁺ 함량에 비례적이며, 타 광상구의 화강암류에 비하여 동함량이 높을 것으로

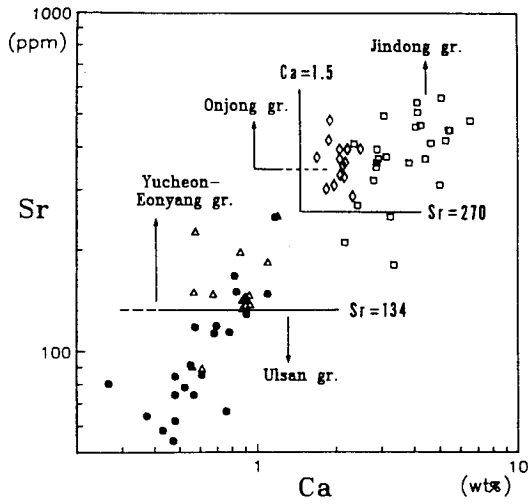


Fig. 9. Variation of Sr against Ca content for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

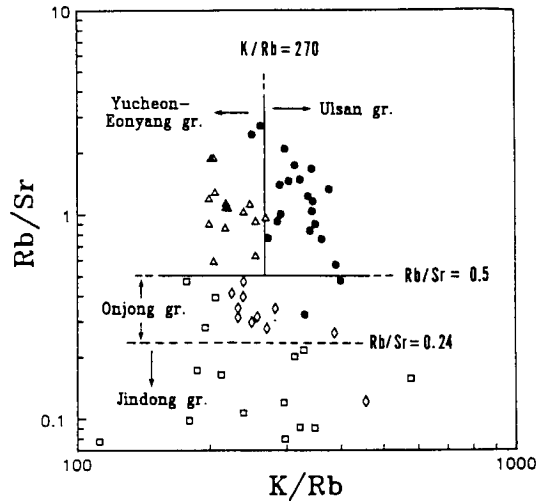


Fig. 11. Variation of Rb/Sr-K/Rb ratios for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

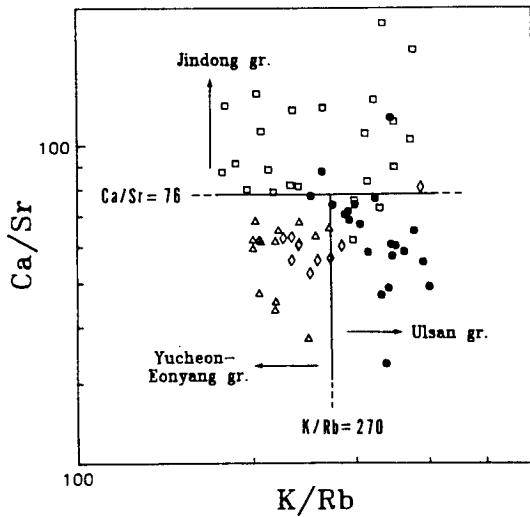


Fig. 10. Variation of Ca/Sr-K/Rb ratios for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

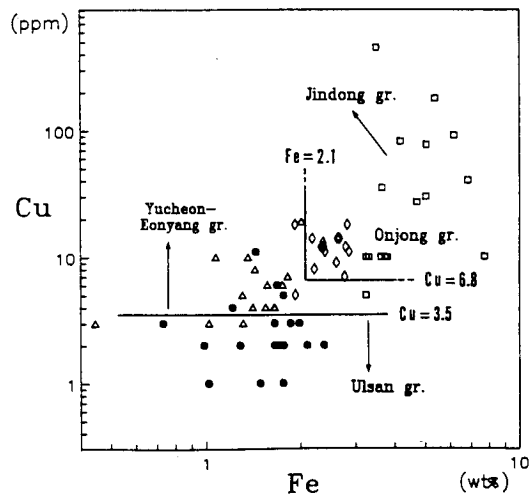


Fig. 12. Variation of Cu against Fe for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

기대된다.

울산화강암의 동함량(평균=2.9 ppm)은 유천-언양 화강암(7.8 ppm), 온정리화강암(11.9 ppm), 진동화강암류(58.05 ppm)에 비하여 현저히 낮다. 동함량을 철함량에 대하여 접시 하면(Fig. 12), 울산 화강암은 Cu=6.8 ppm, Fe=2.1%를 경계로 진동화강암류 및 온정리화강암과 구분되고, 유천-언양화강암은 Fe함량으로서는 구분되지 않으나 Cu=약 3.5 ppm을 경계로 하여 구분이 가능하다. 그리고 동광화지역인 군북-함안지역(최석원, 1986)의 진동화강암류는 동함량이 높으므로 타 광상구의 화강암류로부터 구분된다.

이재영 등(1992)에 의하면, 경상분지내 화강암류의 동함량은, 철광상 분포지역(김해-물금-울산)의 화강암류가 동광상 분포지역(구만면-여항면-군북-함안)의 진동화강암류보다 낮아 철광상 관련 화강암류는 동광상 관련 화강암류로 부터 구분이 가능하다(이재영, 1992).

10) 연

Pb는 K에 허용되어 K-광물에 포함되므로 연은 대부분의 화강암류에는 소량이나마 함유된다. 또한, 동과 마찬가지로 연광 화작용과 관련된 화강암류에서 그 함량이 높다. 그러나 본 연구

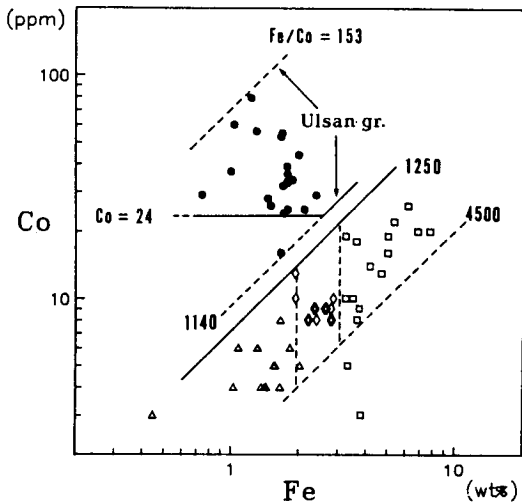


Fig. 13. Variation of Co against Fe for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

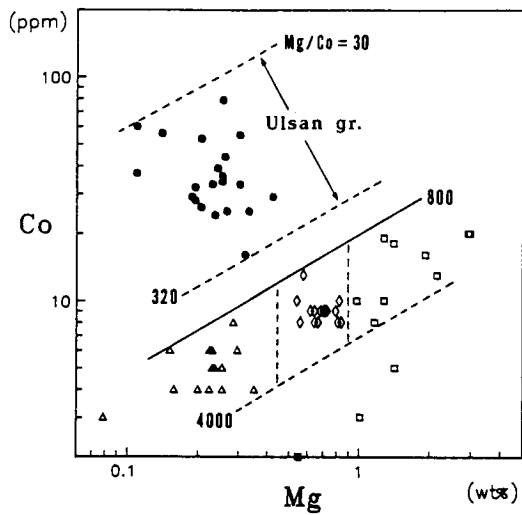


Fig. 14. Variation of Co against Mg for the Cretaceous granitic rocks. Symbols are the same as those in Fig. 3.

에서는 연·아연광상구의 유천-연양 화강암(평균=7.9 ppm)은 불모성 화강암이므로 동함량이 낮을 수 있다고 보더라도 연·아연/취수연광상구의 온정리화강암(평균=8.7 ppm)도 동광상구의 진동화강암류(평균=34 ppm)보다 동함량이 낮으며 울산화강암(평균=8.2 ppm)과 비슷하다. 따라서 연은 화강암류가 속하는 광상구의 광종 구분에는 지시성이 약하다.

11) 코발트

Co²⁺(0.72Å)는 이온반경이 Fe²⁺(0.74Å)에 거의 같아 철화합물에 위장이 잘 되므로, 코발트 함량은 분화지수가 낮고 철이 많은 화강암류에서 높고, 반대로 분화지수가 높고 철이 적은 화강암류에서 낮는데, 경상분지내 백악기 화강암류들도 이에 일치한다. 그러나 울산화강암은 이와는 반대로 코발트 함량이 타 백악기 화강암류에 지하여 훨씬 높다. 그 결과 울산화강암의 Fe/Co비는 153-1140로 타 광상구의 화강암류(1250~4500)보다 현저히 낮아지며 구분에 도움이 된다(Fig. 13). 이것은 경상분지내 타 광상구의 화강암류들에 대하여 울산화강암이 가지는 대표적 차이점이다. 한편 Co²⁺의 실질적인 반경은 Mg²⁺와 거의 비슷(Nockolds et al., 1953-6)한데 Co-Mg함량도(Fig. 14)에서 보면, 경상분지내 타 광상구의 화강암체들이 Mg/Co=800~4000영역에 점시되데 반하여, 울산화강암은 Mg/Co=30~320영역에 점시되며, 또한 Co>24 ppm, Mg<0.45%의 특징을 보이므로, 타 광상구와 구분된다. 울산화강암은 Co-Fe도 및 Co-Mg도에서도 마산암류와 현저히 구분된다(이인호, 1993).

화강암내 원소의 분포

Table 5. Distribution of elements in Ulsan granite

element	hornblende		biotite granite		
	av.	av.	inner	intermediate	margin
D.I.	92.21	81.14	73-<85	85-93	>93-95
SiO ₂	72.53	65.00	63-<65	65-70	>70-75
K ₂ O	4.10	2.85	2.1-<3	3-4	>4-4.6
Na ₂ O	4.71	5.47	>6.5-5.5	5.5-5	<5-4.3
T.Fe	2.14	4.02	5->4	4-3	<3-1
Al ₂ O ₃	13.64	15.96	17-<16	16-15	<14-13
MgO	0.4	1.13	1.5->1	1-0.5	<0.5-0.2
Rb	107	85	65-<90	90-100	>100-120
Sr	104	284	400->200	200-100	<100-60
Ba	676	612	505-<600	600-700	>720-820
Cr	4	5	~6	~5	~4
Ni	3	4	2-4	5-7	2-4

content : wt.% for major elements; ppm for trace elements

화강암의 중심부에서 울산층과의 접촉부쪽으로 감에 따라 분화지수가 증가하고 이에 따른 주/미량 원소의 함량도 백악기 화강암류와 같은 증감현상을 보인다. 즉, SiO₂, K₂O, NaO, Rb는 증가하고 CaO, MgO, Al₂O₃, 전Fe, Sr, Ba은 감소한다. 따라서 사문암은 접촉부에서 화강암 성분의 평균 함량보다 SiO₂, K₂O, Na₂O, Rb는 농도가 높고 CaO, MgO, Al₂O₃, 전Fe, Sr, Ba은 농도가 낮은 마그마의 영향을 받게 된다. Table 5에는 울산화강암의 중심부에서 외각쪽으로는 함량변화를 보기 쉽도록 편 의상 암체의 안쪽(서부), 중간, 외각(동부)으로 구분하여 표시한 것이다.

사문암

사문암의 원암

과거에는 본 사문암은 돌로마이트질 석회암이 변질(박양대외, 1968)된 것으로 보았으나, 사문암은 울산층을 포획하고 있고, 또한 울산화강암에 의하여 관입되어 있으므로, 본 사문암의 원암은 석회암이 아닌 관입암이며, 관입시기는 울산화강암보다 먼저인 것으로 해석되었다(김정호, 1981). 그리고 본사문암은 SiO₂-Al₂O₃-MgO+FeO도, FeO+TiO₂-Al₂O₃-MgO도, Na₂O-CaO도에 의하면, 초염기성 내지 염기성암에 해당되며, SiO₂-CaO-MgO도에서 사방회석을 포함하는 주변의 톨슨닉켈대 사문암(Thomson nickel belt serpentine)영역에 접시된다. 또한 X선 회절분석의 결과 본 사문암에 사방회석과 감람석이 많이 공생한다(최수용, 1988; 박법정, 1989).

한편, 사문암의 화학분석 결과 Ni, Co, Cr 등의 함량이 매우 높는데, 이는 맨틀기원의 초염기성암에서 보편적으로 나타나는 특징들과 잘 부합하며, 특히 MgO함량이 높은 것은 원암이 고토감람석암을 암시한다(박법정, 1989; 김규환, 1990).

사문암과 울산화강암의 화학조성 비교

주원소 SiO₂, Al₂O₃, K₂O, Na₂O와 미량원소 Rb, Sr, Ba의 함량은 울산화강암이 현저히 높고 반대로 주원소 MgO, T. Fe와 미량원소 Cr, Ni의 함량은 사문암이 현저히 높다(Table 6). 사문암은 표에서 보는 바와 같이 SiO₂(29.08~43.30 wt.%), MgO(34.57~39.96 wt.%), FeO+Fe₂O₃ (6.63~10.25 wt.%)를 주성분으로 하여 구성되어 있으며, Al₂O₃, CaO, MnO, TiO₂, P₂O₅의 함량은 1 wt.% 전후이다(박법정, 1989).

따라서 화강암/사문암 접촉부에서의 두 암류간에 함량차이가 현저한 상기 주/미량원소를 선택하여 비교하면, 화강암의 관입에 의한 사문암 접촉부에서의 화학조성의 변화를 잘 알 수 있다.

화강암/사문암 접촉부

울산화강암의 관입으로 두 암체가 화학원소의 분포에서 상호 어떤 영향을 주고 받았는 지를 알기위하여 화강암/사문암의 접촉부에서 6개의 암석시료를 채취하여(접촉면에서 화강암과 사문암쪽으로 15 cm 간격으로 각각 3개씩) 분석한 자료(Table 7)에 의하면 화강암쪽에서 사문암쪽으로 감에 따라 화강암에서 함량이 높은 주원소 SiO₂, K₂O, Na₂O, Al₂O₃와 미량원소 Rb, Sr, Ba은 현저히 감소하고 반대로 사문암에서 함량이 높은 MgO, 전 Fe와 Ni, Cr는 화강암쪽으로 감에 따라 현저히 감소한다.

지질도상에서는 사문암체내에 화강암이 표시되어 있지 않으나 사문암하부에는 화강암과의 접촉이 기대되며, X-선 분석결과에서도 화강암의 관입으로 하부에서 변질을 받은 것으로 보이는 사문암은 lizardite와 chrysotile등 사문석의 발달이 양호하며, 칼륨, 나트륨의 함량이 현저히 높고 마그네슘 함량은

Table 6. Comparison of content between Ulsan granite and serpentinite

Element	Biotite granite	Serpentinite	Remarks
SiO ₂	72.53 (70.06 - 75.03)	38.21 (34.80 - 44.30)	gr.>serp.
TiO ₂	0.32 (0.17 - 0.45)	0.02 (0.01 - 0.04)	
Al ₂ O ₃	13.64 (12.90 - 14.02)	1.33 (0.56 - 2.65)	gr.>serp.
Fe ₂ O ₃	0.81 (0.46 - 1.38)		
FeO	1.33 (0.85 - 2.08)	7.43 (6.63 - 10.25)	serp.>gr.
MnO	0.07 (0.05 - 0.09)	0.11 (0.07 - 0.13)	
MgO	0.40 (0.23 - 0.55)	36.44 (34.57 - 39.96)	serp.>gr.
CaO	0.90 (0.6 - 1.53)	1.51 (0.08 - 5.77)	
Na ₂ O	4.71 (4.25 - 4.99)	0.02 (0.01 - 0.07)	gr.>serp.
K ₂ O	4.10 (3.8 - 4.58)	0.01 (0.01 - 0.02)	gr.>serp.
P ₂ O ₅	0.07 (0.05 - 0.12)	0.01 (0.01 - 0.04)	
Rb	107 (80 - 121)	10 (10 - 12)	gr.>serp.
Sr	104 (58 - 150)	8 (1 - 31)	gr.>serp.
Ba	676 (588 - 794)	8 (1 - 21)	gr.>serp.
Cr	4 (3 - 5)	1850 (1358 - 2749)	serp.>gr.
Ni	3 (2 - 6)	1923 (1740 - 4472)	serp.>gr.
Co	38 (24 - 56)	24 (6 - 78)	
Cu	3 (1 - 5)	10 (4 - 36)	
Pb	8 (3 - 17)	9 (5 - 10)	
Zn	63 (27 - 105)	58 (26 - 76)	

oxides : wt.%, trace : ppm

Table 7. Variation at the contact of serpentine with granite

	Granite		Granite/serpentine contact				serpentine	
	av	G1	G2	G3	S1	S2	S3	av
SiO ₂	72.53	69.00	69.08	54.22	38.18	40.22	42.22	38.21
K ₂ O	4.10	0.19	4.47	0.16	0.01	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	4.71	3.58	3.25	0.34	0.01	0.01	0.01	0.02
Al ₂ O ₃	13.64	13.27	13.48	10.23	0.61	0.63	0.71	1.33
T.Fe	2.14	2.24	2.15	5.54	8.07	7.09	6.30	7.43
MgO	0.40	1.90	2.17	15.86	37.39	34.88	34.57	36.44
Rb	107	105	122	7	10	10	10	10
Sr	104	114	166	20	1	1	1	8
Ba	676	906	1000	29	7	8	22	8
Cr	4	16	14	17	1115	1349	1228	1850
Ni	3	17	20	143	1961	1823	1586	1923

G : granite, S : serpentine

났다(이재영외, 1992).

결 론

1. 울산화강암은 흑운모 화강암과 각섬석 화강섬록암으로 되어 있으며, 울산 철광상에는 흑운모 화강암이 관련된다. 그리고 사문암의 사문석화에는 초염기성 내지 염기성암의 자열수 변질 작용외에도 흑운모 화강암의 열수작용이 부분적으로 관련된다.

2. 본 흑운모 화강암은 석영-카리장석-사장석 모달조성도에 의하면 주로 화강암 영역에 접시되며, 김해-물금 지역의 철광상 관련 화강암류의 영역과 대체로 일치한다. 그리고 흑운모의 절

대연령과 광물조성 및 조직을 포함한 암석학적 특징이 마산암류와 일치한다.

3. 울산 흑운모 화강암은 분화지수가 86-95로 분화지수만으로도 동광상구의 진동화강암(D.I.=50-78)과 연·아연/취수연 광상구의 온정리 화강암(74~82)으로 부터 현저히 구분된다. 연·아연 광상구의 유천-연양 화강암(87~93)과는 중첩되지만, 본 광상구에는 실제 연·아연 광상의 발달이 거의 없으므로 연·아연 광상구로서는 재검토해 볼 필요가 있다.

4. 울산 흑운모 화강암은 분화지수만으로도 타 광종 광상구의 백악기 화강암류로 부터 구분이 가능하나, 분화지수에 대한 주/미량 원소의 함량 변화는 분화지수만에 의한 광상구의 광종구분보다는 지시성이 높다. 그리고 주/미량 원소-D.I.관계도에서는 중첩되어 있어도 주원소-주원소, 주원소-미량원소, 미량원소-미량원소의 함량 및 함량비의 관계는 원소에 따라 차이가 있기 때문에 구분이 가능하다.

5. 울산화강암은 중심부에서 외각쪽으로(광산쪽) 분화지수가 증가하고 주/미량 원소의 함량은 분화지수에 대하여 백악기 화강암류와 같은 증감양상을 보인다. 즉, SiO₂, K₂O, Rb는 분화지수와 같이 증가하고 CaO, MgO, Al₂O₃, 전Fe, Sr, Ba는 감소한다. 따라서 사문암은 접촉부에서 화강암 성분의 평균 함량보다 SiO₂, K₂O, Rb는 농도가 높고 CaO, MgO, Al₂O₃, 전Fe, Sr, Ba는 농도가 낮은 마그마의 영향을 받게 된다.

6. 화강암/사문암 접촉부는 화강암쪽에서 사문암쪽으로 감에 따라 화강암에서 함량이 높은 SiO₂, K₂O, Na₂O, Al₂O₃, Rb, Sr, Ba는 감소하고 반대로 사문암에서 함량이 높은 MgO, 전Fe, Ni, Cr은 화강암쪽으로 감에 따라 감소한다. 따라서 이러한 화학조성의 변화는 야외에서 육안으로는 잘 관찰되지 않는 경우에는 사문암이 화강암에 의하여 영향을 받았는지를 확인하는데 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 전략광물연구센터의 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

김규한, 박재경, 양종만, 吉田尚弘 (1990) 울산철광산의 탄산염암과 사문암의 성인. 지질학회지, 26권, p. 407-417.

김규한, 박재경, 양종만, 佐竹洋 (1993) 울산철광산지역의 사문암의 사문석화 작용에 관한연구, 광산지질, 26권, p. 267-278.

김규한, 이진수, 박재경 (1992) 울산철광지역의 사문암의 사문석화 작용에 관한 연구. 전략광물연구센터, 1회 학술발표요약, 16p.

김상욱 (1982) 북부유천분지내에 분포하는 후기 백악기화강암류의 암석학적 연구. 서울대학교 박사학위 논문.

김옥준 (1971) 남한의 광상생성시기와 광상구. 지질학회지, 7권, p. 37-59.

김옥준, 민경덕, 윤석규, 이대성, 주승환 (1982) 한국 남부의 백악기말 이후의 화산활동과 광화작용에 대한 판구조론의 적용성 연구(1). 광산지질, 15권, p. 123-154.

김옥준, 이하영, 이대성, 윤석규 (1981) 남한 대석회암통의 층상과 지질구조. 광산지질, 6권, p. 81-114.

김정진 (1989) 울산광산의 접촉교대광상에 관한 연구. 경북대 이학박사학위 논문.

김정진, 최수용, 이효민 (1987) 울산광산에서 산출되는 탄산염암 복합체에 관한 고찰. 42차 대한지질학회 학술발표요약, 13p.

김정호 (1981) 경남울산광산일대에 분포하는 사문암에 대한 연구. 부산대 석사학위논문.

박기화, 박희인 (1980) 울산 철, 중석 광상의 성인, 광산지질, 13권, p. 104-116.

박법정 (1989) 울산 사문암(석면)광상의 성인에 대한 연구. 경북대학교 이학석사 학위논문.

박법정, 이재영 (1995) 경상분지내 울산 사문석(석면)광상의 성인에 관한 지화학적 연구. 한국지구과학회지, 16권, p. : 1차 교정중)

박양대, 윤희대 (1968) 한국지질도 울산도폭. 국립지질조사소.

박양대, 윤희대 (1968) 한국지질도 방어진도폭. 국립지질조사소.

박희인, 최광선, 정봉일 (1977) 울산철산 부근의 지질구조와 광화작용에 관한 지질학 및 지구물리학적 연구. 지질학회지, 13권, p. 179-189.

박희인, 우영균 (1982) 경남지구의 스키르형광상의 성인과 스키르광물에 관한 연구. 광산지질, 15권, p. 1-6.

신영식 (1986) 군북지역 진동화강암류의 화학원소와 광화작용과의 관계. 경북대학교 석사학위논문.

우영균 (1983) 경남 김해-물금지구 철광상의 성인에 대한 연구. 서울대학교 박사학위논문.

원종배, 강필중, 이상현 (1978) 경상분지의 구조해석과 Igneous Pluton에 관한 연구. 지질학회지, 14권, p. 79-92.

이기화, 엄창렬 (1992) 울산단층의 지진기탐사: 경상분지내 주요단층의 지구물리학적 연구. 지질학회지, 28권, p. 32-39.

이상만 (1972) 경상분지 내의 화강암류와 광화작용. 손치무 송수기념논문집, p. 195-219.

이윤중, 植田良夫 (1976) 한국경상남도 연양도폭 및 북서부 울산도폭지역산화강암류의 K-Ar 연대. 광산지질, 9권, p. 127-134.

이윤중 (1980) 연양 및 울산지역 화강암질암류의 암석화학적 연구. 광산지질, 13권, p. 69-79.

이인호 (1993) 울산화강암 중 주/미량 원소와 광화작용의 관계에 대한 지화학적 연구. 경북대학교 석사학위 논문.

이재영 (1981) 경상분지내 유화물광상의 지구화학적연구-화강암류와 광화작용-. 경북대 논문집, 32집, p. 289-313.

이재영 (1989) 진동화강암 및 유천-연양화강암의 광화작용에 관한 지화학적 연구. 광산지질, 22권, p. 21-34.

이재영, 김상욱, 김영기, 고인석, 장태우 (1990) 유천분지내 화강암류와 광상구의 관계에 대한 지화학적 연구. 광산지질, 23권, p. 143-159.

이재영, 김상욱, 김영기 (1992) 경상분지내 철광상 관련 울산화강암에 대한 지화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 133-143.

이재영, 이진국 (1992) 평해지역 온정화강암중 미량원소와 광화작용과의 관계에 대한 지화학적 연구. 광산지질, 25권, p. 245-258.

이재영, 이진국, 박법정, 이인호, 김상욱 (1994) 경상분지내 동광상 관련 진동화강암류에 대한 지화학적 연구. 자원환경지질, 27권, p. 161-170.

이재영, 이진국, 이인호, 김상욱 (1994) 경상분지 내 열수광상의 광화작용과 백악기 화강암류의 화학성분 변화와의 관계. 자원환경지질, 27권, p. 363-373.

이준동 (1987) 경남 진동-마산일대에 분포하는 화강암류와 접촉변성작용에 관한 연구. 서울대 박사학위논문.

이진국 (1986) 연양-유천 지역 백악기 화강암의 화학원소와 광화작

- 용의 관계. 경북대 석사학위논문.
- 이진국, 이재영 (1994) 진동화강암류의 미량원소 지화학과 동광화작용. 지질학회지, 30권, p. 455-466.
- 이효민 (1988) 울산 사문암에 대한 광물학적 연구. 부산대 석사학위논문.
- 장기홍 (1975) 한반도 동남부의 백악기층서. 지질학회지, 11권, 1975.
- 진명식 (1981) 남한의 백악기 화강암류에 관한 암석학적, 지화학적 연구. 서울대 박사학위논문.
- 진명식 (1985) 남한에 분포되어 있는 백악기 화강암류의 화학조성과 구조조환경에 대하여. 지질학회지, 21권, p. 67-73.
- 최석원 (1986) 함안지역 동광상의 성인에 관한 연구. 서울대 박사학위논문.
- 최수용 (1988) 울산광산에서 산출되는 사문암의 성인적 연구. 부산대학교 박사학위 논문.
- Choi, S.G. (1983) Skarn evolution and Iron-Tungsten mineralization and associated poly metallic mineralization at the Ulsan mine, Republic of Korea. Waseda Univ. Ph.D. thesis.
- Kim, S.Y., Jin, M.S. and Lee, J.S. (1981) Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang basin, Korea. Japan Mining Geol., v. 31, p. 245-260.
- Lee, J.Y. (1984) Geochemistry on major and trace elements in the granitic rocks from the Gyeongsang basin in relation to mineralization. J. Geol. Soc. Kor., v. 20, p. 326-344.
- Lee, M.S. (1981) Granitic magmatism and associated mineralization in the Gyeongsang basin, Korea. Japan, Mining Geol., v. 31, p. 245-259.
- Nockolds, S.R. and Allen, R. (1953-6) The geochemistry of some igneous rock series. Geochim. Cosmochim. Acta 4, p.105-142; 5, p.245-285; 9, p.34-77.
- Sillitoe, R.H. (1977) Metallogeny of an Andean type continental margin in South Korea, Implications for opening of the Japan Sea. Maurice Ewing Series, 1, Am. Geophys. Unio, p. 303-310.
- Tsusue, A (1984) Granite provinces and associated ore deposits in South Korea - A comparison of granitic and metallogenic provinces in South Korea and those in Southwest Japan.

(1995년 1월 5일 원고접수)