

경주납석광상의 열수변질작용에 따른 원소함량의 변화

이재영* · 최옥진** · 김종근* · 김상욱*

Variation of Chemical Elements due to Hydrothermal Alteration of Kyungju Pyrophyllite Deposits

Jae Yeong Lee*, Wook Jin Choi**, Jong Gun Kim* and Sang Wook Kim*

ABSTRACT: The Kyungju pyrophyllite deposits were formed by the hydrothermal alteration of andesitic rocks, which were intruded by Cretaceous granite mass. The major minerals are pyrophyllite, kaolinite and chlorite. The deposits may be zoned outward into pyrophyllite zone, silicified pyrophyllite zone and weakly altered zone (propyrrillite zone) according to mineral assemblages. Chemical compositions vary in close relation with the mineralogical assemblages: Al_2O_3 content is high due to pyrophyllitization at the deposits and altered zones in comparison to andesitic country rocks, while the contents of Na_2O , CaO and MgO are generally low due to leaching during the alteration. This variation of chemical elements may be applicable in the geochemical exploration of pyrophyllite deposits.

서 언

경주납석광산은 경북 경주군 산내면 내일리에 소재하며 좌표상 동경 $129^{\circ}05'$, 북위 $35^{\circ}43'$ 에 위치한다. 광산은 백악기 유천층군의 안산암질암과 백악기 내지 제3기에 이를 관입한 흑운모화강암과의 접촉경계부에서 다소 불규칙한 렌즈상으로 산출된다.

본 광산은 1930년대부터 개발되어 왔으며, 1993년 현재 월 2천톤 내외의 광석을 생산하고 있다. 주광석광물은 엽납석, 고령석, 견운모 등이며, 이들 광석은 주로 내화물, 도자기 및 타일용 등의 원료로 공급되나 화장품과 화학약품의 원료로도 일부 사용되고 있다.

본 역의 지질과 광상은 김남장 등 (1971)에 의하여 모량도폭작성시 일부 조사된 바 있으나, 다른 지역의 납석광상 (김용훈, 1987; 김종환, 고상모, 1989; 손승학, 1988; 정원우, 1991)의 경우처럼 조사연구가 잘 되어 있지 않다. 다만, 최근에는 상기남 (1988, 1992)에 의하여 영남지역의 고령토-납석광상이 디아스포아 부존대, 명반석 부존대 및 납석-고령토 부존대로 구분되고, 납석-고령토 부존대는 다시 광물조성에 따라서 납석-고령토형, 견운모-납석형, 고령토-견운모형으로 세분되었는데, 이에 의하면 본 경주

납석광상은 납석-고령토형에 해당된다. 그러나 본 광산은 아직 광상성인의 연구나 납석화 및 변질과정에서 모암에서 일어난 화학성분의 변화등에 대하여 연구된 바 없으며, 그 결과 본 광산은 성인에 대한 지화학적 자료는 매우 부족하였다.

따라서 본 연구는 경주납석광상에 대한 지화학적 기초 자료를 수집하는데 목적을 두고 광상의 광물동정과 전암 분석을 통하여, 모암의 변질시 수반된 용탈과 집적에 의한 주/미량 원소들의 함량변화를 조사하였으며, 아울러 납석광상의 지화학적 탐사에의 활용가능성을 검토하였다.

지질 및 광상개요

지 질

본 역의 지질은 경상누층군에 속하는 하양층군의 건천리층을 기저로 하여 이를 후기에 관입 혹은 분출 피복하고 있는 유천층군의 안산암질암과 안산암질각력암 및 상기 양 암석을 관입하고 있는 불국사 화강암 및 규장암으로 구성되어 있다 (Fig. 1).

안산암질암

본 암은 본 역에 광범위하게 분포하며 다양한 암상을 보인다. 본 역 북부에서는 하양층군의 건천리층을 관입 혹은 분출하고 있고, 남부에서는 불국사 화강암 및 규장암

* 경북대학교 지질학과 (Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

** 대한광업진흥공사 (Korea Mining Promotion Corporation, Seoul 150-020, Korea)

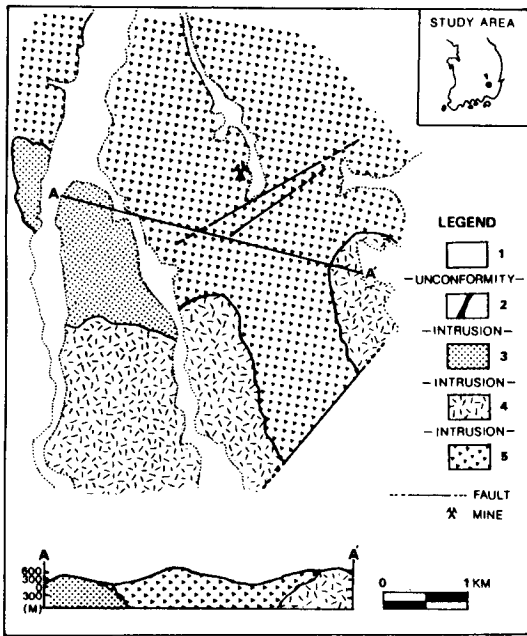


Fig. 1. Geologic map of the Kyungju pyrophyllite mine area: 1; alluvium, 2; acidic dykes, 3; felsite, 4; granite, and 5; andesitic rock.

등에 의해 관입되어 있다. 본 암은 반상안산암, 비현정질 안산암, 각력안산암질 응회암으로 구분되며, 각력은 거의 모두 동질의 안산암으로 되어 있다 (김남장 외, 1971). 화강암과의 접촉부에는 프로펠라이트화작용을 받아 녹니석화되어 있고 미립의 황철석이 산점한다.

반상안산암은 비현정질석기에 사장석이 반정으로 나타나며, 부분적으로 황철석으로 광염되어 있다. 비현정질안산암은 경하관찰시 미정질의 석기에 사장석결정이 어느 정도 방향성을 띠는 반자형으로 산출되고 칼스베드 쌍정을 이루며, 화강암과의 접촉부에는 녹니석, 황철석, 녹렴석 등이 소량 산출된다. 안산암질 응회암은 반자형 내지 자형의 사장석으로 되어 있으며, 흔히 칼스베드쌍정을 이룬다. 석기는 역시 미립의 사장석과 투회석, 각섬석으로 이루어져 있다. 화강암과의 접촉부에는 황철석, 녹렴석등이 소량 산출된다.

불국사 화강암

경북 경주군 내남면 일대에 분포하는 본 암은 상기 안산암질암을 관입하며, 월성군 내남면 소호리에서는 모량 단층으로 절단되어 있다. 본 암은 주로 석영, 사장석 및 카리장석으로 구성되어 있으며 각섬석, 흑운모등의 유색 광물을 소량 함유한다. 광화작용에 주된 영향을 준 것으로

사료되는 경북 경주군 내남면 박달리 패전 아랫고사리 일대에 분포하는 화강암체는 반화강암 내지 세립 및 중립질 각섬석 화강암이다. 주구성광물은 석영, 사장석, 카리장석 등이며, 카리장석은 장경이 1 cm 내외이고 각섬석과 흑운모는 일부 연변부에서 침상으로 나타난다. 화강암체의 주절리 방향은 $N50^{\circ}\sim 55^{\circ}E$, $35^{\circ}\sim 40^{\circ}SE$ 이다.

규장암

본 암은 경북 경주군 산내면 의곡리, 일부리, 대현리 일대에 분포하며, 안산암질암 및 화강암을 관입하고 있다. 본 암은 유백색 내지 담갈색의 암색을 띠며, 경하관찰시 비현정질석기에 석영, 칼리장석의 결정이 산재하는 경우가 많아 석영, 장석반암같은 산상을 보이는 부분도 있으며, 유색광물은 극히 드물지만 철산화물이 함유된 부분은 다소 적갈색을 띤다.

암맥류

본 암맥류는 산성 및 중성 암맥류로 구분되며, 공회 안산암질암과 불국사 화강암을 관입하고 있다. 산성암맥류는 규장암, 석영반암 및 석영맥이 대부분이며, 중성암맥류는 안산암질암이 대부분이다. 광상부근에 산재하는 산성암맥류는 단층면을 따라 관입 또는 단층과 거의 평행하게 발달한다.

광 상

본 납석광상은 안산암질암 및 안산암질 응회암이 불국사 화강암의 관입시 수반된 열수에 의해 형성된 열수변질광상 (광진, 1988)으로 변질작용은 치밀한 안산암질암보다는 안산암질 응회암에서 더욱 잘 진행되어 있다. 광상은 모암중에 다소 불규칙한 대상-렌즈상으로 발달하여 $N30^{\circ}\sim 40^{\circ}E$ 및 $N10^{\circ}W$ 방향의 소단층을 따라 상승한 열수용액에 의하여 형성된 것으로 사료된다. 광체의 규모는 상부의 폭이 50~100 m, 연장이 500 m 내외이며, 대체로 $N10^{\circ}E$, $30^{\circ}NW$ 의 방향성을 띤다. 모암의 변질은 경하관찰에 의해서 유색광물이 선행된 경향이 있으며 사장석 결정이 석기보다 쉽게 변질된 것으로 보인다. 본 광상은 현재 광체의 남쪽 연장부를 따라 노천작업장을 개설하여 채광중에 있다 (Fig. 2).

본 광상은 납석화의 정도에 따라 광체를 중심으로 납석대 (부광대), 규질납석대, 약변질대 (Burham, 1962)로 3대분 되는데, 분대는 조사당시까지 채광되지 않고 남아 있던 한 노천 작업장을 선택하여 그 광물조성과 암색을 기준으로 하였다. 각 대의 주광물 및 수반광물 (최옥진,

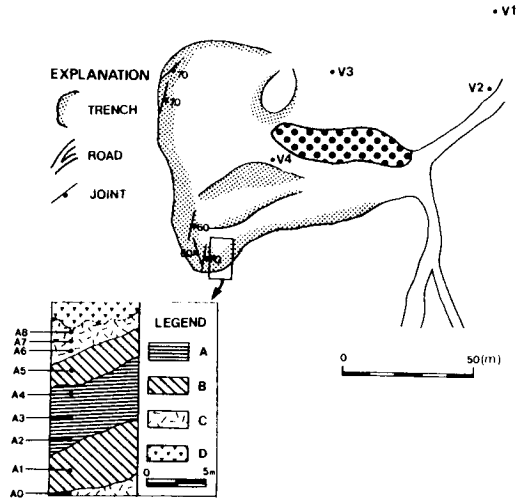


Fig. 2. Simplified figure of altered zones and sampling points of Kyungju pyrophyllite deposits: A; pyrophyllite zone, B; silicified pyrophyllite zone, C; weakly altered zone, and D; surrounding rock (country rock).

1990)은 납석대는 엽납석, 고령석, 견운모 등이며, 규질납석대는 석영, 엽납석, 견운모 및 소량의 고령석이 수반된다. 약변질대 (변후안산암대)는 석영, 견운모, 고령석 및 녹염석, 황철석 등으로 구성되어 있으며, 모암의 조직이 다소 남아 있다. 각 대의 특징을 요약하면 다음과 같다.

납석대 (부광대)

대상 혹은 불규칙한 괴상-렌즈상으로 배태되어 있는 본대는 납석화가 가장 많이된 부분으로 담황색 내지 담회 녹색을 띤다. 촉감은 전형적인 활석과 유사하고 치밀하며, 유지광택을 띤다. 경하관찰에 의하면, 다색성을 띠는 엽납석은 파편 혹은 엽편상으로 나타나며, X-선회절분석 결과 납석대의 주광물은 엽납석과 견운모 등이며, 고령석 및 소량의 명반석이 수반되고 모암의 잔류조직은 거의 관찰되지 않는다.

규질납석대

본 대는 부광대의 외곽부에 거의 대칭적으로 발달하며, 부분적으로는 광체의 내부 및 외곽부에도 불규칙한 소맥으로 산출된다. 본 대는 외관상 백색 내지 암회색을 띠며, 세립질의 견고한 암상을 보인다. X-선회절분석 결과 주광물은 석영과 엽납석이며, 고령석, 견운모 등이 소량 혼재하고 부광대와 마찬가지로 모암의 잔류조직은 관찰이 힘들고 경하관찰에 의하면, 평행소광을 보이는 석영의 집합체 및 다색성을 띠는 엽납석이 미립인편상으로 나타난

다. 황철석의 일부는 산화되어 적갈색을 띤다. 본 규질납석대의 석영함량이 낮은 부분은 채광되고 있다.

약변질대 (변후안산암대)

암녹회색을 띠며, 상기 양대에 비해 변질도가 낮고, 납석대로부터 멀어 질수록 변질도는 감소한다. 모암의 조직은 다소 남아있으며, 장석류는 대부분 견운모화 및 고령석화되어 있다. 본 약변질대의 암석은 부분적으로 유상구조와 유사한 구조를 보이며, 같은 안산암질 암편을 함유하는 안산암질 응회암도 관찰된다. 경하관찰시 황철석이 소맥 또는 자형으로 관찰되는데 이는 황성분을 다량 함유한 산성열수와 모암내 각섬석 등의 함철규산염광물에서 분해되어 나온 철성분이 반응하여 형성된 것으로 사료된다. 황철석은 국부적 현상이나 석영맥 주위에 집중되고 석영맥에서 멀어 질수록 감소하는 경향이 있으며, 풍화에 노출된 부분은 동심원상 구조를 보인다.

납석광상의 변질작용과 화학원소와의 관계

납석화 및 열수변질작용의 결과 모암에는 광물조성의 변화가 일어나고 주원소와 미량원소는 납석대, 규질납석대 및 약변질대 (변후안산암대)에 따라 현저한 변화가 수반된다 (Hawkins and Roy, 1963; Sturchio et al., 1986). 시료는 모암에서 4개, 조사당시 채광중에 있었던 한 노천채굴장에서 대별로 9개 (Fig. 2 참조) 및 규질납석은 별도로 8개를 더 추가하여 총 21개 시료를 분석하였다 (Table 1). 분석은 런던대학교 Royal Holloway & Bedford New College에 의뢰하여 ICP로 분석되었고 SiO₂, FeO, H₂O⁺, H₂O 는 본 지질학과에서 분석하였다. 주원소와 미량원소의 원소별 변화양상은 다음과 같다.

주원소

납석광상과 모암간의 주원소 함량을 비교해 보면 광상은 SiO₂=54.5~77.5%, Al₂O₃=16.4~31.6%, Fe₂O₃=0.1~1.23%이며, Na₂O, K₂O, MgO, CaO은 대부분 1% 미만인데 비해 인접 모암은 SiO₂=56~65%, Al₂O₃=14.2~19%, Fe₂O₃=4.7~14.1%, Na₂O=0.2~3.2%, K₂O=2.3~5.2%, MgO=0.9~2.9%, CaO=0.6~3.4%로, 광상은 K₂O, MgO, Na₂O, CaO, Fe₂O₃가 낮고 SiO₂, Al₂O₃는 높다. 이는 안산암질암내의 조암광물들이 열수용액에 의해 변질되는 과정에서 이동성이 비교적 큰 알칼리 원소들은 용탈되고, 이들의 용탈에 의하여 Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅ 등은 상대적으로 농집(Althaus, 1964)되기 때문인 것으로 사료된다. Al₂O₃는

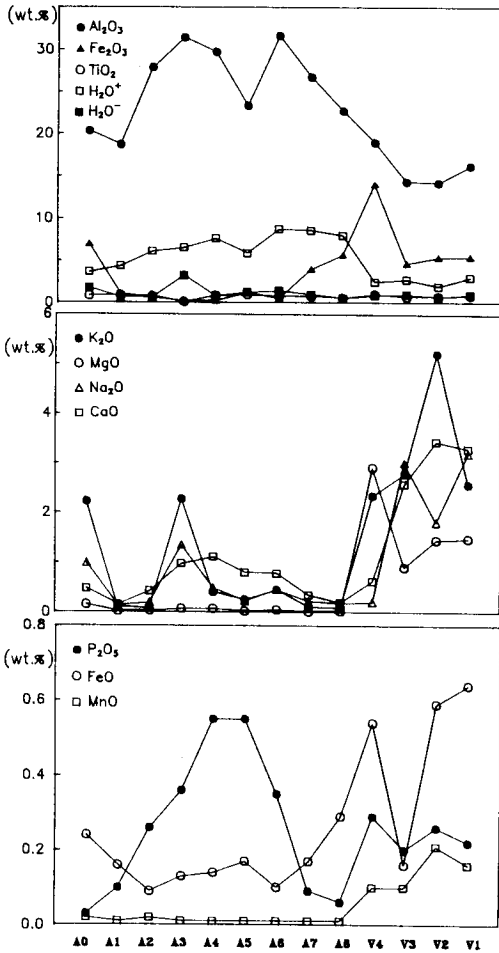


Fig. 3. Variations of major oxides of altered zones and surrounding rock: A0, A6, A7, A8; weakly altered zone, A1, A5; silicified pyrophyllite zone, A2, A3, A4; pyrophyllite zone, and V1, V2, V3, V4; surrounding rock (country rock).

납석대 (A2, A3, A4)에서 약변질대인 변후안산암대 (A0 및 A6, A7, A8)쪽으로 대칭적 감소를 보이며, Fe₂O₃는 Al₂O₃와 반대되는 경향을 보인다. H₂O함량은 열수변질의 결과로 생성된 엽납석, 고령석, 견운모 등의 함유규산염광물로 인하여 증가하는 경향을 보인다. Na₂O, K₂O, CaO, MgO, FeO 등은 모암에 비하여 약변성대에서 급격한 감소를 보인다 (Fig. 3).

규질납석대내 절리를 중심으로 주원소의 함량변화를 보면 Al₂O₃, Na₂O 등의 함량은 절리가 있는 곳에서 비교적 높은 경향이 있다 (Table 1 참조). 따라서 규질납석대내 절리선은 납석화작용에 영향을 준 것으로 사료된다. 즉, Al₂O₃ 함량은 납석화로 증가하고 Na₂O는 용탈되어 절리

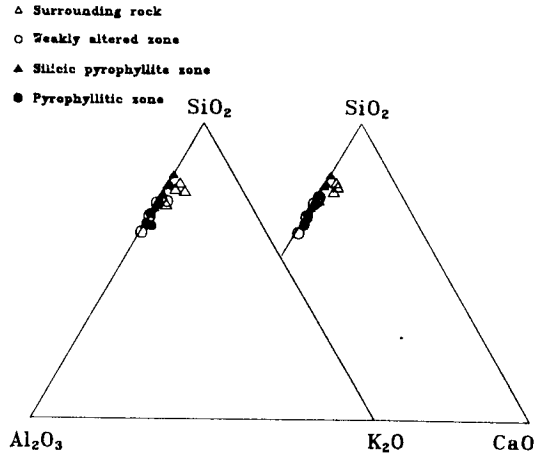


Fig. 4. SiO₂-Al₂O₃-K₂O/-CaO diagrams of the Kyungju pyrophyllite deposits.

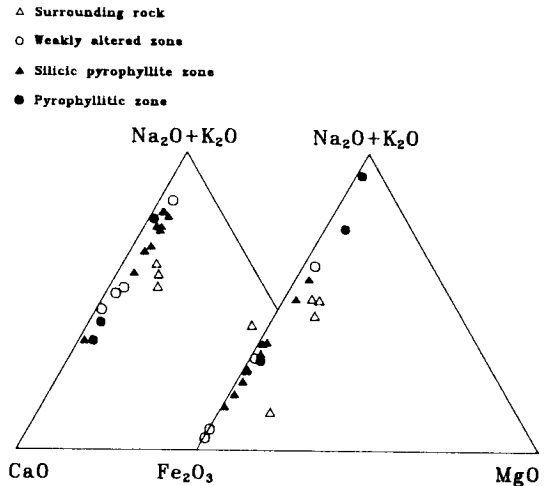


Fig. 5. Na₂O+K₂O-CaO/-Fe₂O₃-MgO diagrams of the Kyungju pyrophyllite deposits.

선에 집적된 것으로 사료된다.

변질작용에 의한 주원소들간의 상대적 함량변화를 SiO₂-Al₂O₃-K₂O 및 SiO₂-Al₂O₃-CaO삼각도 (Fig. 4)에 점시해 보면, 납석화가 잘 진행된 부분 (납석대)일수록 모암보다 Al₂O₃함량이 증가하고 K₂O함량과 CaO함량은 대체로 감소하는 경향을 보인다. 납석대내에서 SiO₂와 Al₂O₃가 넓은 함량범위를 보이는 것은 모암내 납석화작용이 전체적으로 일정한 것이 아니고 수반된 다른 변질작용의 영향을 받기때문으로 사료된다. 약변질대가 규질납석대보다 오히려 Al₂O₃가 증가되어 나타나는 것은 고령석화 및 녹니석화의 영향인 것으로 사료된다.

Table 1. Chemical analysis of the Kyungju pyrophyllite deposits (unit; wt.% for major element and ppm for trace element).

	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A8	S1	A2	S3	A4	S5	S6	S7	S8	V1	V2	V3	V4
SiO ₂	62.52	73.82	63.25	63.11	58.2	65.32	54.53	58.45	61.21	73.36	65.75	77.53	71.66	68.98	70.90	66.58	72.81	64.95	64.68	67.39	55.96	
Al ₂ O ₃	20.32	18.68	27.88	31.41	29.70	23.32	31.61	26.73	22.71	19.75	26.52	16.43	23.11	24.14	22.22	25.56	19.50	16.21	14.18	14.31	18.95	
Fe ₂ O ₃	6.95	1.05	0.57	0.22	0.23	1.23	0.50	4.01	5.70	0.42	0.26	0.27	0.28	0.10	0.65	0.49	1.20	5.46	5.41	4.65	14.06	
MgO	0.15	0.02	0.03	0.07	0.07	0.02	0.05	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.48	1.45	0.90	2.91	
CaO	0.47	0.15	0.42	0.97	1.11	0.79	0.77	0.34	0.19	0.05	0.06	0.07	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	3.29	3.44	2.57	0.62	
Na ₂ O	0.98	0.14	0.19	1.34	0.48	0.22	0.45	0.21	0.17	0.11	0.14	0.11	0.12	0.12	0.13	0.14	0.12	3.19	1.80	3.01	0.20	
K ₂ O	2.22	0.11	0.07	2.27	0.40	0.25	0.45	0.10	0.08	0.02	0.15	0.05	0.02	0.03	0.11	0.14	0.09	2.57	5.21	2.78	2.34	
TiO ₂	0.84	0.90	0.78	0.11	0.89	0.95	0.78	0.77	0.59	0.51	0.72	0.42	0.51	0.59	0.52	0.62	0.48	0.90	0.75	0.72	1.02	
P ₂ O ₅	0.03	0.10	0.26	0.36	0.35	0.55	0.35	0.09	0.06	0.04	0.05	0.03	0.05	0.06	0.04	0.08	0.03	0.22	0.26	0.20	0.29	
MnO	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.16	0.21	0.10	0.10	
FeO	0.24	0.16	0.09	0.13	0.14	0.17	0.10	0.17	0.29	0.20	0.12	0.16	0.09	0.09	0.56	0.16	0.59	0.64	0.59	0.16	0.54	
H ₂ O ⁻	1.76	0.65	0.61	3.25	0.79	1.28	1.46	0.98	0.55	0.69	0.39	0.54	0.13	0.91	0.48	0.93	0.68	0.99	0.70	1.00	0.90	
H ₂ O ⁺	3.65	4.37	6.09	6.52	7.62	5.85	8.74	8.56	7.96	5.18	5.95	4.61	5.03	4.77	4.88	5.30	4.97	3.02	1.96	2.76	2.48	
Ba	274	39	27	742	86	84	90	32	43	36	89	49	33	35	70	92	59	453	908	732	385	
Co	7	5	5	2	5	7	5	12	12	3	5	3	3	4	4	4	5	5	12	5	5	15
Cr	7	5	5	3	8	5	5	5	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	12	5	5	5
Cu	6	6	5	2	8	16	11	12	29	3	3	4	2	6	3	3	3	6	64	6	15	15
Li	43	18	53	21	1403	26	2492	206	20	13	12	15	9	8	10	11	14	56	31	28	254	
Nb	8	7	10	3	7	9	9	10	6	12	16	9	11	13	12	14	11	8	8	8	7	7
Ni	8	3	4	5	4	4	7	8	3	7	5	2	3	4	4	4	3	4	17	9	8	17
Sc	27	16	24	12	13	19	26	25	11	11	15	10	12	13	12	15	12	16	12	12	13	22
Sr	318	110	90	321	331	271	343	157	104	47	62	68	45	48	70	100	67	301	323	293	84	
V	83	73	82	38	97	96	121	103	66	12	12	0	13	14	13	18	12	91	44	42	111	
Y	27	31	38	6	15	51	22	57	16	15	31	18	18	23	20	23	19	33	33	41	36	
Zn	24	15	12	12	9	7	11	5	7	6	6	9	5	5	6	7	11	85	260	85	908	
La	34	42	36	70	22	53	25	55	25	34	39	29	41	49	47	87	36	30	31	32	22	
Ce	70	102	78	120	52	136	50	123	48	72	82	58	90	112	101	175	77	57	57	58	41	
Nd	26	53	35	41	32	84	23	51	13	25	31	22	32	50	36	61	28	28	25	26	16	
Sm	54	12.6	7.9	7.8	8.7	22.8	5.8	11.3	3.0	4.7	6.7	4.8	6.2	10.1	7.1	14.7	5.3	6.4	5.1	6.0	5.1	
Eu	1.0	2.3	1.9	1.5	2.0	4.9	1.5	2.3	0.7	0.8	1.0	0.8	0.9	1.3	1.1	2.0	0.8	1.2	1.1	1.2	0.8	
Dy	4.4	6.1	7.2	2.7	4.5	10.6	5.4	8.4	3.2	3.1	5.5	3.2	3.7	4.4	4.0	4.9	3.4	5.7	5.3	6.1	5.6	
Yb	2.3	3.0	5.7	0.7	1.4	5.1	2.1	7.4	1.9	2.0	3.9	2.1	2.5	3.2	2.4	2.9	2.9	2.2	2.2	2.7	3.3	
Rb	175	5	5	94	16	12	21	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	108	187	97	177

A0, A6, A7, and A8: weakly altered zone. A1, A5, S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, and S8: silicified pyrophyllite zone. A2, A3, and A4: pyrophyllite zone. V1, V2, V3, and V4: surrounding rock (Country rock).

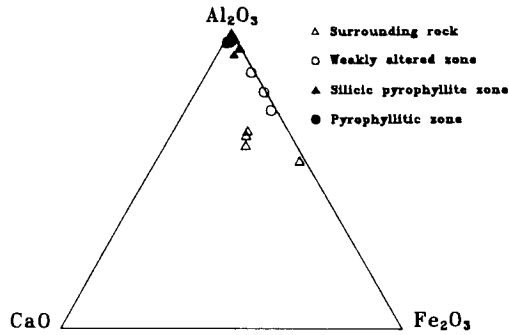


Fig. 6. Al₂O₃-CaO-Fe₂O₃ diagram of the Kyungju pyrophyllite deposits.

Na₂O+K₂O-CaO-MgO와 Na₂O+K₂O-Fe₂O₃-MgO삼각도 (Fig. 5)에서 납석대는 모암에 비해 MgO함량이 낮은 영역에 점시되고, Al₂O₃-CaO-Fe₂O₃삼각도 (Fig. 6)에서는 납석의 품위에 영향을 미치는 Fe₂O₃함량은 모암에서 납석대로 갈수록 상대적으로 감소하므로 MgO와 Fe₂O₃는 모암과 납석대 및 납석화정도의 구분에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

상기 주원소들의 SiO₂에 대한 함량변화를 보면 Al₂O₃는 대체로 반비례하고 Na₂O와 K₂O는 SiO₂함량이 낮은 시료에서 높게 나타나며, CaO, TiO₂, P₂O₅도 역시 SiO₂ 함량이 낮은 시료에서 비교적 높은 경향을 보인다. 이에 비해 Fe₂O₃와 MgO는 SiO₂의 함량변화에 거의 무관하게 낮은 함량을 보인다 (Fig. 7).

미량원소

납석광상과 모암간의 미량원소의 함량변화를 비교해 보면 (Fig. 8), 광상은 Co=2~5 ppm, Ni=4~5 ppm, Cu=2~8 ppm, Zn=9~12 ppm으로 모암의 Co=5~15 ppm, Ni=8~17 ppm, Cu=6~64 ppm, Zn=85~908 ppm에 비해 매우 낮으며, 특히 Zn함량은 약변질대에서부터 현저히 감소하는 경향을 보인다 (Table 1).

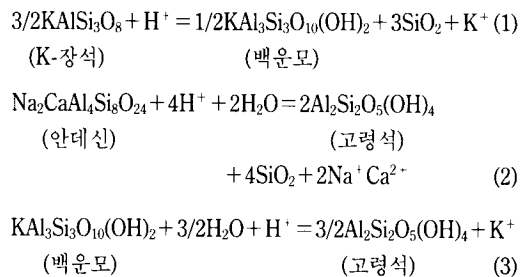
이들 원소들의 감소는 납석화 및 열수변질작용에 의하여 모암으로부터 용탈 (Silberman and Berger, 1986)되기 때문이며, 이러한 미량원소의 함량변화는 납석대의 지하학적 탐사에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 이에 반해 Nb, Sc, Y, Cr 등은 광상에서 Nb=3~10 ppm, Sc=12~24 ppm, Y=6~38 ppm, Cr=3~8 ppm인데 모암에서는 Nb=7~8 ppm, Sc=13~22 ppm, Y=33~41 ppm, Cr=5~12 ppm으로, 광상과 모암간에 함량차이가 적고 변질 대간에도 큰 변화가 없다. 따라서 이들 원소의 함량은

열수변질작용에 대하여 비교적 안정한것으로 보이며 광상과 모암의 구별에는 지시성이 없다. 납석대의 미량원소와 SiO₂의 함량관계를 보면, V, Cu, Sc, Sr 등은 SiO₂와 역비례적 관계를 보이나 Y, Zn, Co, Ni 등은 무관한 것으로 보인다 (Fig. 9). Li는 납석대에서 그 함량이 비교적 높다.

광상성인 및 원소거동에 대한 고찰

본 납석광상은 안산암질암 및 안산암질 응회암이 불국사 화강암의 관입시 수반된 열수에 의해 형성된 열수변질광상으로, 광상의 성인은 열납석-고령석-건운모의 광물조성으로부터 추정해보면, 온도는 약 300°C, α_K⁺/α_H⁺ 비는 약 3 내외의 비교적 산성의 열수에 의해 형성되었으며 α_K⁺는 α_N⁺보다 중요한 역할을 하였을 것으로 사료된다 (Hemley et al., 1971). 주성분중 Al₂O₃는 납석화작용에서 가용성인 알카리성분들이 용탈, 이동됨으로써 상대적으로 잔류농집되었으며, 열수용액의 통과였을 것으로 추정되는 단열대의 Al₂O₃ 함량이 단열대로부터 떨어진 부분보다 높는데, 이는 용탈작용에 의한 상대적 증감뿐만 아니라, 이들 성분들이 열수로부터 공급될 수 있었기 때문인 것으로 사료된다. 수분은 건운모화, 고령석화등의 과정에서 증가된다 (Hemley, 1964). 본 납석광상에는 명반석, 전기석, 듀모티에라이트 등의 광물이 산출되지 않는 것으로 미루어 보아 납석화 및 기타 변질작용시 열수용액중에 SO₄²⁻ 및 B의 농도가 적었을 것으로 사료된다 (Hemley et al., 1969).

모암이 열수변질되어 납석화되는 과정에서 장석류는 산성용액에 의하여 알카리원소와 규산이 용탈되는데, 예로 약 300°C에서 K-장석은 백운모가 되고, 안데신은 고령석으로 분해되며, 백운모는 열수와 계속 반응하여 고령석으로 된다 (Hemley and Jones, 1964). 그리고 온도가 조금 더 높아지면 고령석과 석영대신 납석과 홍주석이 안정한 광물이 된다 (Montoya and Hemley, 1975). 고령석은 용탈된 규산과 더욱 반응을 계속하여 납석화되며, 백운모는 규산과 직접 반응하면 납석으로 됨을 알 수 있다 (식 1-5 참조). 상기 반응식은 다음과 같다.



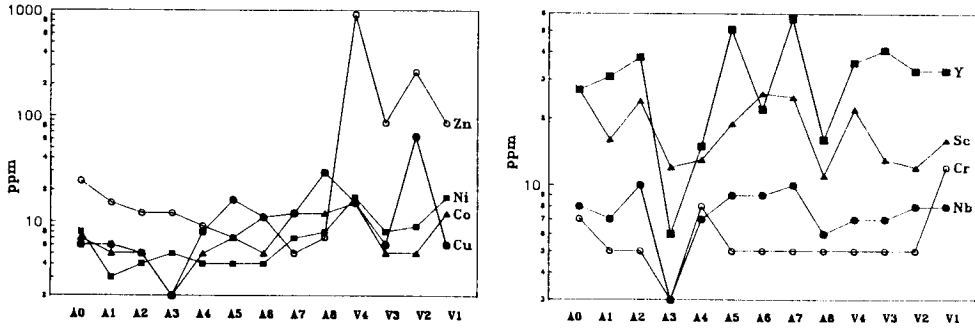


Fig. 8. Variations of some trace elements of the Kyungju pyrophyllite deposits. A0, A6, A7, and A8; weakly altered zone. A1 and A5; silicified pyrophyllite zone. A2, A3, and A4; pyrophyllite zone. V1, V2, V3, and V4; surrounding rock (country rock).

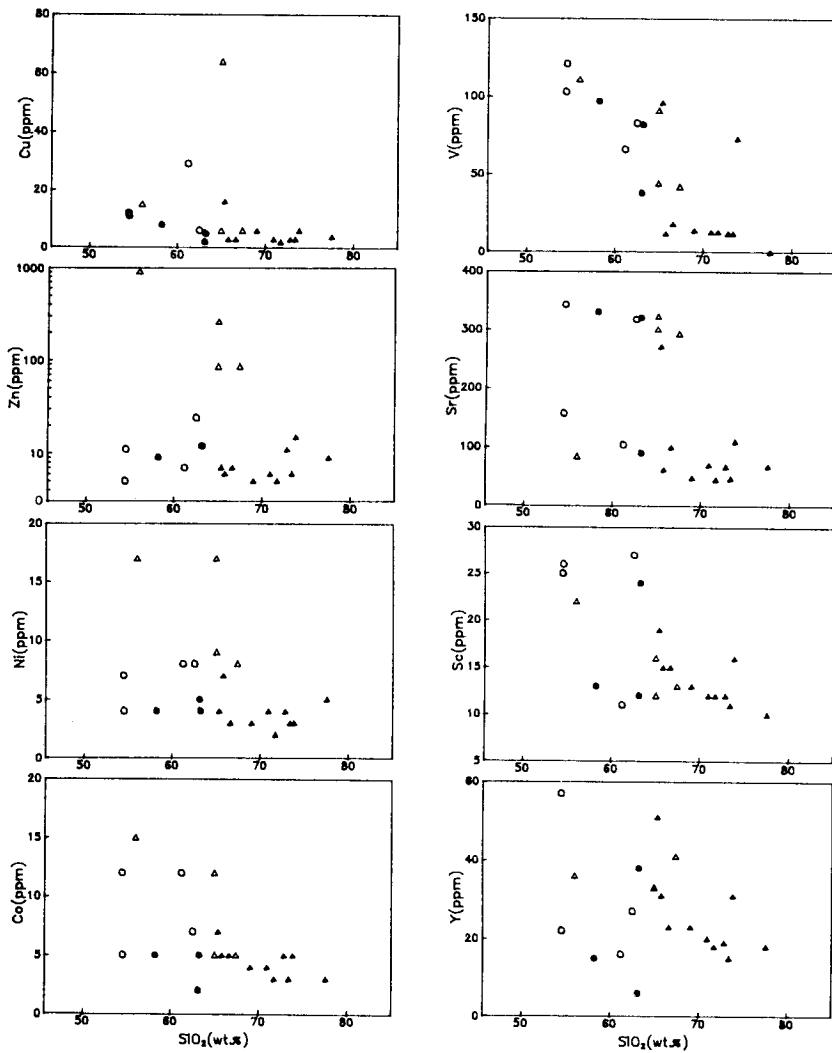


Fig. 9. Variations of some trace elements against SiO₂ of the Kyungju pyrophyllite deposits. A0, A6, A7, and A8; weakly altered zone. A1 and A5; silicified pyrophyllite zone. A2, A3, and A4; pyrophyllite zone. V1, V2, V3, and V4; surrounding rock (country rock).

수록 황철석 및 적철석등의 광물은 감소하는 경향이 있으나, 대체로 황철석은 전변질대를 통해 산점해 있다.

종합 및 결론

1. 본 남석광상은 백악기 경상누층군의 유천층군에 해당하는 안산암질암 및 안산암질 응회암이 불국사 화강암류의 관입시 수반된 열수에 의해 형성된 열수변질광상이다.
2. 본 광상은 안산암질암 및 안산암질 응회암내에 대산-렌즈상으로 부존되어 있는데, 남석대에서 모암쪽으로 규질남석대, 약변질대의 대칭적 대상구조를 보이며, 이는 N 30°~40°E방향 및 N10°~20°W 방향의 소단층 등에 의해 규제된 것으로 사료된다.
3. 본 광상의 주광물은 엽납석, 석영, 견운모, 고령석 등이며 녹니석과 황철석이 수반된다.
4. 납석화과정에서 본 광상에 일어난 가장 현저한 화학성분의 변화는 주원소는 Al의 증가와 Na, Mg, Ca 및 Fe 등의 감소이며 미량원소는 Cu, Co, Ni, Zn의 감소이다. 그리고 납석, 고령석, 견운모 등의 형성으로 구조수 (H₂O⁺)가 현저히 증가한다.
5. 따라서 광상 및 변질대와 모암간의 주/미량원소의 함량변화에 의하여 안산암지역에서 납석광상 및 납석화된 부분의 지화학적 탐사에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 전략광물자원 연구센터의 연구비 지원과 교육부 학술진흥재단의 1991년도 대학부설 기초과학연구소 연구비로 수행되었음.

참고문헌

김남장, 권영일, 진명식 (1971) 한국지질도, 모량도폭 (1/5만)

및 설명서. 국립지질조사소.
 김용훈 (1987) 경남 양산 천불산 납석광상의 성인 연구. 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 1-30.
 김종환, 고상모 (1989) 밀양-양산지역 납석광상의 광화작용에 관한 연구. KR-89-(B)-21, p. 1-44.
 상기남 (1986) 한반도 남부지역 고령토-납석광상 생성기구. 광산지질, 19권, 특별호, p. 101-114.
 상기남 (1992) 영남지역 고령토-납석광상의 성인연구. 광산지질, 25권, p. 43-52.
 손승학 (1988) 경남 양산 용천남석광상의 광물 및 성인에 관한 연구. 부산대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 1-35.
 정원우 (1991) 경남 밀양광산의 열수광상에 대한 광물학적 및 성인적 연구. 부산대학교 대학원 이학박사 학위논문, p. 1-83.
 최옥진 (1990) 경주남석광상의 성인에 대한 지화학적 연구. 경북대학교 대학원 이학석사 학위논문, p. 1-48.
 대한광업진흥공사 (1988) 한국의 광상 II호, 비금속편. p. 88-90.
 Althaus, E. (1964) Das system Al₂O₃-SiO₂-H₂O. Teil I, Neues Jb. Mineral. Abh., v. 111, p. 74-110.
 Burham, I.W. (1962) Facies and types of hydrothermal alteration. Econ. Geol., v. 57, p. 768-784.
 Hawkins, D. B. and Roy, R. (1963) Distribution of trace elements between clays and zeolites formed by hydrothermal alteration of synthetic basalts. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 27, p. 785-795.
 Hemley, J. J., Hostetler, P. B., Gude, A. J. and Mountjoy, W. T. (1969) Some stability relations of alunite. Econ. Geol., v. 64, p. 599-612.
 Hemley, J. J., Montoya, J. W., Nigrini, A. and Vincent, H. A. (1971) Some alteration reactions in the system CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. Soc. Min. Geol. Japan, Special Issue 2, p. 58-63.
 Montoya, J. W. and Hemley, J. J. (1975) Activity relations and stabilities in alkali feldspar and mica alterations. Econ. Geol., v. 70, p. 577-594.
 Silberman, M. L. and Berger, B. R. (1986) Relationship of trace elements patterns to alteration and morphology in epithermal precious metal deposits. Society of Economic Geologists, v. 2, p. 203-231.

1993년 8월 23일 원고접수