

상동광산 금스카른광상의 지구화학적 연구

이부경* · 전용원**

A Geochemical Study of Gold Skarn Deposits at the Sangdong Mine, Korea

Bu Kyung Lee* and Yong Won John**

ABSTRACT : The purpose of this research is to investigate the dispersion pattern of gold during skarnization and genesis of gold mineralization in the Sangdong skarn deposits. The Sangdong scheelite orebodies are embedded in the Cambrian Pungchon Limestone and limestone interbedded in the Myobong Slate of the Cambrian age. The tungsten deposits are classified as the Hangingwall Orebody, the Main Orebody and the Footwall Orebody as their stratigraphic locations. Recently, the Sangdong granite of the Cretaceous age (85 Ma) were found by underground exploratory drillings below the orebodies. In geochemistry, the W, Mo, Bi and F concentrations in the granite are significantly higher than those in the Cretaceous granitoids in southern Korea. Highest gold contents are associated with quartz-hornblende skarn in the Main Orebody and pyroxene-hornblende skarn in the Hangingwall Orebody. Also Au contents are closely related to Bi contents. This could be inferred that Au skarns formed from solutions under reduced environment at a temperature of 270°C. According to the multiple regression analysis, the variation of Au contents in the Main Orebody can be explained (87.5%) by Ag, As, Bi, Sb, Pb, Cu. Judging from the mineralogical, chemical and isotope studies, the genetic model of the deposits can be suggested as follows. The primitive Sangdong magma was enriched in W, Mo, Au, Bi and volatiles (metal-carriers such as H₂O, CO₂ and F). During the upward movement of hydrothermal ore solution, the temperature was decreased, and W deposits were formed at limestone (in the Myobong Slate and Pungchon Limestone). In addition, meteoric water influx gave rise to the retrogressive alterations and maximum solubility of gold, and consequently higher grade of Au mineralization was deposited.

서 론

최근에 금광상에 대한 관심이 고조됨에 따라 금 스카른의 생성환경에 대한 연구가 집중되고 있다 (Meinert, 1989; Percival *et al.*, 1990; Ettlinger, Meinert, 1992; Todorov, 1994; Zhao, 1994). 국내에 부존하는 주요 스카른광상은 대부분이 태백산분지내 금속광화대에 분포하고 있다. 태백산금속광화대의 스카른광상중 세계적인 규모의 상동광산은 1916년 개광한 이래로 중석, 휘수연, 창연, 금, 은을 생산하던 광산으로서 과거 전 세계 중석 생산량의

5%를 생산한 적이 있지만 현재는 휴광중에 있다. 현재까지의 상동광산에 대한 연구는 주로 중석광상에 대하여 많이 수행되었으나 아직까지 상동스카른금광상의 스카른화작용중의 금의 분산특성과 금광상의 생성환경에 관한 연구는 발표된 바 없었다. 따라서, 본 연구는 상동스카른중의 미량성분원소를 분석하여 스카른화작용중의 금의 분산특성을 규명하고 다변량 통계처리방법을 이용하여 원소들의 상호관련성을 규명하고자 하였다.

지질 및 광상개요

상동광산 부근의 지질은 태백산통의 흑운모 편암, 양덕통의 장산규암층과 묘봉층, 대석회암통의 풍촌석회암층, 세송세일층, 화절석회암층, 동점규암, 두무골층, 막골석회암과 화성암으로는 갯내시추로 확인된 상동화강암, 기타 산성암맥 및 염기성 암맥류로 구성된다 (Fig. 1). 상동화

* 상지대학교 자원공학과 (Department of Mineral and Mining Engineering, Sangji University, Gangwondo 220-702, Korea)

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

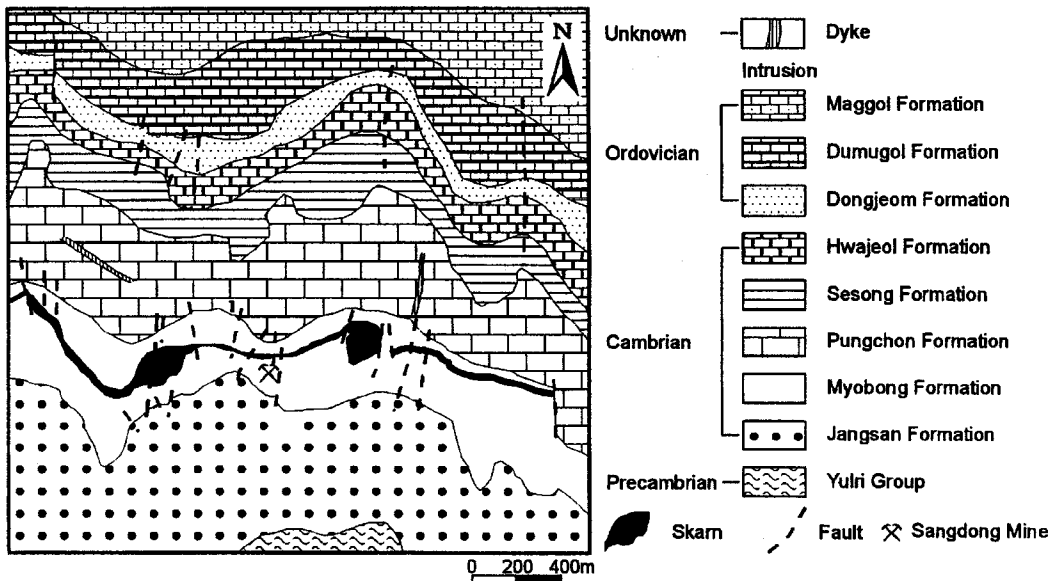


Fig. 1. Geological map of the Sangdong mine area.

강암이 확인된 시추공은 1983년 하5갱에서 실시한 장공 시추 83-2호공 (시추심도 750 m)과 1984년 하1갱에서의 84-2호공 (950 m) 및 1986년 하5갱에서의 장공시추 86-3호 (810 m)이다 (Fig. 2). 모든 시추공의 상동화강암은 태백산통 흑운모편암과의 접촉부가 매우 명료하다. 상동화강암의 백운모에 대하여 K-Ar년대는 85 Ma (Clark, 1985)와 87.5 Ma (김광호, 1986)으로서 백악기 후기로 측정되었다. 또한 본 광체 직하부 장산규암층 내에 550 ML 수준에서 세맥의 석영맥내에 배대하는 휘수연광맥광상이 장공시추로 확인되었다 (Fig. 2).

상동중석광상은 부존 위치에 따라 상반맥광체 (H1), 본맥광체 (M1), 하반맥광체 (F1)로 분류되고 후기에 형성된 석영맥으로 구성된다. 상반맥광체는 묘봉층과 풍촌석회암의 경계부로부터 풍촌석회암의 하위부에 광화 배대된 광체이다. 본맥광체는 묘봉층과 풍촌석회암의 경계부로부터 약 20 m하위에 위치하는 폭 6~7 m의 석회암 협층이 광화된 광체이다. 하반맥광체는 본맥광체의 하위부로부터 장산 규암층 사이의 묘봉층내에 발달된 폭 0.5~1 m의 석회암협층이 교대 광화된 세맥광체로 이루어져 있다.

본맥광체의 스키르ноп물은 광체의 외곽부에서 중앙부를 향하여 휘석-석류석대, 휘석-각섬석대, 석영-각섬석대, 석영-운모대의 누대분포를 형성한다. 상반맥광체는 풍촌석회암층에서부터 묘봉층으로 향하여 미변질된 석회암, 약간 스키르노화된 석회암, 규회석-석류석대, 규회

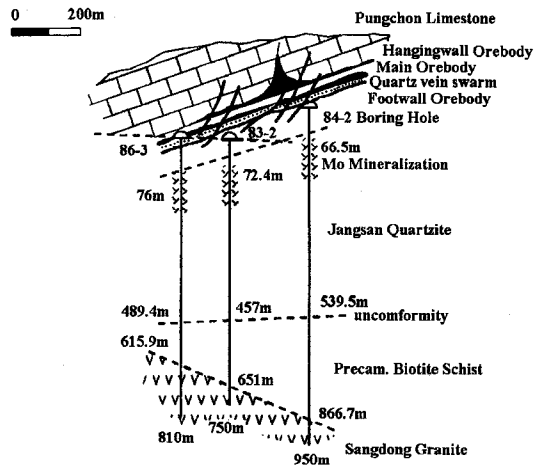


Fig. 2. Mode of occurrence of the Sangdong granite.

석-석류석-휘석대, 석류석-휘석대, 각섬석-휘석-석류석대, 각섬석-휘석대의 스키르ноп물이 누대분포를 이루고 있다. 하반맥광체는 주로 각섬석과 휘석으로 구성되며 하반맥광체의 중앙부에서는 백운모가 소량 수반된다. 본맥광체외에 본맥광체의 동부지역에 평균 맥폭 3.8 m로 휘석-석류석 스키르노로 구성된 동부광체가 확인되었다.

본맥광체에서의 광석광물은 회중석, 휘수연석, 휘창연석, 흑중석이 주로 산출되며 황철석, 자황철석, 황비철석, 자철석, 석석 및 자연금도 소량 수반된다. 회중석은 본맥

광체, 상반맥광체, 하반맥광체와 석영맥에 배대되어 있거나 흑중석과 휘수연석은 석영맥에만 국한되어 배대 산출된다. 일부 석영맥에서는 휘수연석과 회중석이 함께 산출되기도 한다. 본맥광체의 중앙부에서 외곽부로 갈수록 휘창연석과 황철석의 함량이 감소되는 반면 자황철석의 함량은 증가한다.

시료채취 및 화학분석

시료채취 및 시편제작

상동광산에서의 시료채취는 갱내시료와 시추코아시료로 구분하여 실시하였다. 갱내시료는 개별, 광체별로 모든 주변 모암과 스카른을 대상으로 채취하였다. 시추코아시료의 경우는 84-2호 공과 86-3호 시추공을 대상으로하여 보관된 코어박스에서 가능한 등간격이 되도록 심도별, 암종별로 채취하였다. 시추코아의 시료수는 상동화강암은 21개, 흑운모편암은 32개, 장산규암은 37개, 묘봉점판암은 9개를 각각 채취하였다.

암석화학분석을 위하여 전암을 Jaw crusher로 파쇄하고 Mortar를 사용하여 200 mesh 이하로 분쇄하였다.

암석화학분석

주성분원소와 미량원소 및 희토류원소의 분석은 모든 시료에 대하여 Canada의 ACTLAB사에 의뢰하였다. 분석대상원소중 Au, As, Ba, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, Mo, Na, Rb, Sb, Sc, Th, U, W, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Ta,

Lu원소는 중성자활성분석법 (INAA)에 의해 분석하였고 Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Mn, Sr, Cd, Bi, Ca, P, Mg, Ti, Al, K, Y, Be는 유도결합플라즈마방사분광법 (ICP-AES)에 의해 분석하였으며 F는 선택이온전극법에 의해 분석하였다. 화강암시료에 대해서만 별도로 SiO₂성분은 습식중량 분석법으로 분석하였으며 Li은 한국자원연구소에 의뢰하여 원자흡광분석 (AAS)에 의하여 분석하였다. Nb은 유도결합플라즈마질량분석법 (ICP-MS)에 의해 한국기초과학지원연구소 서울분소에서 분석하였다. 분석치가 측정한 계값 이하인 경우에는 통계처리시에 측정한계값의 절반값을 부여해 이용하였다.

분석결과

상동화강암

상동스카른광상에서의 주 생산 광종인 W, Mo, Bi, Au 및 Ag 원소를 비교하면, 관계화성암인 84호 시추공 및 86호시추공의 상동화강암 전체시료의 평균함량은 국내의 중생대 백악기 화강암질암의 평균함량보다 높게 함유되어 있다 (Table 1). 특히 As, U, Th, F 및 Sb도 높게 함유되어 있다. Fig. 3은 Yoon (1991)이 발표한 남한의 백악기 화강암질암과 상동화강암의 Au함량을 비교한 도수분포도이다. 상동화강암의 Au함량은 백악기 화강암질암의 경향을 따르는 것으로 보인다.

원소들간의 상호관련성을 조사하기 위해 10개의 주성분원소와 28개의 미량원소 및 8개의 희토류원소로 총 47개 원소간의 상관계수를 구하여 도시해 본 결과, 상관

Table 1. Trace elements concentration factors of the Sangdong granite to Cretaceous granites in southern Korea (unit in ppm, Au in ppb).

Elements	Sangdong granite		Cretaceous granites in southern Korea ¹⁾		concentration factor
	Range	Average	Range	Average	
Ag	<0.4~5.6	0.86	0.04~0.19	0.07	12.2
Au (ppb)	<2~42	4	0.5~7.4	2.8	1.4
As	1.9~720	44.23	0.40~10.6	2.04	21.68
Bi	<5~75	10.59	0.11~4.45	0.43	24.6
F	620~3100	1474	42~3920	351.6	4.1
Mo	<1~17	4.47	ND~17	1.49	3
Sb	<0.1~6.4	0.86	0.11~1.91	0.61	1.41
Th	22~75	34.71	4~36	14.08	2.4
U	9.8~35	19.56	ND~6.83	2.52	7.7
W	8~120	29.57	ND~24	0.88	33.6

¹⁾ Ag, Au, As, Bi and Sb from Yoon (1991). F, Mo, Th, U and W from Jin (1988). ND; Not detected.

$$\text{Concentration factor} = \frac{\text{average in the Sangdong granite}}{\text{average in the Cretaceous granites}}$$

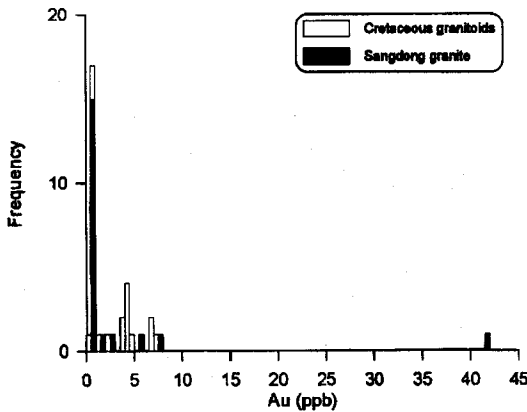


Fig. 3. Histogram of gold contents in the Sangdong granite and the Cretaceous granitoids of southern Korea (after Yoon, 1991).

계수가 0.9이상 되는 원소군으로는 TiO_2 - P_2O_5 , MgO-V, Au-As, Au-Sb, Pb-Ag, Ag-Bi, As-Sb와 희토류원소인 La, Ce, Nd, Sm으로 나타났다 (Fig. 4). 금의 경우, 상관 계수가 0.9이상으로 가장 양호한 원소는 As와 Sb이고 0.7~0.9사이로 양호한 양의 관계를 보이는 원소는 Ag, Cs, Th, Sm, Cu, Pb, Bi으로 나타났다. W의 경우는 마그마의 분화말기에 부화되는 원소인 F와 Li와 양의 상관계수 0.7~0.9로 양호한 관련성이 있다.

Au스카른의 지구화학

미량원소

본맥광체의 스카른에 대한 미량원소의 평균함량과 범위는 Table 2에, 상반맥광체의 스카른과 풍촌석회암에 대한 미량원소의 평균함량과 범위는 Table 3에, 하반맥광체에 대한 미량원소의 평균함량과 범위는 Table 4에 나타났다. 최대 Au함량은 본맥광체의 석영-각섬석스카른에서 6490 ppb로, 하반맥광체의 휘석-각섬석스카른에서 3240 ppb로, 상반맥광체는 각섬석-휘석스카른에서 1300 ppb의 순으로 나타났다 (Table 2, 3, 4). Au의 평균함량은 하반맥광체의 휘석-각섬석스카른에서 1809 ppb로, 본맥광체에서의 석영-각섬석스카른은 1552 ppb로, 상반맥광체의 각섬석-휘석스카른에서 329 ppb의 순으로 분석되었다 (Table 2, 3, 4). 상기 사실로부터 금은 주로 mafic광물에 수반되어 산출됨을 알 수 있다. 본맥광체에서의 미량원소의 함량변화를 나타낸 Fig. 5를 보면, 초기의 휘석-석류석스카른에서 후기의 석영-운모스카른으로 교대될수록 W, Mo, V함량은 증가한다. 각종 원소비의 변화를 나타낸 Fig. 6에서 보면 본맥광체에서의 스카른화작용중에 Au/Au+Ag비는 석영-각섬석스카른에서 최대로 증가하다가 석영-운모스카른에서는 다시 감소한다. Au/Ag비도 같은 경향을 나타낸다.

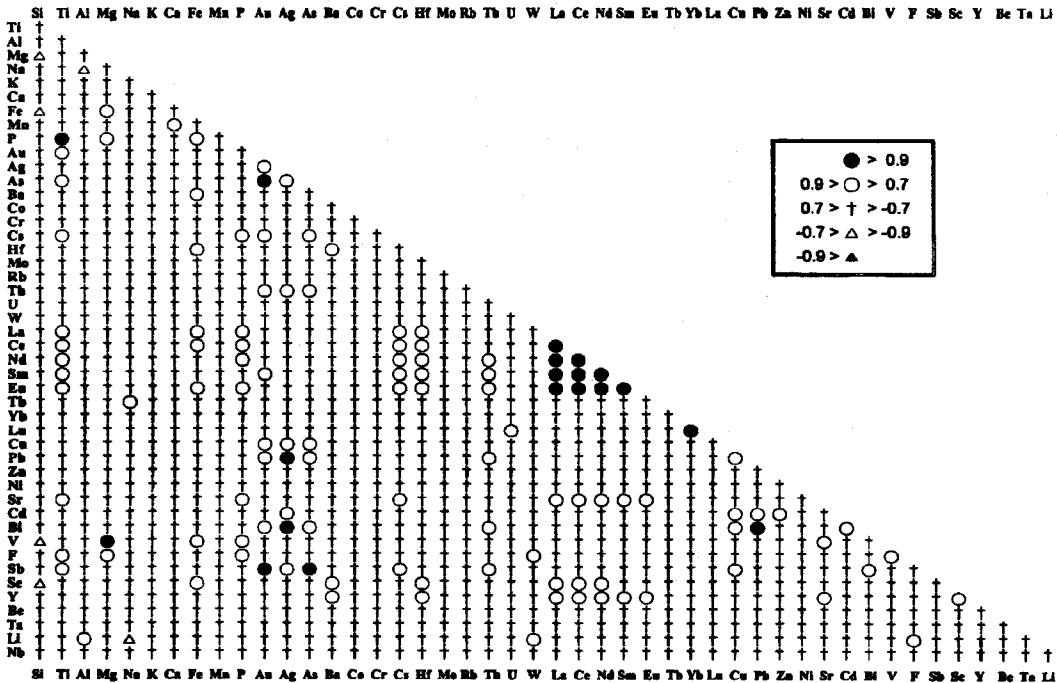


Fig. 4. Correlation coefficients of 47 elements in the Sangdong granite.

Table 2. Abundance of trace elements in the skarns from the Main Orebody.

Elements	Pyroxene-Garnet (20)*				Pyroxene-Hornblende (13)*				Quartz-Hornblende (12)*				Quartz-Mica (9)			
	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾
Au	261.8	<2-1420	355.6	135.8	349.3	<2-1680	465.3	133.2	1552.1	14-6490	2341.6	150.8	486.7	20-880	912.2	187.4
Ag	1.98	<0.4-20.1	4.46	225.72	11.73	<0.4-126.8	34.80	296.49	2.24	<0.4-6.8	2.36	105.57	5.47	0.6-28.9	9.23	168.6
As	4.72	<0.5-11	4.26	90.38	158.27	<0.5-1700	469.08	296.38	17.42	<0.5-56	20.71	118.89	1523.9	<0.5-13000	4306.7	282.6
Ba	34.25	<50-100	23.80	69.49	96.92	<50-370	121.75	125.62	70.83	<50-320	88.46	124.90	152.2	<50-600	174.8	114.8
Co	26.40	8-48	10.11	38.30	23.46	9-41	9.27	39.51	28.91	12-51	10.16	35.16	20.55	14-33	6.36	30.97
Cr	81.55	6-1100	241.63	296.30	34.34	<5-83	26.01	75.74	25.95	<5-77	21.95	84.57	26.77	12-55	16.33	61.01
Cs	4.92	<1-62	13.57	275.71	13.34	<1-4.6	16.89	126.62	20.08	1-72	25.61	127.54	20.66	3-43	15.63	75.66
Hf	3.25	<1-20	6.31	194.31	2.96	<1-15	4.72	159.64	1.16	<1-8	2.15	184.86	1.72	<1.0-8	2.62	152.3
Mo	31.30	2-150	36.77	117.50	172.84	2-970	268.28	155.22	447.25	57-1000	307.07	75.13	1198.9	110-2700	924.9	77.15
Rb	28.00	<5-400	88.86	317.36	82.23	<5-280	101.96	124.00	80.70	<5-380	131.44	162.87	240.6	<5-490	150.8	62.67
Th	9.56	1.7-45	11.79	123.28	10.55	2.1-27	9.18	87.03	6.11	1.7-25	7.21	118.00	7.20	1.6-17	4.76	66.14
U	1.97	<0.5-9.2	2.68	136.12	4.40	<0.5-32	8.67	196.79	3.23	<0.5-20	5.70	176.15	0.25	<0.5-0.5	0.00	0.00
W	3180.5	160-14000	4323	135.9	15568	220-64000	20432	131.3	22608	1300-49000	17452	77.2	50444	3000-89000	30651.7	60.76
Cu	188.00	5-1846	460.68	245.05	2014	10-25466	7047	349.86	203.0	42-1140	304.3	149.90	634.0	46-2301	754.4	119.0
Pb	26.85	5-342	74.83	278.71	43.46	5-253	75.91	174.68	18.33	5-70	22.85	124.65	383.2	5-2770	907.9	236.9
Zn	233.10	93-1064	207.17	88.88	504.61	134-4206	1114.21	220.80	206.66	126-245	56.99	27.58	279.4	150-910	242.1	86.62
Ni	20.35	2-185	40.77	200.3	16.69	2-39	12.19	73.02	21.42	7-208	8.68	40.53	26.11	8-41	9.76	37.39
Sr	54.90	5-280	79.76	145.2	46.31	8-169	47.28	102.1	42.92	21-145	33.78	78.71	40.77	17-129	35.07	86.01
Cd	310	<0.5-37.3	8.39	271.2	17.82	<0.5-218.3	60.27	338.2	1.48	<0.5-4.4	1.45	98.3	2.98	<0.5-5.8	4.92	165.1
Bi	343.5	<5-3996	873.6	254.3	591.5	18-2278	768.3	129.9	2078.4	29-10562	3230.6	155.4	2031.6	62-12664	4049.6	199.3
V	27.0	2-109	34.1	126.2	38.62	2-102	32.05	83.00	43.83	10-78	21.74	49.60	43.77	15-75	20.42	46.65
F	15605	1200-36000	12669	81.2	19569	2400-52000	16272	83.2	13713	560-33000	11702	85.3	23133	3200-54000	13905	60.11
Sb	0.41	<0.1-1.9	0.65	156.7	4.82	<0.1-36	10.26	212.9	2.78	<0.1-14.0	3.95	141.9	18.15	<0.1-712	27.81	153.3
Sc	5.57	1.2-22	6.51	116.9	6.66	0.6-15	5.72	85.92	4.93	2.0-11.0	2.88	58.5	5.96	2.3-11	3.11	52.13
Y	24.50	8-83	21.77	88.9	53.54	8-184	49.75	92.92	36.33	8-78	21.11	58.12	53.66	13-8	32.02	59.66
Be	20.20	2-78	17.78	88.0	26.46	<2-32	21.45	81.08	81.17	16-292	74.91	92.29	33.88	6-106	39.10	115.4

¹⁾ S.D.; Standard Deviation, ²⁾ C.V.; Coefficient of Variation=(S.D./mean)×100.
* () ; Number of analyzed samples (unit in ppm, Au in ppb).

Table 3. Abundance of trace elements in the skarns from the Hanging wall Orebody.

Elements	Homblende-Pyroxene (10)*				Garnet-Pyroxene (13)*				Wollastonite-Garnet (7)*				Pungchon Limestone (8)*			
	Mean	Range	S.D ¹⁾	C.V ²⁾	Mean	Range	S.D ¹⁾	C.V ²⁾	Mean	Range	S.D ¹⁾	C.V ²⁾	Mean	Range	S.D ¹⁾	C.V ²⁾
Au	329.6	22-1300	404.9	122.8	94.77	5-294	80.77	85.23	167.0	18-720	249.0	149.1	5.88	<2-34	11.45	194.8
Ag	2.63	<0.4-5.6	2.98	113.3	1.16	<0.4-5.4	1.61	138.6	1.47	0.4-2.7	0.99	67.02	0.25	<0.4-0.4	0.09	37.03
As	776.7	2.7-6000	1865.9	240.2	29.47	3.1-110	32.07	108.8	38.16	2.1-120	40.86	107.1	15.51	<0.5-73	24.05	155.1
Ba	47.50	<50-250	71.15	149.8	36.54	<50-100	28.18	77.08	78.29	<50-340	117.4	150.0	38.75	<50-100	27.61	71.26
Co	19.70	12-27	4.99	25.33	14.39	4-25	7.19	50.01	9.43	4-35	11.33	120.1	3.63	1-6	1.60	44.08
Cr	18.80	7-50	13.65	72.58	11.96	<5-36	8.21	68.65	8.64	<5-16	4.15	48.02	7.13	<5-13	3.47	48.73
Cs	6.50	<1-33	9.51	146.3	2.27	<1-7	1.74	76.65	0.86	<1-2	0.56	64.91	1.13	<1-4	1.28	113.3
Hf	1.25	<1-6.0	1.74	138.9	0.856	<1-5	1.25	147.5	0.50	<1-0.5	0.00	0.00	0.50	<1-0.5	0.00	0.00
Mo	112.3	25-190	54.23	48.29	148.3	2-600	154.2	103.9	429.7	48-1700	618.0	143.8	8.75	<1-30	11.90	136.0
Rb	27.95	<5-190	58.99	211.1	12.73	<5-32	12.16	95.53	2.50	<5-2.5	0.00	0.00	8.00	<5-29	10.46	130.8
Th	4.36	1.2-7.7	3.38	77.41	2.89	1.1-7	2.88	99.52	2.19	1-3.3	0.80	36.55	2.41	<0.5-4.2	1.25	52.01
U	1.78	<0.5-4.5	1.56	87.57	0.82	<0.5-3.2	0.87	106.7	1.47	<0.5-7	2.48	168.2	0.59	<0.5-2	0.63	105.4
W	4075.0	770-17000	4947.0	121.4	905.8	16-1700	482.3	53.24	2698.6	200-15000	5458.9	202.4	2.50	7-160	55.00	129.4
Cu	46.00	8-115	39.04	84.87	42.39	13-180	51.59	121.7	44.14	7-193	67.10	152.0	16.13	10-25	5.41	33.55
Pb	23.80	5-111	34.93	146.7	33.77	7-203	56.81	168.2	27.29	5-67	26.59	97.46	5.25	5-6	0.46	8.82
Zn	222.6	89-476	118.2	53.12	360.3	73-2407	617.0	171.2	250.4	62-972	326.1	130.2	31.13	11-53	13.90	44.67
Ni	10.20	3-21	6.20	60.75	4.77	2-11	2.83	59.40	3.43	2-7	1.90	55.49	4.38	2-7	1.69	38.52
Sr	86.20	12-265	71.42	82.85	54.69	5-292	77.08	140.9	11.42	3-34	11.01	96.36	255.9	148-331	63.99	25.01
Cd	2.51	<0.5-11.55	4.52	180.4	6.64	<0.5-71.2	19.45	293.0	4.80	<0.5-27.5	10.09	210.2	0.33	<0.5-0.6	0.14	43.51
Bi	364.6	15-1115	469.5	128.8	228.4	6-776	216.4	94.74	369.4	6-1057	374.6	101.4	15.44	<5-81	27.51	178.20
V	20.60	2-58	19.33	93.86	7.85	2-41	11.79	150.3	4.00	2-12	3.65	91.29	6.50	4-11	2.62	40.29
F	19870.0	1300-49000	15019.5	75.59	30984.6	1400-53000	17926.0	57.85	38142.9	23000-73000	18270.5	47.90	2563.8	620-12000	3885.10	151.5
Sb	3.09	<0.1-7.5	5.05	163.3	0.96	0.3-1.7	0.81	84.23	0.29	<0.1-1.1	0.38	130.6	0.36	<0.1-1.3	0.42	116.7
Sc	3.69	0.8-11	3.54	96.01	1.91	0.5-8.6	2.41	126.1	1.10	0.4-3	0.88	80.12	1.91	0.8-2.8	0.78	40.74
Y	20.90	8-36	11.31	54.11	11.00	6-31	7.63	69.33	7.43	5-10	1.90	25.61	8.38	6-11	1.77	21.11
Be	66.40	32-120	30.62	46.11	42.92	<2-87	21.67	50.48	28.71	10-71	26.04	90.67	2.75	<2-15	4.95	180.0

¹⁾ S.D; Standard Deviation. ²⁾ C.V; Coefficient of Variation=(S.D/mean)X100.

* () ; Number of analyzed samples. (Unit Au in ppb, the others in ppm).

Table 4. Abundance of trace elements in the skarn from the Footwall Orebody.

Elements	Pyroxene-Hornblende (10)*			
	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾
Au	1809.8	200~3240	1315.9	72.71
Ag	1.44	<0.4~5.2	1.68	116.40
As	16.68	<0.5~56	20.08	120.4
Ba	194.5	<50~550	200.13	102.9
Co	21.6	7~32	8.42	38.9
Cr	40.8	22~79	20.10	49.3
Cs	17.8	3~33	11.14	62.6
Hf	3.3	1~7	1.77	53.5
Mo	352.5	41~1380	457.7	129.8
Rb	159.4	35~280	83.68	52.50
Th	9.34	5.1~19	4.65	49.82
U	6.26	<0.5~9.7	8.06	128.84
W	20880	3800~40,000	12417.3	59.47
Cu	54.30	15~210	58.35	107.46
Pb	9.10	5~20	5.84	64.17
Zn	118.7	35~163	45.11	38.01
Ni	32.0	20~59	11.58	36.17
Sr	77.2	26~233	67.81	87.83
Cd	0.25	<0.5~0.25	0.00	0.00
Bi	1998.2	179~5900	1978.1	98.99
V	71.8	37~143	28.73	40.02
F	12420	3900~22,000	5696.9	45.9
Sb	3.05	<0.1~18	5.42	177.8
Sc	13.86	5.7~31	6.92	49.94
Y	78.50	48~112	17.90	22.81
Be	23.30	2~67	18.76	80.52

¹⁾ S.D.; Standard Deviation. ²⁾ C.V.; Coefficient of Variation=(S.D./mean)×100.

* () ; Number of analyzed samples (unit in ppm, Au in ppb).

Rb/Sr과 K₂O/Na₂O비는 스카른화작용이 진행될수록 계속 증가된다. 이는 스카른화작용중에 계속적으로 열수가 공급되었던 것으로 추정된다. 상반맥광체에서 각 스카른대에서의 각종 미량원소의 평균함량을 나타낸 Fig. 7을 보면 W, Au, Co, Ag, As, Cu 등의 평균함량이 가장 높은 스카른은 각섬석-휘석 스카른이다. 그러나 최대 Mo평균함량은 석류석-휘석대에서 나타난다. 원소비의 변화는 Fig. 8에 나타났다. 상반맥광체의 경우 Au/Au+Ag비와 Au/Ag비는 석회암에서 스카른화가 진행될수록 증가되다가 다시 감소되는 경향을 나타낸다.

각 광체별로 Au스카른에 대하여 44개 원소를 대상으로 하여 상관계수를 구하였는데, 본맥광체의 석영-각섬석스카른에서 주성분원소보다는 미량원소들간의 상관성이 보다 더 좋다. 상관계수가 0.94로 Au와 상관성이 가장 양호한 원소는 Bi이고 상관계수가 0.7~0.9인 원소는 Ag로 나타났다 (Fig. 9). 상반맥광체의 각섬석-휘석스카른에서는 Au와 양의 상관계수가 큰 원소는 U (0.87)와 Bi (0.83)으

로 나타났으며, 하반맥광체에서의 휘석-각섬석스카른의 경우에 상관계수는 다소 낮으나 Au와 가장 양호한 상관성을 가지는 원소는 Bi (0.69)로 나타났다. 따라서, Au스카른과 가장 밀접한 관계를 가지는 원소는 Bi이다.

희토류원소

각 광체별 Au스카른에 대한 희토류원소의 분석결과, 평균함량과 범위를 Table 5에 나타냈다. 금스카른에 대한 희토류원소의 평균함량을 콘드라이트 (Haskin *et al.*, 1968)로 표준화한 희토류원소의 분산패턴은 Fig. 10과 같다. 대체적으로 가벼운 희토류원소 (LREE)가 무거운 희토류원소 (HREE)에 비해 상대적으로 다소 부화되어 나타난다. 즉, LREE에서는 금경사로 감소하나 HREE는 거의 완만한 경향을 보인다. Fig. 10을 보면 하반맥광체의 스카른과 본맥광체 및 상반맥광체의 스카른에서 모두 Eu 이상이 나타나는 분포양상을 보여준다. 상반맥광체나 본맥광체 및 하반맥광체 모두 상동화강암의 희토류원소 분포양상과 비교적 유사한 경향을 보인다. 또한, 희토류원소 함량도 하반맥광체에서 상반맥광체로 갈수록 감소되며 분산계수가 증가하는 경향을 나타낸다 (Table 5). 이렇게 분산계수가 증가하는 원인으로는 각 광체별로 광물조성이 불균질한 것으로 해석된다. 상기 사실로부터 상동중석광상은 상동화강암으로부터 방출된 열수광화용액이 하부에서 상부로 상승할수록 희토류원소의 함량을 침전 감소시킨 것으로 추정된다.

광종 부화요인 해석을 위한 다중회귀분석

상동중석광상에서 산출되는 주 광종인 W, Au 원소를 대상으로 하였을 때, 주광체인 본맥광체의 전체스카른에 대해서 이들 원소들의 함량이 어떠한 원소들의 함수관계에 의해 변화되며 또한 어떤 원소가 이들 원소의 함량변화에 가장 중요한 영향을 주었는지를 규명하기 위해 다중회귀분석을 하였다. 다중회귀분석 방식으로는 중요한 변수 (통계적으로 유의도가 높은 변수)순으로 투입되다가 통계적으로 유의성이 없는 변수들만 남게되면 분석이 중단되는 단계별 투입방식 (step wise selection method)을 이용하였다. 먼저, 증석의 경우 TiO₂, Al₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, CaO, FeO, P₂O₅의 주성분원소와 Au, Ag, As, Ba, Co, Cr, Cs, Hf, Mo, Rb, Th, U, Cu, Pb, Zn, Ni, Sr, Bi, V, F, Sb, Sc, Y, Be의 미량원소 및 La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu의 희토류원소를 독립변수로 하고 W를 종속변수로 하였을 때, Mo, Y, Rb, P₂O₅, Th, Zn, Bi만이 유의한 변수로 회귀방정식에 포함되었고 나머지 원소들은 제거

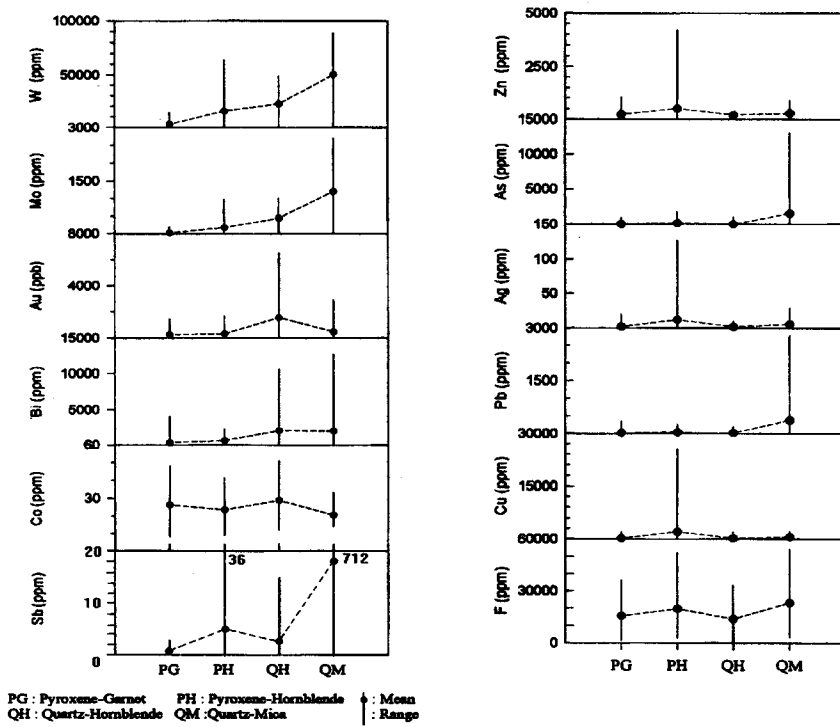


Fig. 5. Variation of ore-related trace elements during skarnization for the Main Orebody.

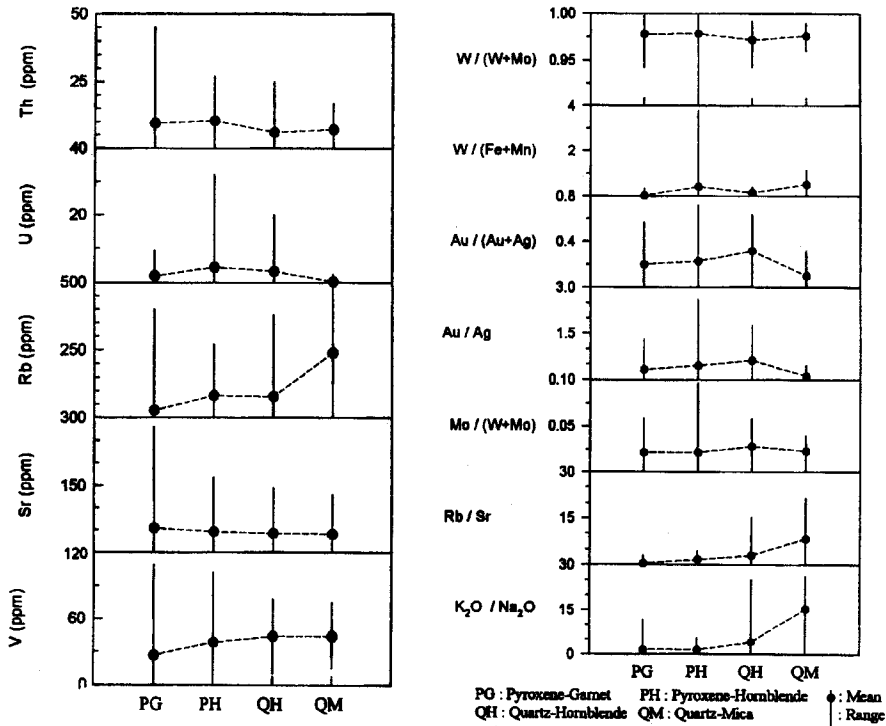


Fig. 6. Variation of element ratios during skarnization for the Main Orebody.

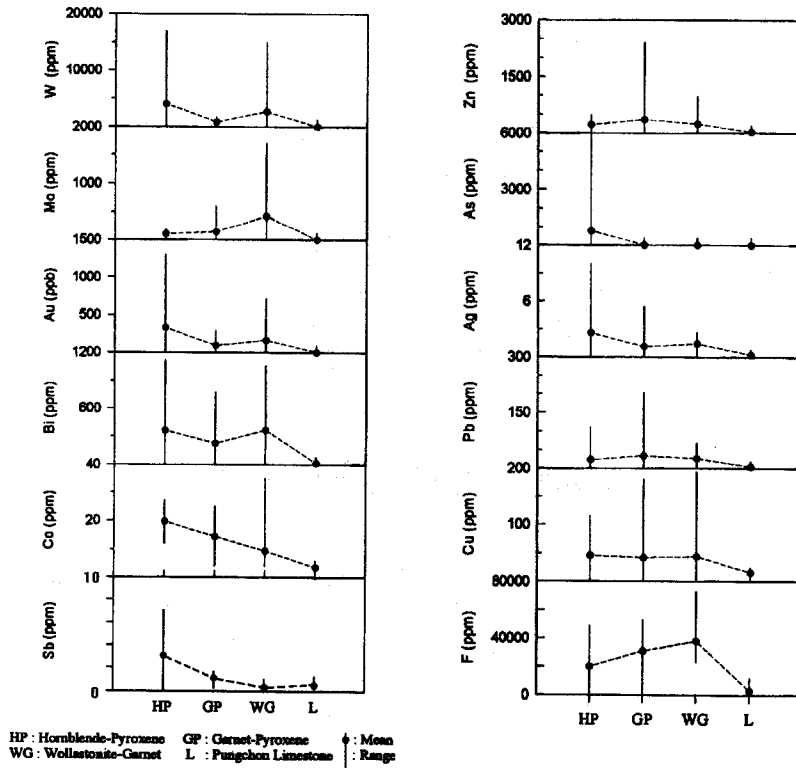


Fig. 7. Variation of ore-related trace elements during skarnization for the Hangingwall Orebody.

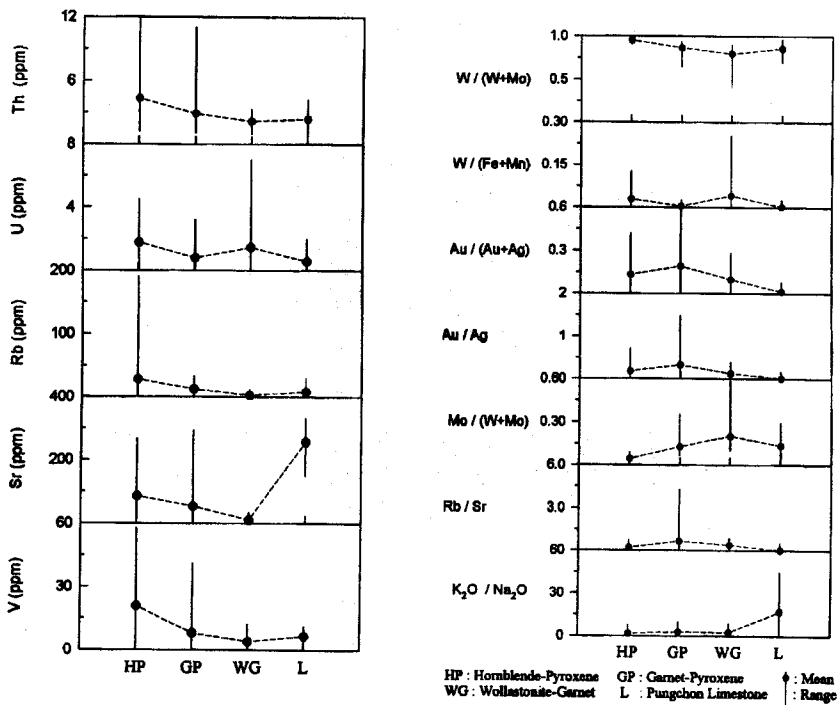


Fig. 8. Variation of element ratios during skarnization for the Hangingwall Orebody.

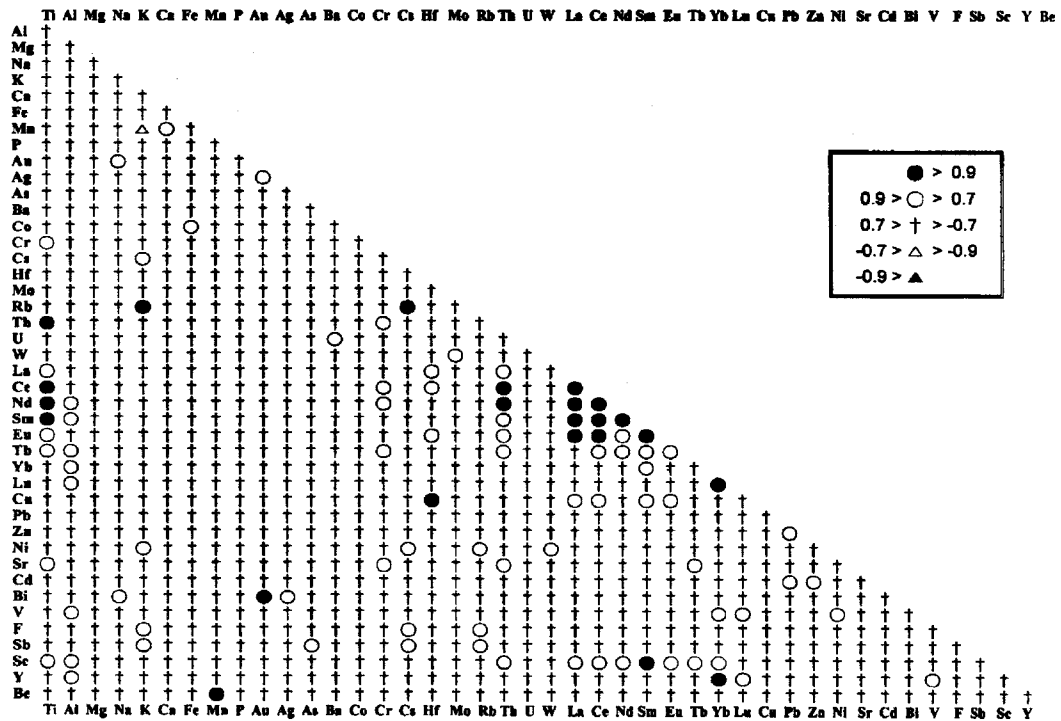


Fig. 9. Correlation coefficients of 44 elements in the gold bearing skarn (Quartz-Hornblende).

Table 5. Abundance of rare earth elements in the gold bearing skarns.

Elements	Hangingwall Orebody (10)*				Main Orebody (12)*				Footwall Orebody (10)*			
	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾	Mean	Range	S.D. ¹⁾	C.V. ²⁾
La	9.49	2~31	9.67	101.86	25.99	7~64	16.80	64.65	64.2	40~110	24.51	38.18
Ce	23.0	6~66	21.03	91.45	46.17	14~140	41.11	89.04	97.0	64~160	32.59	33.60
Nd	11.35	<5~32	10.08	88.81	19.63	<5~56	17.17	87.47	42.10	27~68	10.90	25.89
Sm	2.91	0.8~6.0	1.99	68.32	4.26	1.2~4.8	2.71	63.52	11.35	6.9~21	4.28	37.69
Eu	0.68	0.2~1.5	0.39	56.66	1.14	0.3~3.0	0.75	65.49	1.57	0.8~2.4	0.51	32.48
Tb	0.78	<0.5~2.7	0.76	98.61	1.20	<0.5~1.6	1.07	89.52	2.42	1.6~3.1	0.44	18.04
Yb	2.55	0.8~5.4	1.55	60.65	4.19	1.3~8.6	2.51	59.86	6.98	3.8~9.6	2.14	30.69
Lu	0.35	0.09~0.69	0.24	67.80	0.47	0.14~1.03	0.31	66.78	0.90	0.54~1.16	0.24	26.45

¹⁾ S.D.; Standard Deviation. ²⁾ C.V.; Coefficient of Variation=(S.D./mean)×100.

* () ; Number of analyzed samples (unit in ppm).

되었다. 즉, 7개의 원소만으로도 중석의 함량변화를 94% (R square=결정계수) 설명할 수 있다 (Table 6). 중석함량의 회귀식은

$$W \text{ (ppm)} = 27.93\text{Mo (ppm)} + 334.4\text{Y (ppm)} + 32.88\text{Rb (ppm)} + 4.29\text{Zn (ppm)} + 0.97\text{Bi (ppm)} - 9515.05\text{P}_2\text{O}_5 \text{ (wt.\%)} - 377.56\text{Th (ppm)} - 2683.84 \text{로 도출되었다.}$$

Table 6에서 표준회귀계수 (standard regression coefficient=SRC)는 부분회귀계수 (regression coefficient)를 표준화한 것으로서 독립변수들마다 단위가 다를 경우, 회귀계수만으로는 그 중요도를 판단할 수 없으므로 단위를

표준화하여 회귀계수를 산출함으로써 독립변수들의 상대적 중요도를 나타내주는 계수이다. 표준회귀계수의 절대값이 클수록 설명력이 높은 변수를 의미한다. 따라서, 본맥광체에서 중석의 함량변화에 가장 크게 영향을 미친 원소는 Mo (SRC=0.678)이며 다음으로 Y (SRC=0.472)이다.

회귀식에 포함된 원소중 Mo는 W와 잘 수반되는 원소이고 Y는 이온반경이 0.92 Å로서 Ca²⁺의 이온반경 (0.99 Å)과 비슷하므로 회귀식에 치환될 수 있기 때문이다.

마찬가지 방식으로 본맥광체의 전체스카른에 대한 Au

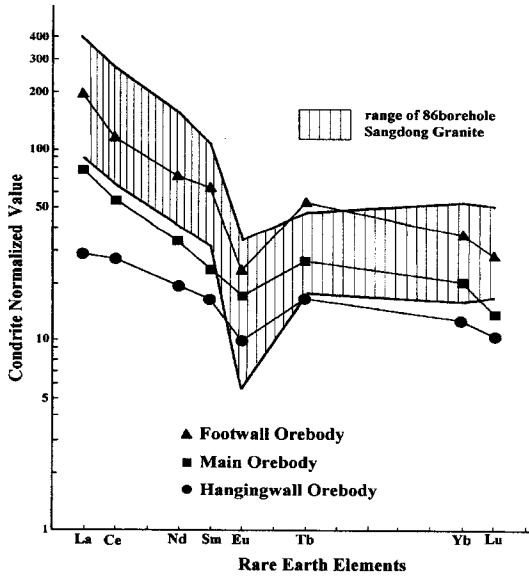


Fig. 10. Chondrite normalized REE patterns of average value for gold skarns.

함량의 다중회귀분석시, Au의 함량 변화와 관련된 부분 회귀계수, 표준화회귀계수 및 이들의 유의성검증 등 다중 회귀분석 결과를 Table 7에 나타냈다. 회귀모형의 적합도를 검증한 결과, F값은 54.96이고 자유도가 (6,47)로서 0.0000 (<0.05)의 유의수준을 보여서 이 회귀모형은 적합하다. 회귀모형의 설명력을 나타내는 결정계수 R²는 87.5%이다. 유의한 변수로는 Bi, As, Sb, Pb, Ag, Cu로 도출되었다 (Table 7).

회귀식은 Au (ppb)=0.642Bi (ppm)+1.802As (ppm)+61.24Ag (ppm)-81.508Sb (ppm)-5.942Pb (ppm)-0.242Cu

(ppm)+179.06으로 나타났다 (Table 7). Au의 함량변화에 가장 큰 영향을 주었던 원소는 As (표준화회귀계수=2.513)로 나타났다.

Au는 As유화물이나 Sb유화물 광물의 표면에 강하게 흡착된다. 또한 황철석과 같은 광물이 있으면 금 함유종(species)의 침전이 발생된다 (Tossell, 1996).

상반맥광체의 전체스카른 (규회석-석류석, 석류석-휘석, 각섬석-휘석)에 대한 금의 다중회귀분석결과, 회귀모델의 적합도 F값은 85.65이고 자유도가 (3, 26)로서 0.000<(0.05)의 유의수준을 보여 산출된 회귀모델이 적합하였다. 이 때의 회귀식은 Au (ppb)=0.042W (ppm)+0.311Bi (ppm)+1119.2Na₂O (Wt.%) -82.36으로 나타났다.

이 회귀식의 설명력은 90.8% (R²=결정계수)로 본맥광체의 경우보다 더 크다. 금의 부화에 영향력을 준 원소의 상대적 크기는 W (SRC=0.608), Bi (0.389), Na₂O (0.225)의 순서로 된다. 상반맥광체와 본맥광체에서 금의 함량변화에 제일 큰 영향을 준 원소가 다른것은 금의 침전환경이 차이가 있었던 것으로 해석할 수 있다.

광상 성인에 대한 고찰

상반맥광체에서는 Fig. 2에서와 같이 광체 중앙부가 높고 이 솟고 주변부는 작은폭으로 되어 있는 것으로 볼 때, 열수용액이 지하 심부로부터 상승됨에 따라 주로 침투교대작용에 의한 스카른화작용이라고 해석된다. 본맥광체와 하반맥광체는 원암이 석회암으로서 표봉점판암내 협재된 층상암석이므로 층상광체를 그대로 유지하나 스카른은 동심원상의 convex상 누대분포를 이루는 것으로 해석된다 (Zharikov, 1970).

Table 6. Multiple regression analysis of major and trace elements on tungsten content for ore skarns in the main orebody.

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean of Squares	F value	Significant F
Linear Regression	2.84×10 ¹⁰	7	4.06×10 ⁹	94.45*	0.0000 (<0.05)
Residual	0.97×10 ⁹	46	4.301×10 ⁷		
R Square	Variable	Regression Coefficient	Standard Regression Coefficient	T	Significant T
0.940	Mo	27.93	0.678	12.922	0.0000
	Y	334.40	0.472	9.116	0.0000
	Rb	32.88	0.181	3.932	0.0003
	P ₂ O ₅	-9515.05	-0.199	-3.735	0.0005
	Th	-377.56	-0.146	-3.185	0.0026
	Zn	4.29	0.101	2.560	0.0138
	Bi	0.97	0.096	2.385	0.0213
(constant)	-2683.84	-1.714		0.0933	

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

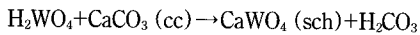
Table 7. Multiple regression analysis of major and trace elements on gold content for ore skarns in the Main Orebody.

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean of Squares	F value	Significant F
Linear Regression	75329836	6	12554972	54.963*	0.0000
Residual	10735930	47	228424		(<0.05)

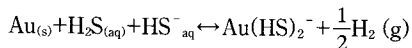
R Square	Variable	Regression Coefficient	Standard Regression Coefficient	T	Significant T
0.875	Bi	0.642	1.201	16.056	0.0000
	As	1.802	2.513	8.415	0.0000
	Sb	-81.508	-0.864	-8.658	0.0000
	Pb	-5.942	-1.779	-5.793	0.0000
	Ag	61.240	-0.849	2.921	0.0053
	Cu	-0.242	-0.657	-2.312	0.0252
	(constant)	179.069		2.400	0.0204

* Significant at the $\alpha=5\%$ level of significance.

상동중석광상은 쥐라기 대보조산운동시기에 bedding thrust에 의해 단층이 형성되었고 (김정환, 1991) 이것이 광화용액의 주통로로 작용하였을 것이다. 스카른광물과 상동화강암의 K-Ar년대가 동일하다는 사실 (Farrar *et al.*, 1978, Clark, 1985), 상동중석광상에서의 초기스카른인 규회석-석류석-휘석 스카른의 산소동위원소 값이 상동화강암과 유사한 사실 (Kim *et al.*, 1988)과 Sr동위원소비가 상동화강암의 영역에 근접한다는 사실 (이부경, 전용원, 1997) 및 스카른의 회토류원소의 분포형태가 상동화강암과 유사한 사실, 또한 상동화강암내 W, Mo, Bi, Au가 부화되어 있는 것으로 보아 상동화강암은 상동중석광상과 밀접한 관계가 있다. 상동화강암으로부터 유출된 열수용액은 대부분 가스상으로 상승 운반되고 상동화강암으로부터 운반거리가 멀어짐에 따라 약 200°C 이상의 온도가 강하하게 되며, 이 과정에서 묘봉층내의 석회암과 풍흔석회암과 반응하여 초기스카른인 규회석 또는 석류석을 형성시켰을 것이다. 이 때에 W, Mo, Au를 함유한 광화용액은 장산규암층에서는 Ca^{2+} 이온이 제공되지 않아 회중석을 정출시키지 못하였으나 석회암과 같은 Ca성분이 많은 알카리 환경에 놓이게 되면 환원상태에서



로 침전되었을 것이다. 장산규암층에서는 유황의 활동도가 약화되어 합취수연석 석영맥을 형성시켰을 것으로 추정된다. 광화용액중에 Au는



의 반응식으로 운반되다가 (Brown, 1989) 환원환경하에

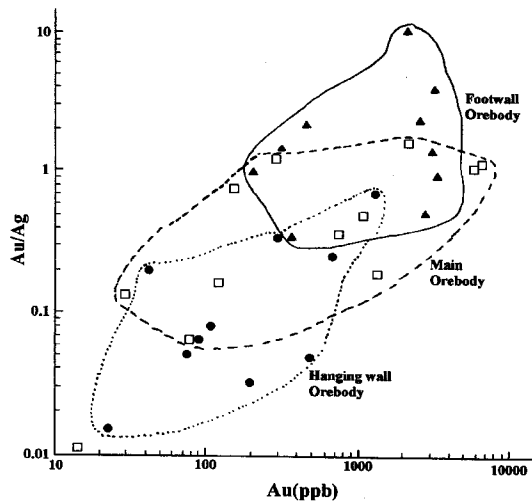
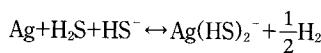


Fig. 11. Au/Ag metal ratios of gold skarns.

서 침전되었을 것이다 (Meinert, 1989).

Fig. 11은 각 광체별 금스카른에서의 Au/Ag비 대 Au 함량의 관계도이다. Fig. 11에서 보면 전반적으로 Au함량은 Au/Ag비와 비례하는 경향을 보인다. Au/Ag비의 크기는 하반맥광체 > 본맥광체 > 상반맥광체의 순으로 나타나는데 이는 Ag함량이 작게 함유되는 것에 기인하며, 각 광체별 Ag의 침전환경이 차이가 있었음을 의미한다.

즉, Ag는 광화용액중에



의 반응식으로 환원환경이 되면 급격히 침전되는 것으로 알려져있다 (Brown, 1989). 따라서, 상대적으로 상반맥 광체의 생성환경은 하반맥광체와 본맥광체보다는 보다

더 산화환경이었던 것으로 해석되어 진다.

본맥광체중에서 금을 제일 많이 함유하는 석영-각섬석 스카른에서의 석영내 유체포유물의 평균 균일화온도가 $243 \pm 50^\circ\text{C}$ 로 측정된 바 있고 (문건주, 1985), 휘창연석, 창연 및 황철석 등이 수반되는 것을 근거로 하여 조사된 pH=7일 때의 스카른의 생성환경은

$$\Sigma(S)=10^{-3}, f_{\text{O}_2}=10^{-31}, f_{\text{S}_2}=10^{-14}$$

로 알려져 있는 바 (문건주, 이항재, 1980), 이 자료들을 Lewis (1982)의 pH대 $\log f_{\text{O}_2}$ 의 관계도에 점시한 결과, Au는 Au(HS)₂의 형태로 존재했다가 Au금속을 침전시키는 것을 알 수 있었다.

석영-각섬석대에는 휘창연석과 자연창연이 공생하는데 광산층의 자료를 보면 휘창연석 대 자연창연과의 비는 본맥광체에서는 0.81이고 상반맥광체에서는 0.72로서 본맥광체에서 휘창연석이 더 우세하다. 휘창연석과 자연창연의 구성비로 볼 때 본맥광체보다 상반맥광체의 생성온도가 다소 낮은 것으로 추정된다. Craig, Barton (1973)에 의하면 금과 자연창연은 271.5°C에 침전된다고 한 바 있고, 휘창연석과 자연창연의 공생온도는 Happ, Davy (1971)에 의하면 270°C라고 한 바 있다. 따라서 금의 생성온도는 270°C 이하로 추정된다.

Meinert (1989)에 의하면 세계적으로 대표적인 Au스카른의 각섬석은 다른 광종의 스카른에서 산출되는 스카른광물보다 화학조성중 Al성분이 풍부하고, 휘석의 경우는 거의 순수한 헤덴버자이트 (hedenbergite)가 우세한 휘석으로서 Al과 Fe성분이 부화된 경향이 있으며, 석류석은 Al성분이 부화된 그랜다이트 (grandite)라고 한 바 있다. 상동광상의 경우 상기한 경향과 모두 일치한다 (문건

주, 1984; 조규호, 1990). 최진범, 김수진 (1991)은 석류석과 휘석의 화학조성으로 상동스카른광상은 환원환경에서 생성되었다고 보고한 바 있다.

Choi (1990)와 조규호 (1990)의 휘석의 EPMA분석자료를 Fig. 12와 같이 Al₂O₃대 hedenbergite mole%로 나타내면, 본맥광체와 하반맥광체의 휘석보다는 상반맥광체의 휘석은 hedenbergite의 함량이 낮은것을 알 수 있다. 또한 금을 함유하지 않은 스카른인 석류석-규회석 스카른을 기준으로 하여 함금휘석내 Al₂O₃ 함량의 한계치를 구할 수 있었다.

결론

1. 상동스카른광상의 관계화성암인 상동화강암내의 미량원소의 평균함량은 남한의 백악기 화강암류의 평균함량에 비해 W는 33배, F는 4배, Bi는 24배, Mo는 3배, Au는 1.4배, Ag는 12.2배, U는 7배, Th는 2배 더 함유되어 있다. 전체 상동화강암시료에 대하여 Au와 상관계수 0.9이상으로 양호한 양의 상관성을 보이는 원소는 As와 Sb이다.

2. 상동중석광상에서의 Au는 각섬석이 우세한 스카른에 수반되는데 하반맥광체에서는 휘석-각섬석스카른 (평균 Au함량, 1809 ppb)에, 본맥광체에서는 석영-각섬석대 (1552 ppb)에 수반되고, 상반맥광체에서는 각섬석-휘석대 (392 ppb)에 수반된다. 이는 후퇴교대작용시에 금 광화용액이 보다 환원환경하에서 침전된 것으로 추정된다.

3. Au스카른에서 Au와 상관성이 가장 양호한 원소는 본맥광체의 석영-각섬석스카른에서는 Bi (상관계수=0.94)이고 상반맥광체의 각섬석-휘석스카른에서는 U (0.87)와 Bi (0.83)이었으며 하반맥광체의 휘석-각섬석스카른에서는 Bi (0.69)로 나타난 바, Au는 Bi와 가장 밀접한 관계를 보여준다.

4. Au스카른의 희토류원소는 하반맥광체에서 상반맥광체로 갈수록 감소됨을 나타내며 상동화강암과 비교적 유사한 지구화학적 분포양상을 보인다. 이는 상동화강암으로부터 방출된 열수광화용액이 하부에서 상부로 상승할수록 희토류원소의 함량을 침전감소 시킨것으로 추정된다.

5. 다중회귀 분석결과, 본맥광체의 전체 스카른에 대하여 증석함량의 변화에 유의한 원소는 설명력을 94%로 하여 Mo, Y, Rb, Zn, Bi, P₂O₅, Th로 도출되었고 이중 가장 크게 영향을 미치는 원소는 Mo이다.

금의 경우, 본맥광체의 Au 함량변화에 영향을 주는 원소는 Bi, As, Sb, Pb, Ag, Cu로 나타났는데, Ag, As, Bi는 Au와 양의 상관관계이고 Sb, Pb, Cu는 음의 상관관계를 보여준다. 이 중 가장 영향을 준 원소는 As이다. 그러나

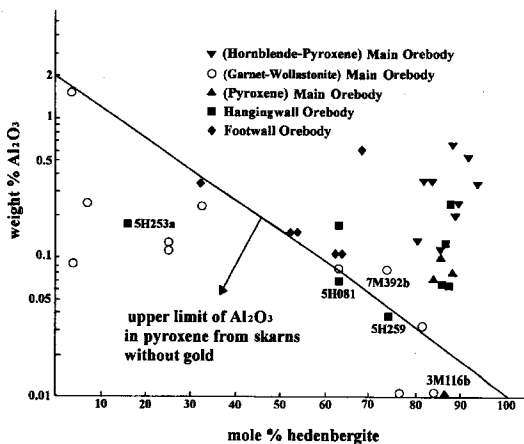


Fig. 12. Iron and aluminum contents of pyroxene from gold skarns.

상반맥광체의 경우는 W, Bi, Na₂O의 순서로 된다. 상반맥광체와 본맥광체에서 금의 함량변화에 영향을 준 원소가 다른 것은 금의 침전환경이 차이가 있었음을 의미한다.

6. Au/Ag비의 크기는 하반맥광체 > 본맥광체 > 상반맥광체의 순으로 나타나는 바, 상반맥광체의 생성환경은 하반맥광체와 본맥광체보다 더 산화환경이었던 것으로 추정된다.

7. 단사회석내 hedenbergite의 mole%와 Al₂O₃비의 관계도로부터 합금회석의 Al₂O₃ 한계치를 구할 수 있었다.

참고문헌

- 김광호 (1986) 상동화강암의 암석학 및 암석화학적 연구. 경북대학교 대학원 이학석사학위논문, 80p.
- 김정환 (1991) 태백산 지역의 지질구조와 광상. 태백산 지역의 스키르형 광상, 1991년도 광산지질 심포지움, p. 13-24.
- 문건주, 이향재 (1980) 상동광상 물리브덴의 산출상태에 관한 연구. 광산지질, 13권, p. 117-127.
- 문건주 (1984) 상동중석광상의 주맥석 광물에 대한 지화학. 광산지질, 17권, p. 79-90.
- 문건주 (1985) 상동텅스텐 스키르광상의 유체포유물 연구. 광산지질, 18권, p. 205-216.
- 이부경, 전용원 (1997) 상동중석광상의 Sr동위원소 지구화학적 특성에 의한 성인 연구. 한국자원공학회 제 69회 학술 발표회 논문집, p. 181-186.
- 조규호 (1990) 상동텅스텐 스키르 광상의 물리화학적 특징. 서울대학교 대학원 이학석사학위논문, 117p.
- 최진범, 김수진 (1991) 함백향사내의 스키르광상에서 산출되는 석류석과 단사회석의 광물학과 철화학. 한국광물학회지, 4권, p. 119-128.
- Beddoe-Stephens, B., Shepherd, T.J., Bowles, J.F.W. and Brook, M. (1987) Gold mineralization and skarn development near Muara Sipongi, West Sumatra, Indonesia. *Econ. Geol.*, v. 82, p. 1732-1749.
- Brown, K.L. (1989) Kinetics of gold precipitation from experimental hydrothermal sulfide solutions. In Keays, R.R., Ramsay, W.R.H. and Groves, D.I. (ed) *The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988*. *Econ. Geol.*, Monograph 6, p. 320-327.
- Choi, S.M. (1990) The Mechanism of formation and geochemical characteristics in the Sangdong tungsten skarn deposits. unpub. M. S thesis, Seoul National University, 137p.
- Clark (1985) Age of Sangdong granite. in personal communication.
- Craig, J.R. and Barton, P.B. (1973) Thermochemical approximations for sulfosalts. *Econ. Geol.*, v. 68, p. 493-506.
- Ettlinger, A.D. and Meinert, L.D. (1992) Gold skarn mineralization and fluid evolution in the Nickel plate deposit, British Columbia. *Econ. Geol.*, v. 87, p. 1541-1565.
- Farrar, E., Clark, A.H. and Kim, O.J. (1978) Age of the Sangdong tungsten deposit, Republic of Korea, and its bearing on the metallogeny of the southern Korean peninsula. *Econ. Geol.*, v. 73, p. 547-566.
- Happ, J.P. and Davey, T.R.A. (1971) Solubility of sulfur in liquid bismuth. *Inst. Min. Metall. Trans. Sec. C*, v. 80, p. 190-191.
- Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A. and Wildeman, T.R. (1968) Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In Ahrens, L.H. (ed.), *Origin and Distribution of the Elements*, v. 1, Pergamon Oxford, p. 889-911.
- Jin, M.S. (1988) Geochemistry of the Cretaceous to early Tertiary granitic rocks in southern Korea pt. II, trace elements geochemistry. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 24, p. 168-188.
- Kim, K.H., Kim, O.J., Nakai, N. and Lee, H.J. (1988) Stable isotope studies of the Sangdong tungsten ore deposits, south Korea. *Mining Geol.*, v. 38, p. 473-487.
- Lewis, A. (1982) Gold geochemistry. *Engineering and Mining Journal*, v. 183, No. 12, p. 56-60.
- Meinert, L.D. (1989) Gold skarn deposit-geology and exploration criteria. In Keays, R.R., Ramsay W.R.H. and Groves, D.I. (ed) *The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988*. *Econ. Geol. Monograph* 6, p. 537-625.
- Percival, T.J., Radtke, A.S. and Bagby, W.C. (1990) Relationships among carbonate-replacement gold deposits, gold skarns, and intrusive rocks, Bau mining district, Sarawak, Malaysia. *Mining Geol.*, v. 40, No. 1, p. 1-16.
- Todorov, T.A. (1994) Gold bearingness of skarn deposits: examples from Bulgaria. *The 9th Symposium of Intern. Assoc. on the Genesis of IAGOD Abstracts*, v. 1, p. 322-324.
- Tossell, J.A. (1996) The Speciation of gold in aqueous solution; A theoretical study. *Geochemica et Cosmo. Acta*, v. 60, p. 17-29.
- Yoon, C.H. (1991) Gold content of Jurassic and Cretaceous granitic rocks in Korea. *Mining Geol.*, v. 41, p. 151-158.
- Zhao, Y. (1994) Gold skarn deposits in China. *The 9th Symposium of Intern. Assoc. on the Genesis of IAGOD Abstracts*, v. 1, p. 330-331.
- Zharikov, V.A. (1970) Skarns. *Int. Geol. Rev.*, v. 12, p. 541-559, 619-647, 760-775.

1998년 3월 31일 원고접수