

홍천 철-희토류광상 모암의 암석화학

박종권* · 이한영

한국지질자원연구원, 지질연구부

Petrochemistry of the Hongcheon Fe-REE ore deposit in the Hongcheon area, Korea

Park Joong Kwon* and Lee Han Yeang

Korea Institute of Geosciences and Mineral Materials (KIGAM), Geology Division

요약: 선캠브리아기 변성퇴적암류를 관입하고 있는 탄산염암에 배태하는 홍천 철-희토류 광상은 자철석, 안케라이트, 능철석, 마그네사이트, 스트론티아나이트 등의 다양한 탄산염광물과 모나자이트, 아지린휘석, Na-각섬석 및 황화광물들이 산출되어 이들 암석의 지화학적특성과 성인을 규명하고자 주 원소, 미량원소, 희토류원소 및 산소-탄소의 안정동위원소의 광물 및 암석화학연구가 이루어졌다. 각 원소(주원소, 미량원소, 희토류원소)들을 본 연구지역의 탄산염암과 유사한 철질 카보나타이트(ferro-carbonatite)와 비교하면 주 원소에서는 농집된 FeO와 결핍된 CaO가 관찰되며, SiO₂가 증가하면서 TiO₂와 Al₂O₃ 증가, CaO, FeO, MgO 및 P₂O₅의 약한 감소가 인지되나 분산되어 뚜렷한 경향은 아니다. 미량원소는 Nb, Zr 및 Zn이 철질 카보나타이트보다 결핍되어 나타나며, SiO₂의 증가에 따른 V 및 Ni의 증가, U 및 Rb의 미약한 증가가 확인되나 타 원소들은 분산되어 뚜렷한 경향을 나타내지 않는다. 희토류원소는 전희토류(TREE)함량이 매우 높고 La, Ce, Pr, Nd 및 Sm 같은 경희토류의 농집, 그리고 결핍된 중(重)희토류로 인하여 높은 La/Lu 값을 보이고 있다. 안케라이트, 스트론티아나이트 및 전암의 산소 및 탄소 안정동위원소 결과는 본 암이 화성기원의 카보나타이트용융체에서 유래된 것으로 나타난다. 홍천 철-희토류 광상 탄산염암의 암석화학적 특성은 일반적인 철질 카보나타이트와는 차이가 있으며 러시아 Kovdor 및 핀란드 Sokli 지역에서 산출되는 카보나타이트의 일종인 포스코라이트(phoscorite)의 암석화학적분과 매우 유사하다.

핵심어: 철-희토류광상, 자철석, 모나자이트, 탄산염암, 철질 카보나타이트, 포스코라이트

Abstract: In order to understand its origin and petrogenesis, petrochemical studies of major, trace elements, REE, and stable isotopes of oxygen and carbon from the Hongcheon Fe-REE deposits have been investigated. The Hongcheon Fe-REE deposit intruding into Precambrian metasedimentary rocks consists of magnetite, various carbonates such as ankerite, siderite, magnesite and strontianite, monazite, aegirine-augite, Na-amphibole, and sulfides. Compared with major elements abundances of typical ferro-carbonatites, the Hongcheon Fe-REE deposit is enriched in FeO and depleted in CaO with increasing of SiO₂, where TiO₂ and Al₂O₃ increased and CaO, FeO, MgO and P₂O₅ are slightly decreased, but those are rather scattered and their trends are somewhat ambiguous. V, Ni, U and Rb slightly increasing with of SiO₂ increase and scattering or no trends of other detected elements. Nb, Zr and Zn are depleted then the abundances of typical ferro-carbonatites (Woolley and Kempe, 1989). In rare earth elements a large enrichment of total REE (maximum 14.8 wt%) and LREE relative to chondrites and HREE depleted more than the values of ferro-carbonatites therefore La/Lu ratios shows large abundances (max. 16,797). The results of stable isotopes of O and C from minerals of ankerite and strontianite and whole rocks represent studied rocks are from igneous carbonatitic melts. Although petrochemical characteristics of the Hongcheon Fe-REE deposits are somewhat different from normal ferro-carbonatites from the world, this discrepancy suggests another conclusion that petrochemical characteristic of the studied Fe-REE mineralized rocks are similar to those of phoscorites from Kovdor, Russia and Sokli, Finland showing the same petrochemical compositions described above.

*Corresponding author: Tel. 82-42-488-1498, E-mail: jkwon@kigam.re.kr

Key words: Magnetite, Monazite, Carbonate minerals, Fe-carbonatites, Phoscorite

서 언

홍천지역의 선캠브리아기 편마암내에 형성된 철광상은 다양한 탄산염광물, 높은 REE, Sr, Ba 등을 함유하고 있어 암석학 및 광상학연구에 관심의 대상이 되어 왔다. 본 광상에 대한 기존 연구로 김원조 외(1966), 박중권과 황덕환(1995), 이종혁과 이상현(1989), 이상현(1998), 김상중 외(2001), 이한영과 박중권(2002)이 있다. 이들 중 김원조 외(1966), 이종혁과 이상현(1989), 이상현(1998)은 홍천 철광상의 기원이 퇴적변성기원으로서, 박중권과 황덕환(1995), 김상중 외(2001), 이한영과 박중권(2002)은 화성기원으로 보고하였다. 본 철광상을 배태한 모암의 석기질에는 다양한 탄산염광물과 특히 희토류 함량이 높으며 국내에서 출현되는 일반 철광상의 암체와는 확연히 구분되는 양상을 띠기 때문에 본 광상을 형성하는 암상의 종류와 성인에 대한 고찰이 필요하다. 이한영 외는(2002) 암석기재학 및 광물화학 연구를 통하여 본 암체가 카보나타이트 중 철질 카보나타이트라고 제시하였다. 본 연구에서는 희토류를 배태하는 탄산염암의 조성분, 미량원소, 희토류원소 및 안정동위원소의 암석화학연구를 통하여 보다 사실에 접근하는 암상분류 및 성인에 대해 고찰 하고자 한다.

일반지질

연구지역은 선캠브리아기의 경기 편마암 복합체에 속하며 흑운모 편마암, 각섬석-흑운모 편마암, 화강암질 편마암류로 구성되며 후기에 이를 관입한 주라기의 홍천 화강암이 조사지역을 벗어난 동남부에 분포하고 있다(Fig. 1). 이 지역의 암석학적 연구는 신병우 외(1975), 이종혁과 이상현(1989), 이한영 외(1991), 조문섭과 김종욱(1993), 이상현(1998)이 있으며 철광상을 배태하는 암석을 중심으로 한 연구는 이종혁과 이상현(1989), 이상현(1998), 이한영 외(2002)가 있다. 이종혁과 이상현(1993)은 철광은 퇴적기원의 변성광상이며 탄산염광물은 후기에 도입된 탄산염-유화물질에 의한 것이라 하였다. 그 후 이상현(1998)은 철광상에 함유된 유색광물(엠피블류, 흑운모, 녹니석)의 광물화학적 연구를 통해 철광의 탄산염광물이 후기에 도입된 열수용액에 의해 이차로 생성된 것이라 했다. 이한영 외(2002)는 연구지역의 광체에서 산출되는 탄산염 광물들과 유색광물 광석광물들을 정량적으로 분석 동정하고 철광

은 희토류를 수반하는 관입양상을 띠는 화성기원의 탄산염암으로서 이 탄산염암은 주변의 벽암에 Na-교대작용을 일으켜 페나이트가 형성되었으며 탄산염암은 맨틀기원의 분화된 철질 카보나타이트 용융체의 산물일 것이라고 하였다.

흑운모 편마암은 조사지역을 가로지르는 장남천의 동부지역에 분포하며 주로 흑운모, 석영, 장석으로 구성되고 유색 광물대와 무색 광물대가 잘 관찰되며 N30~70° W 주향과 15~60° SW 경사를 보인다. 흑운모-각섬석 편마암은 장남천의 서부지역에 분포하며 흑운모 편마암과는 점이적이다. 이들 편마암내에는 자철석을 함유하는 탄산염암이 남북방향으로 2 km 정도 대상으로 분포한다. 편마암은 흑운모, 각섬석, 사장석이 주 구성 광물이며 석영이 드물다. 각섬석의 선상배열로 엽리가 현저하며 엠피블라이트가 협재한다. 편리를 보이는 조립질의 화강암질 편마암은 증골 입구 하천 가장자리와 두촌중학교 뒷편에 분포한다. 지질은도계, 압력계를 이용하여 측정된 조사지역의 최고변성온도와 압력은 650°C, 5-6 kbar으로 상부 각섬석상에 속하는 변성상을 보인다(이한영 외, 1991) 이외에 규장반암, 염기성 맥암들이 관찰된다.

암석기재

광체는 장남천을 따라 대상으로 4개소(Fig. 1)에 남북방향으로 노출되어 있다. 총연장은 2.2 km, 폭은 10~40 m로 대부분 다량의 자철석을 함유는 등립질 탄산염암이며 국부적으로 자철석을 거의 함유하지 않는 부분이 불규칙하게 산출된다. 광체는 북쪽에서부터 북광체 중앙광체 남광체로 구분되며 남광체는 동서방향의 단층에 의해 변위되어 두개로 나누어 진다. 광체 즉 탄산염암은 전체적으로 대상구조를 이루고 있으며 북광체에서는 주변에 아지린휘석(aegirine-augite)을 주구성광물로 하는 조립질 집합체의 틈을 따라 망상으로 주입되어 아지린휘석이 Na-엠피블로 변질된 반응태를 형성하기도 한다. 탄산염암은 대부분 편마암의 편리를 따라 층층관입(lit-par-lit) 형태로 관입하거나 열극을 충전한 형태들이 관찰된다. 광체는 페나이트로 변한 편마암과 탄산염암이 서로 호상으로 산출되어 탄산염암이 편마암의 편리를 따라 채우고 있으나 탄산염암에는 편리가 관찰되지 않는다. 따라서 탄산염암은 이 지역의 주변성작용 이후에 관입한 것으로 보인다. 탄산염

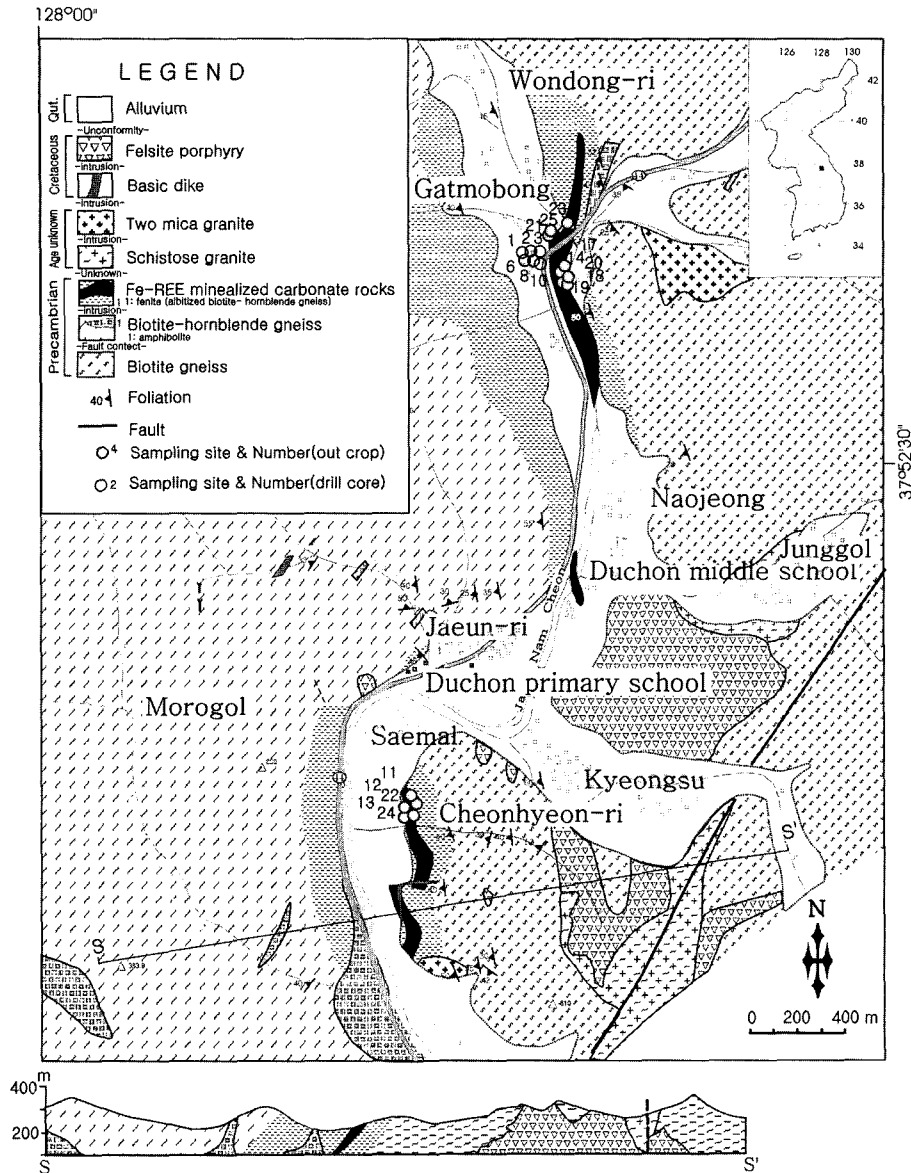


Fig. 1. Geological map and sampling locations of the Hongcheon Fe-REE deposits

암체는 주 구성광물이 안케라이트, 자철석, 능철석, 마그네사이트, 스트론티아나이트 등이며 부 구성광물은 모나자이트, 휘구소나이트, 콜롬바이트, 인회석, 금운모, 중정석, 황철석, 황동석 석영 등이다. 이들 암체 주변에는 알바이트와 작용을 받은 편마암의 변질대인 페나이트(fenite)가 대상으로 분포하고 있다. 페나이트의 주 구성광물은 재결정된 알바이트와 Na-엠펜볼이며 페나이트 중에는 변질광물인 견운모와 적철석, 이차 광

물인 방해석 석영 등이 관찰된다. 광물조직과 화학성분(Table 1)을 요약하면 아래와 같다.

탄산염광물

탄산염광물은 대부분 안케라이트(ankerite), 능철석(siderite), 마그네사이트(magnesite), 스트론티아나이트(strontianite) 이다. 안케라이트는 철-희토류광상의 주 구성광물로서 주로 자철석과 연정을 이루며 다른 탄산

Table 1. Representative microprobe analyses of minerals from the Hongcheon Fe-REE deposit

Minerals	monazite		Mn-columbite		Fe-columbite		fergusonite	
	1	2	5	6	12	13	1	2
Nb ₂ O ₅	-	-	79.621	81.026	79.542	79.505	44.636	44.407
Ta ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	0.000	0.000
FeO	-	-	5.230	4.532	11.653	15.376	0.000	0.000
CaO	0.03	0.04	-	-	-	-	0.828	0.893
MnO	-	-	12.066	12.159	6.967	4.061	0.000	0.000
TiO ₂	-	-	1.091	0.122	0.400	0.369	0.000	0.070
MgO	-	-	2.189	2.275	1.608	0.889	0.000	0.000
P ₂ O ₅	27.39	27.44	-	-	-	-	0.034	0.037
ThO ₂	0.19	0.01	-	-	-	-	4.754	5.333
La ₂ O ₃	22.09	23.05	-	-	-	-	5.885	5.194
Ce ₂ O ₃	34.72	35.81	-	-	-	-	22.234	20.898
Pr ₂ O ₃	10.06	6.84	-	-	-	-	3.095	3.209
Nd ₂ O ₃	2.21	2.77	-	-	-	-	12.122	13.236
Sm ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	1.875	1.986
Eu ₂ O ₃	0.06	0.20	-	-	-	-	1.022	1.213
Gd ₂ O ₃	2.20	2.59	-	-	-	-	2.839	2.814
Ho ₂ O ₃	0.00	0.00	-	-	-	-	-	-
Er ₂ O ₃	0.13	0.43	-	-	-	-	-	-
Tm ₂ O ₃	0.00	0.20	-	-	-	-	-	-
Yb ₂ O ₃	0.07	0.09	-	-	-	-	-	-
Lu ₂ O ₃	0.11	0.31	-	-	-	-	-	-
Total	99.25	99.78	100.197	100.114	100.17	100.200	99.324	99.290
	16 oxygen basis				66 oxygen basis			
Nd	-	-	21.927	22.412	22.082	22.203	16.814	16.753
Ta	-	-	-	-	-	-	0.000	0.000
Fe	-	-	2.664	2.319	5.984	7.943	0.000	0.000
Ca	-	-	-	-	-	-	0.740	0.798
Mn	-	-	6.226	6.301	3.624	2.125	0.000	0.000
Ti	-	-	0.500	0.056	0.185	0.171	0.000	0.044
Mg	-	-	1.988	2.075	1.473	0.819	0.000	0.000
P	-	-	-	-	-	-	0.024	0.026
Th	-	-	-	-	-	-	0.901	1.013
La	1.340	1.393	-	-	-	-	1.819	1.608
Ce	2.090	2.149	-	-	-	-	6.783	6.385
Pr	0.603	0.409	-	-	-	-	0.940	0.976
Nd	0.130	0.162	-	-	-	-	3.607	3.945
Sm	-	-	-	-	-	-	0.538	0.571
Eu	0.003	0.011	-	-	-	-	0.291	0.346
Gd	0.120	0.141	-	-	-	-	0.784	0.778
Ho	0.000	0.000	-	-	-	-	-	-
Er	0.007	0.022	-	-	-	-	-	-
Tm	0.000	0.010	-	-	-	-	-	-
Yb	0.004	0.005	-	-	-	-	-	-
Lu	0.005	0.015	-	-	-	-	-	-
P	3.812	3.808	-	-	-	-	-	-

Table 1. Continued

Minerals.	Na-amphibole		aegirineaugite		phlogopite		ankerite		Fermagnesite		siderite	strontianite	magnetite	
	8	9	1	2	33	34	2	3	4	5	56	1	3	
SiO ₂	49.649	51.392	52.66	52.81	39.868	39.712	-	-	-	-	-	-	-	0.03
TiO ₂	0.327	0.163	0.04	0.07	0.093	0.100	-	-	-	-	-	-	-	0.02
Al ₂ O ₃	4.470	3.989	2.13	2.27	12.803	12.739	-	-	-	-	-	-	-	0.16
FeO	17.468	16.644	-	-	9.534	10.292	3.49	4.47	27.38	23.23	2.71	0.02	0.00	30.93
Fe ₂ O ₃	-	-	25.94	24.69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68.39
MnO	1.118	1.023	0.84	0.92	0.492	0.515	6.76	9.25	1.14	1.11	47.60	0.00	0.00	0.00
MgO	12.140	12.795	3.45	3.56	20.563	20.530	15.70	12.91	28.36	28.47	6.75	0.00	0.00	0.01
CaO	3.445	1.655	4.86	5.32	0.056	0.017	27.02	25.86	0.12	0.06	3.32	4.84	1.25	0.00
Na ₂ O	6.980	8.411	10.33	10.23	0.789	0.592	-	-	-	-	-	-	-	-
K ₂ O	0.573	0.664	0.02	0.00	7.838	8.238	-	-	-	-	-	-	-	-
SrO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO ₂	-	-	-	-	-	-	44.52	42.72	43.47	45.81	40.80	31.21	30.41	68.66
Total	96.174	96.741	100.3	99.9	92.041	92.739	97.49	95.21	100.47	96.68	101.18	99.99	100.32	99.54
	23 dixigen bases		6 oxigen bases		22 oxigen bases		6 oxigen bases		6 oxigen bases		ilmenite bases			
Si	7.831	7.994	2.115	2.117	5.951	5.920	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	0.831	0.731	0.101	0.107	2.252	2.238	-	-	-	-	-	-	-	-
Ti	0.039	0.019	0.001	0.002	0.011	0.011	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	2.304	2.165	0.769	0.731	1.190	1.283	0.10	0.13	0.03	0.62	1.43	-	-	-
Mg	2.855	2.968	0.206	0.213	4.576	4.563	0.77	0.66	1.37	1.35	0.36	0.00	0.00	-
Mn	0.149	0.135	0.029	0.031	0.062	0.065	0.19	0.27	0.74	0.03	0.08	0.00	0.00	-
Na	2.135	2.536	0.805	0.795	0.228	0.171	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0.582	0.276	0.209	0.228	0.009	0.003	0.95	0.95	0.00	0.00	0.13	0.24	0.06	-
K	0.115	0.132	0.001	0.000	1.492	1.567	-	-	-	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-	-	2.00	2.00	1.92	1.99	2.00	2.01	2.01	-
Sr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.75	1.93	-

염광물과 함께 기질부의 대부분을 형성한다. 안케라이트 입자의 크기는 세립에서 조립까지 다양하며 탄산염 광물 중에서 능철석과 함께 가장 많은 양을 차지한다. Fe 값에서 $Fe/(Fe+Mg+Mn)$ 비는 0.1-0.2를 나타낸다. 능철석은 안케라이트와 함께 주요 탄산염광물로 자형의 능면체가 확인되기도 하나 대부분 다른 탄산염광물들과 균집을 이루고 $Fe/(Fe+Mg+Ca)$ 값은 0.70 정도이다. 마그네사이트는 일반적으로 유백색을 나타내며 $Fe/Fe+Mg$ 값이 0.20-0.35를 보이는 Fe-마그네사이트이다. 현미경하에서 스트론티아나이트를 제외하고 다른 탄산염광물들은 서로 구별이 어려워 대부분 전자현미경 분석 하에서 확인된다. 스트론티아나이트는 Sr의 광석광물이며 탄산염광물 중의 하나로 앞서 언급한 안케라이트, 능철석 등과 주종을 이룬다. 연한 분홍색을 띠며 대상으로 발달하고 주로 안케라이트, 모나사이트, 인회석 등과 균집을 이루며, 모나사이트와 함께 밀베카이트 형태의 연정을 이루는 경우가 많다. 이러한 조직특성은 탄산염광물들이 모나사이트와 동시에 형성된 마그마임을 나타낸다. Sr 값의 $Sr/Sr+Ca$ 은 0.84-0.98로서 미량의 Ca 성분이 Sr을 치환하고 있음을 알 수 있다. 방해석은 대부분 이차광물로 석영과 함께 세맥을 형성하거나 엠포볼류의 변질에 의한 이차광물로 주로 페나이트에서 산출되며 순수한 성분의 방해석들이다.

산화광물

산화광물은 자철석(magnetite), 적철석(hematite), 마타이트(martite), 콜럼바이트(columbite), 휘구소나이트(fergusonite) 등이다. 자철석은 자형 내지 반자형으로 광염 상태로 산출되며 전체적으로 대상이고 부분적으로 농집되어 괴상의 철광체(40~50 wt %)를 형성한다. 입자 크기는 2~3 mm이며 신장성이나 방향성을 나타내지는 않는다. 광체에서 평균 20~30 vol% 모달 값을 보이거나 부분적으로 1~2 vol% 미만인 곳도 있다. 자철석 광물 입자들은 예외 없이 미세균열이 발달하고 간혹 안케라이트에 의한 용식경계를 이루기도 한다. Ti 성분이 거의 없는(0.02 wt%) 자철석으로서 결정분화 과정 중 보다 말기의 저온에서 형성된 것으로 알려져 있다(Gaspar & Wyllie 1983). 균열부분에는 기질부의 탄산염 광물로 충전되며 간혹 황철석으로 채우기도 한다.

적철석은 주로 자철석 입자들의 균열을 따라 국부적으로 교대되어 매우 적은 양으로 나타나거나 때로는 마타이트 형태로 자철석광물입자를 교대하여 균집을 이루며 산출되기도 한다. 콜럼바이트는 자철석, 휘구소나이트 등과 연정을 이루고 경하에서 입상으로 적색-적갈색을 띠며 부분적으로 중심부가 불투명하게도 보

인다. 벽개가 발달하기도 하며 크기는 0.01~1.0 mm 이고 휘구소나이트에 의해 교대되기도 한다. 콜럼바이트와 휘구소나이트에는 미세균열이 없다. 적색부분은 Mn 함량이 높은 Mn-콜럼바이트로서 분자식은 $(Mn_{0.57}Fe_{0.24}Mg_{0.19})Nb_2O_6$ 이며 불투명한 부분은 Fe-콜럼바이트로 분자식은 $(Fe_{0.82}Mn_{0.15}Mg_{0.03})Nb_2O_6$ 이다. 휘구소나이트는 입상으로 현미경하에서 오렌지색을 띤다. 크기는 0.1~0.5 mm이고 콜럼바이트를 교대하여 콜럼바이트 잔존체를 포획하기도하고 때로는 자철석을 교대할 때도 있다. 화학성분은 $(REE_{0.90}Ca_{0.05}Th_{0.05})NbO_4$ 이며 탄탈륨은 함유하지 않는다. Fe-콜럼바이트가 휘구소나이트 입자 외곽에 검은테 형태로 나타나기도 한다.

인산염광물

인산염광물은 주로 모나사이트와 인회석이다. 모나사이트는 중요한 희토류 광석광물로서 안케라이트, 능철석, 스트론티아나이트 등의 탄산염광물과 밀접하게 연정으로 나타난다. 입자크기는 0.02~2 mm까지 다양하며 파쇄되어 균열이 발달된 것과 균열이 없는 미립질의 두 종류가 같이 산출된다. 스트론티아나이트와 밀베카이트 연정구조를 형성하며 2 mm에 가까운 큰 모나사이트 입자가 탄산염광물들에 둘러싸여 용식된 것도 관찰된다. 이와 같은 조직특성을 보면 모나사이트와 탄산염광물과는 동일한 마그마의 안정된 온도에서 형성된 것으로 보인다. 모나사이트에 함유되어 있는 희토류원소 중에 Ce, La, Pr 순으로 함량이 높고 Nd, Gd도 소량 나타난다(Table 1). Th의 함량은 거의 없거나 낮다(<0.17 wt%). Ce값의 $Ce/(Ce+La+Pr+Nd+Gd)$ 의 비는 0.49, La는 0.31, Pr는 0.14, Nd는 0.03, Gd는 0.03의 값을 보인다. 인회석은 자철석, 안케라이트, 스트론티아나이트 등과 집합체를 이루며 1 mm 내외의 조립질의 타형으로 대부분이 변질되어 있다. 미립의 포획물을 함유하여 포이키리틱 조직을 띤다.

규산염광물

규산염광물은 Na-엠포볼, 아지린-휘석, 액마이트(acmite), 금운모, 석영 등이다. Na-엠포볼은 탄산염암 주변에 발달하는 페나이트의 주 구성광물로 알바이트와 연정을 이루거나 아지린-휘석과 함께 균집을 이룬다. 지표에는 북광체를 가로지르는 하상에서 조립질 파이리볼(pyribole)로 산출된다. 화학성분은 엠포볼그룹 중 아페드소나이트(arfvedsonite)에 속한다. $Na/(Na+Ca+K)$ 값은 0.75이며 $Mg/(Mg+Fe+Mn)$ 는 0.54~0.80이고 대표적인 분자식은 $(Na_{0.75}Ca_{0.18}K_{0.06})_3(Mg_{0.80-0.54}Fe_{0.18-0.43}Mn_{0.02-0.03})Si_8O_{22}(OH)_2$ 이다. 아페드소나이트는 망상의 탄

Table 2. Major element compositions(wt%) of whole rock samples from the study area

No.	1	2	3	6	8	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SiO ₂	8.93	8.91	7.39	11.94	3.64	12.73	5.18	6.43	5.50	9.44	8.97	1.74	2.52	2.97	5.20	13.10	6.97	3.74	10.05
Al ₂ O ₃	1.74	1.37	0.84	0.62	0.65	1.84	0.42	1.58	0.69	1.51	2.61	0.49	0.60	0.70	0.39	0.70	1.05	0.66	0.83
Fe ₂ O ₃	45.89	31.02	42.67	31.11	37.01	29.94	34.64	25.56	4.11	17.73	25.63	42.90	36.63	31.77	28.67	6.29	13.05	5.07	15.60
MnO	3.68	2.31	3.53	1.99	3.14	1.81	3.50	3.35	1.41	1.00	2.42	2.68	3.02	2.65	2.04	1.01	1.44	1.62	1.04
MgO	7.42	8.18	7.35	4.05	5.42	5.85	9.59	9.60	1.92	6.24	5.91	6.49	8.52	8.33	8.60	5.43	6.11	2.85	6.24
CaO	9.67	13.55	11.43	8.93	12.79	12.36	15.69	17.97	6.85	19.56	10.08	17.61	16.08	17.70	17.88	7.31	15.84	7.27	19.08
Na ₂ O	0.15	0.42	0.11	0.14 ^F	0.12	0.99	0.08	0.09	0.12	0.75	0.68	0.17	0.08	0.09	0.06	0.02	0.15	0.08	0.40
K ₂ O	0.11	0.17	0.01	0.12	0.07	0.32	0.06	0.43	0.09	0.07	0.46	0.13	0.09	0.15	0.08	-0.01	0.22	0.02	0.04
TiO ₂	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00
P ₂ O ₅	1.03	1.04	0.84	5.60	5.68	1.65	0.77	0.53	9.31	4.35	5.57	7.99	0.83	3.07	2.14	10.16	11.30	8.96	5.13
StrO	0.31	0.07	0.16	0.27	1.42	1.62	0.06	0.05	25.83	0.04	3.67	0.20	0.10	0.55	1.24	2.29	1.17	27.84	0.65
BaO	1.65	1.00	2.23	0.83	5.01	4.71	1.79	1.03	2.69	0.62	9.53	1.69	1.55	1.49	0.49	11.98	0.10	0.79	0.02
LOI	16.82	25.17	18.58	15.49	15.20	17.73	25.20	29.91	16.65	23.68	15.66	15.09	23.29	24.38	25.18	14.50	19.56	19.60	25.36
Total	97.42	93.22	95.16	81.11	90.17	91.58	97.00	96.53	75.17	84.99	91.20	97.20	93.31	93.85	91.97	72.81	76.97	78.52	84.43

*Negative values equal not detected at that lower limit.

산염암맥 관입접촉부에서 아지린회석으로부터 이차적으로 생성되기도 한다. 아지린회석은 조립질 섬유상의 조직을 보이며 담황록색으로 주로 Na-엠피볼과 집합체를 이루며 알바이트와 자철석의 작은 입자를 함유하기도 한다. 반면 Na-엠피볼은 흑색-암록색을 나타낸다. 적갈색의 순수한 액마이트도 관찰이 되며 액마이트 주변은 Na-엠피볼로 교대되기도 하고 중심부는 철성분의 부화로 인한 불투명형태와 이차로 변질된 탄산염광물이 관찰된다. 아지린회석의 화학성분 중에 Na/(Na+Ca) 값은 0.8, Fe/(Fe+Mg) 값은 0.8의 이고 대표적인 분자식은 $(Na_{0.8}Ca_{0.2})(Fe_{0.8}Mg_{0.2})SiO_6$ 이다. 암록색을 띠는 금운모는 경하에서는 백운모의 특징과 비슷하나 화학성분은 Al 함량이 높고 Mg/(Mg+Fe) 값이 0.74 정도이며 대표적인 분자식은 $(K_{0.16}Al_{0.12}Na_{0.02})(Mg_{0.74}Fe_{0.26})Si_6Al_2O_{20}(OH,F)_2$ 이다.

황화 및 황산염광물

황철석은 광화대 및 변질대 전반에 걸쳐 광염상으로 나타나며 황동석은 미립의 타형으로 소량 산출된다. 섬아연석, 휘수연석도 미립으로 소량 산출된다. 중정석은 미량으로 산출되나 시료에 따라 농집된 곳도 있고 스트론티아나이트와 연정을 이루거나 작은 광물입자가 모나자이트에 포획되기도 한다.

암석화학

성인고찰을 위하여 광화대의 시추코어 및 노두에서 채취한 대표적 광석시료(탄산염암 전암시료)들의 주성

분, 미량원소, 희토류원소 및 안정동위원소 분석을 실시하여 암석화학적 특징과 함께 Woolley와 Kempe (1989)가 제시한 철질카보나타이트의 평균치와 비교 검토하였다(Table 3, 5, 7).

주성분

분석은 캐나다 Activation Lab.의 WRA-ICP에 의한 것이며 결과는 Table 2와 같다. SiO_2 는 1.74 wt%~13.10 wt%사이의 값을 보이며, 후기 석영세맥의 영향으로 철질카보나타이트 평균치인 4.7 wt%보다 높은 값을 보인다. 주성분의 특징은 Ca를 제외한 Si, Al, Fe, Mn, P, Ba, Sr 등 주원소 대부분이 철질카보나타이트의 평균치 보다 높다(Table 3). Na, K, Ti 성분들은 본 시료와 철질카보나타이트 둘 다 낮은 값을 보인다. 하커도에서 보면 SiO_2 증가에 따른 Ti, Al의 증가, Ca, Fe, Mg, Mn, P의 감소가 어느 정도 관찰된다(Fig. 2).

구성광물과 주원소와의 관계를 보면 Fe의 높은 값은 자철석, 석기질의 안케라이트와 능철석에, P는 모나자이트와 인회석에, Sr은 스트론티아나이트에 기인한다. 낮은 Ca함량은 방해석 출현보다는 Fe을 주로 함유하는 탄산염광물들이 많기 때문이다. MnO, MgO 값은 1.0~3.68 wt%, 1.92~9.60 wt% 범위를 나타내며 평균 값은 2.29 wt%, 6.53 wt%로써 철질 카보나타이트 값과 비슷하다. 이들 성분은 능망간석, 마그네사이트, 안케라이트 및 콜럼바이트의 존재에 기인한다. SrO, BaO 성분은 높은 편으로 0.04~25.83 wt%, 0.02~11.98 wt%이며 평균값은 각각 3.56 wt%, 2.59 wt%이다. 철질카보나타이트의 평균치인 0.88 wt%, 0.80 wt%보다 크며 특

Table 3. Comparison of average major elements (%) compositions for this studied rocks and Ferro-carbonatites

	Hongcheon carbonate rock			Ferro-carbonatite (Woolley and Kempe, 1989)		
	Average	No.	Range	Average	No.	Range
SiO_2	7.12	19	1.74~13.10	4.70	57	0.36~9.0
TiO_2	0.01	19	0.00~0.04	0.42	57	0.0~2.30
Al_2O_3	1.05	19	0.42~2.61	1.46	53	0.01~5.60
$Fe_2O_3(T)$	26.59	19	4.11~45.89	7.44(Fe_2O_3) 5.28(FeO)	50 50	0.46~17.84 0.00~20.28
MnO	2.29	19	1.00~3.68	1.65	57	0.23~5.53
MgO	6.53	19	1.92~9.6	6.05	58	0.10~14.50
CaO	13.56	19	6.85~19.56	32.77	58	9.20~46.43
Na_2O	0.25	19	0.02~0.99	0.39	46	0.00~1.52
K_2O	0.14	19	0.01~0.46	0.39	51	0.0~2.80
P_2O_5	4.52	19	0.21~11.30	1.97	54	0.0~11.56
BaO	2.59	19	0.02~11.98	0.80	31	0.02~2.48
SrO	3.56	19	0.04~25.83	0.88	34	0.01~5.95

No.: Number of analyses

Table 4. Trace element concentrations (ppm) of whole samples from studied area

No.	1	2	3	6	8	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21	22	23	24	25
V	17	14	12	16	6	33	9	6	7	33	-5	-5	12	-5	8	22	9	6	32
Cr	25	21	-5	88	27	-5	6	35	92	-5	-5	24	-	-	-20	-20	-20	-20	37
Co	41	33	42	-1	17	30	19	27	10	16	26	27	-	-	20	4	6	2	16
Ni	52	45	46	101	25	34	-20	28	-20	41	20	-20	30	30	24	-20	49	-20	61
Cu	47	27	38	86	47	35	15	28	15	36	18	-10	38	26	-10	15	18	10	27
Zn	171	105	130	67	130	122	169	95	49	44	105	141	160	103	71	36	85	-30	46
Ga	20	22	24	93	46	41	9	10	146	66	41	9	17	18	17	103	106	84	56
Ge	3.0	3.0	3.0	12.0	6.0	6.0	2.0	1.0	20.0	8.0	5.0	1.0	2.0	3.0	3	16	17	11	9
Be	-1	1	1	4	2	2	-1	1	6	3	2	-1	-1	1	1	9	9	7	4
Au	-25	-61	50	-209	-63	-85	7	9	-660	-114	-47	-11	-33	-53	-24	-143	-700	-700	-84
As	-7.6	73.5	-8	-15	-15.1	-19	8.1	107	46.8	-14.8	-5	-8.1	-	-	27	44	49	40	56
Rb	4	8	1	6	4	12	4	31	5	4	31	7	8	10	4	-2	11	-2	2
Y	11.0	17.7	10.9	52.5	52.9	22.1	13.3	18.5	85.1	56.6	41.1	44.9	10.8	25.5	19	53	91	56	57
Zr	4	19	4	14	6	8	5	6	19	15	9	6	-1	6	-5	6	-5	7	-5
Nb	28	17	22	90	606	129	47.7	19.5	22.1	16.0	8.5	91	17	288	207	51	53	41	9
Mo	175	63	9	18	178	9	138	700	23	370	801	151	195	209	148	10	80	5	58
Ag	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5
In	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	-0.1	0.2	-0.1	0.1	0.2	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
Sn	4	3	3	-1	7	8	3	1	3	-1	1	1	1	1	-1	5	-1	4	-1
Sb	-0.5	-0.5	-0.5	-1.5	-1.8	-0.2	-0.2	-2.7	1.4	-1.8	-0.2	-0.2	-	-	-0.5	0.9	0.5	1.4	-0.5
Sc	8	9	7	26	13	23	4	6	41	26	11	3	5	6	12	72	79	61	37
Cs	0.9	0.3	0.3	0.2	0.2	0.6	0.3	2.5	0.4	0.2	3.1	1.5	0.5	2.1	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
Hf	0	0	0	1	1	0.8	0.2	0.2	1.9	0.8	0.9	0.6	0.1	0.4	0.3	2.1	0.8	1.1	0.5
Ta	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	1.0	-0.1	0.1	-0.1
W	-1	1	-1	1	2	0.8	-0.5	0.7	0.5	0.5	1.4	0.9	0.7	1.2	-1.0	6.5	-1.0	-1.0	-1.0
Tl	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	-0.10	0.10	0.10	-0.10	-0.10	0.10	-0.10	-0.10	-0.10	0.11	-0.10
Pb	57	34	77	215	141	87	19	12	89	14	81	47	27	53	-5	11	162	137	19
Bi	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.4	0.8	-0.4	2.7	-0.4
U	0.10	0.12	0.09	0.81	0.25	0.29	0.03	0.06	0.69	0.60	0.30	0.11	0.16	0.13	0.5	4.1	4.3	1.4	0.7
Th	245	234	293	1,480	970	1,050	27.9	10.8	727	399	223	85.2	54.5	121	72.9	768	655	643	395

*Negative values equal not detected at that lower limit.

Table 5. Average trace elements concentrations (ppm) of this studied rocks and Ferro-carbonatites

	Hongcheon carbonate rock			Ferrocarbonatite (Woolley and Kempe 1989)		
	Average	No.	Range	Average	No.	Range
*Au (ppb)	75	50	7~300	12	2	10~15
Ag	-	-	-	3.4	2	3.4~3.5
*As	34	42	8~157	-	-	-
Co	20.9	16	>1~42	26	7	11~54
Cr	39.4	9	6~88	62	8	15~135
Cs	0.9	14	0.2~3.1	0.6	1	-
Cu	31	17	10~86	16	14	4~45
Ga	48.8	19	9~146	12	1	-
Mo	176	19	5~801	71	3	26~94
Nb	93	19	9~606	1292	17	10~5033
Ni	42	14	>20~101	26	7	10~63
Sc	23	19	3~79	10	2	9~14
V	15	16	6~33	191	16	56~340
Y	39	19	11~85	204	9	28~535
Zn	97	18	36~171	606	9	35~1800
Zr	9	15	4~19	127	13	0~900
U	0.8	19	0.1~4.3	7.2	16	1~20
Th	445	19	10.8~1480	276	13	100~723

No.=Number of analyses

히 남부 광체의 분홍색을 띄는 시료에서 높게 나타나는데 이는 Sr, Ba성분의 주구성광물인 스트론티아나이트와 중정석이 많이 나타나기 때문이다. 위에서 언급한 바와 같이 주성분은 구성광물의 함량과 밀접한 관계를 나타내고 있다.

Le Bas(1981)의 CMF(CaO-MgO-FeO^T+MnO) 및 Woolley와 Kempe(1989) ACF(alkali-CaO-FeO^T)의 삼각도에서 보면 본 연구대상 암체는 카보나타이트 중에서 일반적인 철질 카보나타이트에 비해 Fe성분이 보다 높은 쪽으로 치우쳐 나타난다(Fig. 3, 4).

미량원소

앞서 분석한 주성분 분석시료에 대한 희토류 및 미량원소 분석을 캐나다 Activation Lab.의 ICP-MS(Perkin Elmer SCIEX ELAN 6000)에 의해 실시했고, 결과는 Table 4와 같다. 철질 카보나타이트 평균치와 비교하면 Nb, Zr, Zn이 매우 낮게 나타난다(Table 5).

미량원소들의 특징을 살펴보면 Co, Cr, Cs 평균값(21, 39, 0.9 ppm)들은 철질 카보나타이트의 값들과 비슷하며 Cu 평균값은 31 ppm으로 철질 카보나타이트보다는 2배가량 높다. 일반적으로 카보나타이트류는 이보다 낮다. Ga는 평균 46 ppm, 최고치는 146 ppm으로

홍천이 높은 값을 보여 통상 알카리암에서 높게 나타나는 특징과 같다. Ga 및 Ge은 통계처리(25개 시료)결과 REE 및 P와 밀접한 상관관계(Ga와 TREE의 R=0.98, Ge와 TREE의 R=0.98)를 나타내므로 모나자이트에 함유된 것으로 보인다.

Nb, Zr의 평균값은 각 93 ppm, 9 ppm으로 철질 카보나타이트의 평균치인 1,292 ppm, 127 ppm보다 매우 낮지만 Nb의 최고치는 606 ppm으로 시료에 따른 편중을 보여주고 있다. 이는 Nb을 콜럼바이트 및 휘구소나이트가 함유하는 주요광물이기 때문에 이들의 출현유무에 따라 Nb성분 차이가 심하게 나타난다.

SiO₂ 증가에 따른 미량원소들의 변화는 분산이 심하여 뚜렷한 변화경향을 몇 개의 원소를 제외하고는 인지하기가 힘들다(Fig. 5). V, Ni은 뚜렷한 증가를, U, Rb는 미약한 증가, Ba, Sr은 미약한 감소를, 그 외의 원소들은 분산되거나 일정한 함량을 보여 변화경향을 알 수 없다. 특히 분화를 지시하는 Rb, Ba, Sr들은 미약한 변화를 보이기 때문에 정확한 분화경향을 나타내고 있지는 못하다. 화성기원 암에서 V, Ni은 SiO₂ 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는데 반하여 본 암에서는 증가를 나타낸다. 이는 카보나타이트의 구성광물들과 각 원소들의 분배계수가 아직까지는 정확한 실험

Table 6. Rare earth element concentrations (ppm) of whole rock samples from the studied area

No.	1	2	3	6	8	10	11	12	13	14	17	18	19	20	21	22	23	24	25
La	5,140	4,770	6,820	32,300	14,700	12,800	1,420	1,530	52,100	24,400	14,200	1,490	4,680	4,820	5,600	48,700	46,000	39,800	23,500
Ce	7,460	6,750	9,960	49,000	23,200	20,700	2,670	2,760	83,600	38,000	21,300	3,050	7,370	7,860	9,120	75,300	72,500	63,500	37,100
Pr	583	573	790	4,040	1,960	1,710	214	217	7,130	3,140	1,730	265	634	688	829	6,360	6,410	5,720	3,240
Nd	1,280	1,370	1,720	10,500	5,390	4,580	654	655	18,800	8,290	4,450	916	1,450	1,570	2,340	16,500	17,700	16,300	8,760
Sm	88	97	116	654	445	319	53	55	1,080	459	234	99	94	112	149	848	966	945	509
Eu	18	21	23	131	99	66	12	11	196	91	44	24	17	22	26	149	170	169	96
Gd	96	98	130	603	346	278	43	44	1,200	461	263	60	97	107	71	421	390	427	266
Tb	5	6	7	36	22	17	3	3	62	28	16	5	6	7	3	27	36	24	15
Dy	6.31	8.38	7.09	37.7	35.8	16.8	5.60	6.56	62.2	33.4	18.3	15.7	5.59	10.5	7.0	30.6	50.1	35.2	27.6
Ho	0.70	1.00	0.70	3.90	3.70	1.60	0.70	0.90	6.00	3.50	2.20	2.10	0.60	1.30	0.7	1.9	3.5	2.9	2.6
Er	1.48	1.88	1.55	7.75	6.71	3.68	1.50	2.27	12.9	7.50	4.23	3.62	1.63	2.84	1.6	4.8	6.3	6.5	4.5
Tm	0.13	0.20	0.15	0.66	0.68	0.33	0.13	0.24	1.15	0.59	0.38	0.38	0.15	0.25	0.17	0.43	0.68	0.51	0.39
Yb	0.70	1.00	0.80	3.60	3.20	1.90	0.80	1.10	6.00	3.00	2.00	1.80	1.00	1.40	1.0	3.0	3.6	3.3	1.9
Lu	0.09	0.12	0.10	0.41	0.40	0.21	0.10	0.17	0.57	0.32	0.20	0.25	0.11	0.15	0.13	0.29	0.38	0.33	0.21
Total	14,680	13,697	19,577	97,318	46,213	40,494	5,078	5,286	164,257	74,918	42,264	5,932	14,357	15,203	18,149	148,346	144,237	126,934	73,524
(La/Lu) _{cn}	5,711	3,975	6,820	7,878	3,675	6,095	1,420	900	9,140	7,625	7,100	596	4,255	3,213	4,314	16,797	12,176	11,897	10,987
(Eu/Sm)	0.21	0.22	0.20	0.20	0.22	0.21	0.22	0.20	0.18	0.20	0.19	0.24	0.18	0.20	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19
U	0.10	0.12	0.09	0.81	0.25	0.29	0.03	0.06	0.7	0.6	0.3	0.1	0.2	0.13	0.45	4.09	4.29	1.44	0.71
Th	245.0	234.0	293	1,480	970	1,050.0	27.9	11	727.0	399	223	85	55	121	72.93	767.91	655.14	642.74	395.32
U/Th	0.0004	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0003	0.0011	0.0056	0.0009	0.0015	0.0013	0.0013	0.0029	0.0011	0.0062	0.0053	0.0065	0.0022	0.0018
TREE/Th	59.92	58.54	66.82	65.76	47.64	38.57	182.01	489.47	225.94	187.76	189.52	69.63	263.44	125.64	248.84	193.18	220.16	197.49	185.98

Table 7. Averages rare earth element concentrations (ppm) of this studied rocks and Ferro-carbonatite

	Hongcheon carbonate rock			Ferrocarbonatite (Woolley and Kempe 1989)		
	Average	No.	Range	Average	No.	Range
La	18146	19	1420~52100	2666	15	95~16883
Ce	28484	19	2670~83600	5125	8	1091~19457
Pr	2433	19	214~7130	550	4	141~1324
Nd	6485	19	654~18800	1618	4	437~3430
Sm	385	19	53~1080	128	4	30~233
Eu	73	19	11~196	34	4	11~78
Gd	284	19	43~1200	130	4	31~226
Tb	17	19	3~62	16	4	4~36
Dy	22	19	6~62	52	4	11~105
Ho	2	19	0.6~6	6	4	1~9
Er	4	19	1.5~12.9	17	4	3~35
Tm	0.3	19	0.1~1.2	1.8	4	0.3~3
Yb	2.2	19	0.7~6.0	15.5	4	1~16
Lu	0.2	19	0.1~0.6	-	-	-

No.=Number of analyses

자료가 정립되지 못하고 있기는 하나 카보나타이트의 분화과정에서 형성되는 광물들과 이들 성분들의 분배 계수가 낮아 잔류용액에 농축되는 경향으로 보인다.

분화지수를 나타내는 U/Th값은 Woolley 와 Kempe (1989)에 의하면 통상 분화초기의 탄산염암에서부터 분화말기단계의 철카보나타이트로 갈수록 Th값이 증가하여 1/40에 달한다고는 하나 본 암체의 경우에는 1/10,000까지 이른다. 이는 분화에 따른 Th값의 증가도 있겠으나 홍천시료의 경우에는 본래 U값이 매우 낮은 것도 하나의 요인이라 하겠다.

희토류원소

희토류 원소의 분석결과(Table 6) 총 희토류 값은 평균 5 wt%로 이례적으로 높으며 철질카보나타이트의 평균값과 비교하면 La, Ce, Pr, Nd, Sm의 경희토류에서 매우 높은 값을 보이거나 중(重)희토류에서는 낮은 값을 보인다(Fig. 6). 카보나타이트에서는 희토류함량이 일반적인 화성암류보다 매우 높아 전 세계적으로 유명한 희토류광상들이 대부분 여기에 배태한다(Mariano, 1989).

희토류 분포를 보면 경희토류는 크게 부화되고 중희토류는 매우 결핍되어 있어 경희토류에서 중희토류로 갈수록 가파른 감소기울기를 보여 이들의 분별정도를 나타내는 지수, La/Lu는 596~16,797의 높은 값을 나타내고 있다(Fig. 6). Eu 이상 치(anomaly) 즉 Eu/Sm은 0.18-0.25로 별다른 이상을 보이지는 않는다. 따라서 철질 카보나타이트와 비교하면 경희토류에서 심한

농집을 중희토류에서는 결핍을 보이므로 본 암체는 보다 높은 분별정도를 나타낸다.

구성광물과의 관계를 보면 모나자이트가 경희토류의 주 구성 광물이다. La성분은 1,420~52,100 ppm 범위이고 평균 18,146 ppm이며 철질 카보나타이트의 평균치보다 6배정도 높은 값을 보인다. 시료 중 18, 19, 20번과 같이 자철석이 많아 Fe함량이 높은 경우에는 La성분이 낮게 나타난다. Ce도 La와 같은 함량변화를 보이는데 670~83,600 ppm의 범위에서 나타나고 철질 카보나타이트 평균치의 5배정도 높은 값이다. 전술한 시료에서 Ce를 비롯한 경희토류 값이 낮은 것은 자철석의 함량이 높은 반면 모나자이트의 함량이 낮은 것에 기인한다. 즉 광체에서 자철석함량이 높으면 상대적으로 탄산염광물로 구성된 기질부가 적어지고 따라서 여기에 존재하는 모나자이트 양이 상대적으로 적어지기 때문이다. Nd는 654~8,800 ppm의 범위를 보이고 평균값은 5,761 ppm으로 철질 카보나타이트 평균값인 1,618 ppm(Table 7) 보다 3배 정도 높은 값을 보인다. Pr의 평균치는 2,433 ppm이며 철질 카보나타이트보다 4배 정도의 값이며 214~130 ppm의 범위를 보인다. Sm, Gd, Eu들은 전술한 원소들 보다는 함량이 낮아 각각 385 ppm, 284 ppm, 73 ppm의 평균값을 보이며 La, Ce, Nd 값들이 낮은 시료에서는 이들의 함량도 낮게 나타난다. Tb에서 Lu까지 각각의 평균함량들은 0.2~17 ppm이며 철질 카보나타이트 평균값과 비교할 때 Tb는 비슷한 값을 보이거나 나머지 원소들은 낮은 값

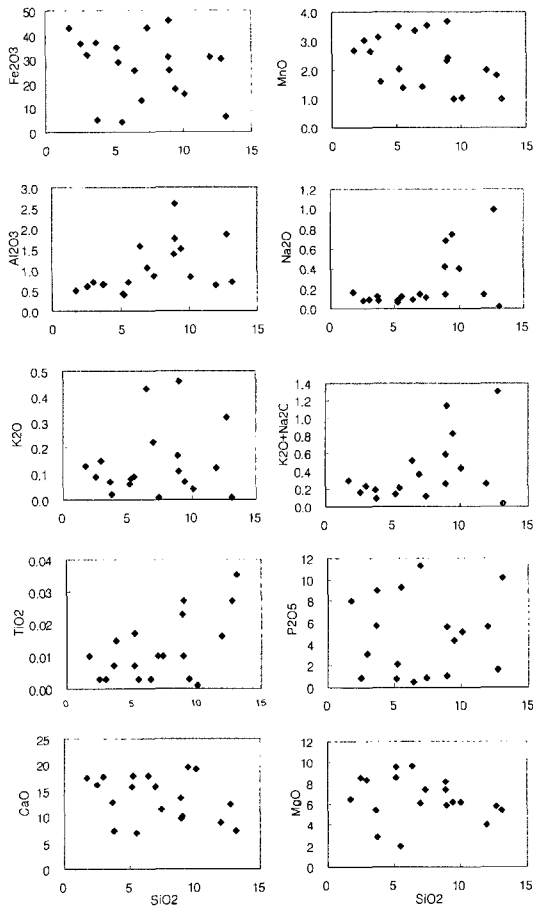


Fig. 2. Harker variation diagram of major elements vs. SiO₂ for the studied rocks.

들을 보여준다.

안정동위원소

안케라이트, 스트론티아나이트 및 전암에 대한 탄소 및 산소 동위원소 분석을 위하여 동일 시료를 한국지질자원연구원과 중국의 무한지질대학에서 각각 Gas Flow Mass(Finngan MAT 252)를 사용하여 실시하였다. 표준시료는 둘다 PDB를 사용하였으며 분석결과를 Table 8에 요약 비교해 보면 두 기관의 결과는 매우 비슷한 값을 보여 준다.

$\delta^{13}C$ 와 $\delta^{18}O$ 값은 엔케라이트에서 각각 -5.20~9.31‰, -21.30~22.07‰ 스트론티아나이트에서 -7.50‰, -229.0‰를 나타낸다. 전암시료에서는 -3.89~6.04‰, -18.05~21.40‰를 보여 주고 있다. 홍천시료 값들은 Fig. 7에서 Denies(1989)가 전세계적으로 110여개 곳

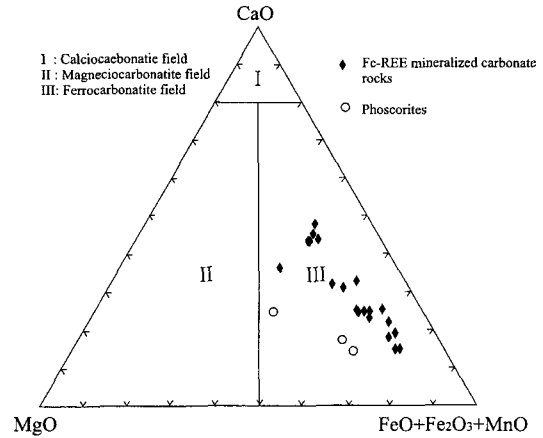


Fig. 3. Subdivision of carbonatites in the field of CaO-MgO-FeO^T+MnO diagram (Woolley and Kempe, 1989).

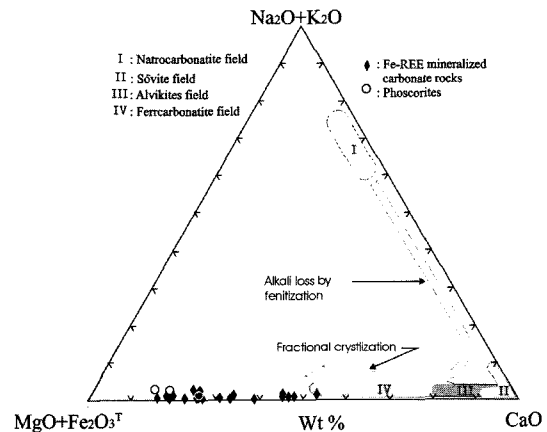


Fig. 4. Subdivision of carbonatites in the field of Na₂O+K₂O-CaO-FeO^T+MgO diagram (Le Bas, 1981).

에서 분포하는 대표적인 카보나타이트를 분석하여 제시한 전형적인 카보나타이트 영역 III에 속한다. 따라서 본 시료들의 탄산염광물 및 전암의 안정동위원소 값들은 연구대상 암체가 화성기원의 탄산염암임을 강력히 지시한다.

U/Pb 연대

본 암의 연대측정을 위하여 남부광체 시료를 60 msh 정도로 파쇄한 후 실제현미경을 사용하여 약 1g의 모나자이트를 선별하였다. 입자들의 크기는 1 mm 정도 이고 형태는 대부분이 쪼개진 면이 잘 발달하는 판상 입으로 그중 형태가 양호한 4개의 모나자이트 입자를 선택하여 VG-54 Mass를 사용하여 분석하였다(Table 9).

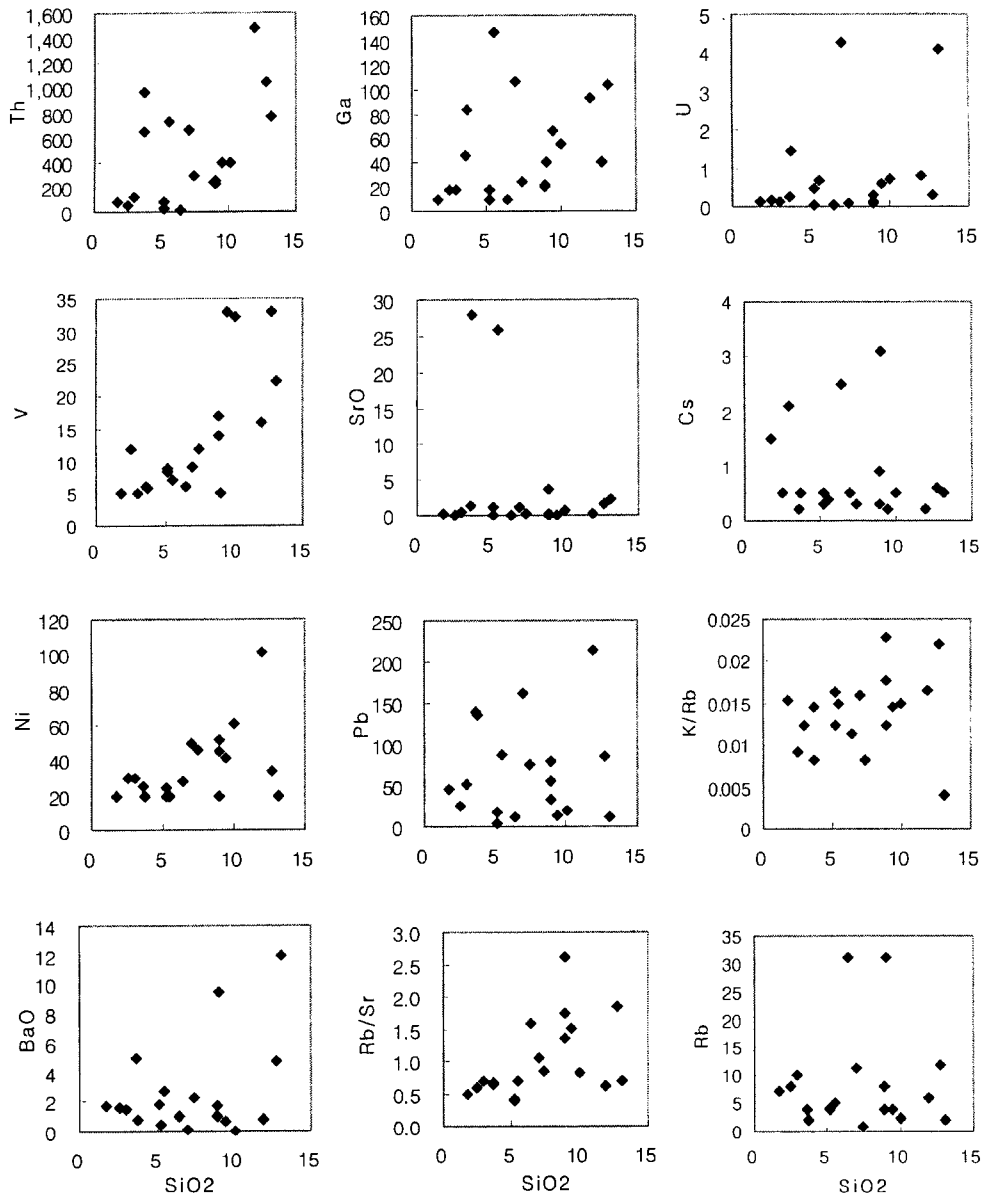


Fig. 5. Harker variation diagram of trace elements vs. SiO_2 for studied rocks.

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 는 0.125706~1.078352, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 는 0.05982~0.07050의 분포를 보이는데 이들 중 m1은 U의 손실이, m2 및 m3는 U 및 방사성 Pb의 손실을 경험한 시료로 나타나 동위원소 상태가 양호한 것으로 보이는 하나의 시료 m3를 이용하여 약 850 Ma의 원생대임을 알 수 있다(Fig 8). 그러나 이것으로 정확한 지질연대를 제시하기에는 미흡하다. 따라서 앞으로 좀 더 많은

분석자료가 필요하며 이 연대는 참고자료로 활용할 수 있는 것 같다.

토 의

홍천 철-회토류 광상을 이루는 탄산염암체(광체)의 광물 및 암석화학 연구결과를 검토하면 아래와 같다.

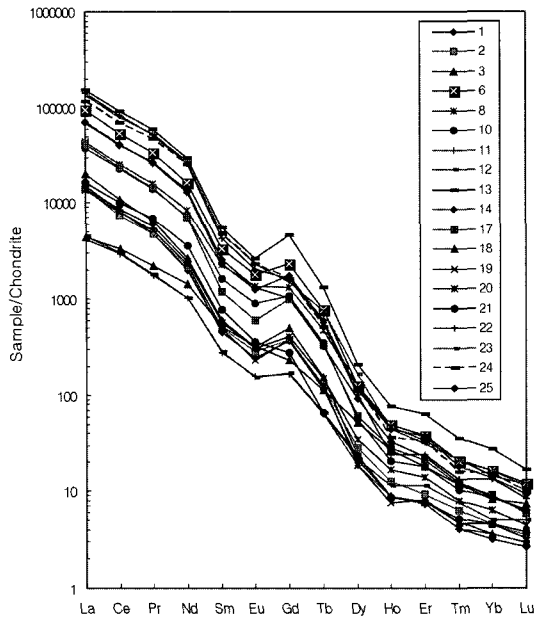


Fig. 6. Chondritic normalized REE patterns of whole rock samples from the study area.

광체의 광물조성은 다양한 탄산염광물이 기질부의 주종을 이루어 자철석과 함께 주 구성광물로 나타나고 회토류, 니오비움, 스트론튬, 바륨, 인 등을 포함하는 광물들이 부 구성광물로 되어 있다.

광체 주변부에는 알카리교대(Na)를 나타내는 순수 알바이트, 아지린회석, Na-엠펜볼(알페소나이트)로 구성된 페나이트가 대상으로 분포한다.

암석화학적 특징은 주 성분에서 Le Bas(1989)가 제시한 삼각도상에서 철질 카보나타이트보다 더욱 분화된 영역에 도시되고, 전형적인 철질 카보나타이트와 비교하면 Fe를 비롯하여 대부분의 원소는 높은 값을 보

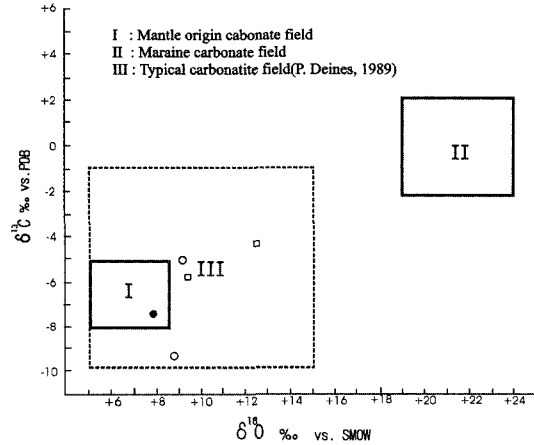


Fig. 7. Classification of carbonatites in the C-O isotope diagram of $\delta^{13}\text{C}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$

$\delta^{18}\text{O}$ ○: Ankerite, □: Whole rock, ●: Strontianite

이는 반면 Ca는 매우 낮은 값을 보이며, 구성광물의 함량과 밀접한 관계를 나타내고 있다.

SiO₂ 증가에 따른 Al, Ti의 증가, Ca, Mg, Fe, P 등의 미약한 변화경향이 인지된다. SiO₂ 함량증가에 따른 V와 Ni는 증가, Ba와 Sr은 미약한 감소, 그 외의 원소들은 분산되어 뚜렷한 변화경향의 인지가 힘들다. V와 Ni의 증가는 낮은 분배계수에 기인하는 것으로 추정된다. SiO₂ 함량증가에 따른 주원소들의 변화는 본 암체가 화성기원의 분화산물임을 의미하며, P같은 원소는 분화를 지시할 정도의 직선적인 변화는 아니지만 미약한 감소를 보인다. 일반적인 분화과정에서 SiO₂ 증가에 따른 Al, Ti 성분감소가 나타나지만 본 암체에서는 오히려 증가하는 현상이 나타나는 것은 결정분화 과정 중 이들을 함유할 수 있는 적합한 광물들이 출현하지 못하고 잔류용액에 농집된 것으로 유추된다.

회토류원소의 분포특징은 총회토류의 함량이 높으며

Table 8. Carbon and oxygen stable isotope data of carbonate minerals and whole rock(carbonate rocks) samples from the studied area

Sample No.	A			B		
	$\delta^{13}\text{C}$	δO^{18}		$\delta^{13}\text{C}$	δO^{18}	
	(‰ vs.PDB)	(‰ vs.PDB)	(‰ vs.SMOW)	(‰ vs.PDB)	(‰ vs.PDB)	(‰ vs.SMOW)
1	-5.30	-21.64	9.22	-5.2	-21.3	9.56
2	-9.31	-22.07	8.79	-9.2	-21.8	9.06
3	-7.49	-22.90	7.96	-7.5	-22.9	7.96
4	-6.04	-21.40	9.46			
5	-3.89	-18.05	12.81			

A: Data analyzed from China (中國地質大學 (武漢)) B: Data analyzed from KIGAM

1, 2 : akerite, 3: strontianite, 4, 5: whole rock

Table 9. U-Pb isotope data of monazites from the studied area

Sample Fractions	Concentration				Error-2 sigma (%)						Age (Ma)									
	Weight (μg)	U (ppm)	Pb (ppm)	Pb \odot (pg)	204Pb	206Pb	208Pb	206Pb	207Pb	235U	%err	206Pb	207Pb	238U	%err	206Pb	207Pb	235U	206Pb	207Pb
m1	4.5	0.7	36.2	83.8	19.7	26.581	1.078352	(1.53)	10.4817	(11.51)	0.07050	(10.69)	4716.0	2478.3	942.9	596				
m2	9.3	1.8	12.5	57.9	19.7	34.176	0.119032	(2.29)	0.9818	(20.45)	0.05982	(19.20)	725.0	694.5	597.2	135				
m3	9.2	3.5	56.6	83.7	20.4	123.572	0.125706	(1.33)	1.1738	(9.40)	0.06772	(8.73)	763.3	788.4	860.1	355				
m4	16.7	2.0	34.7	152.3	19.9	80.149	0.178889	(1.27)	1.7157	(15.03)	0.06956	(14.05)	1060.9	1014.4	915.4	307				

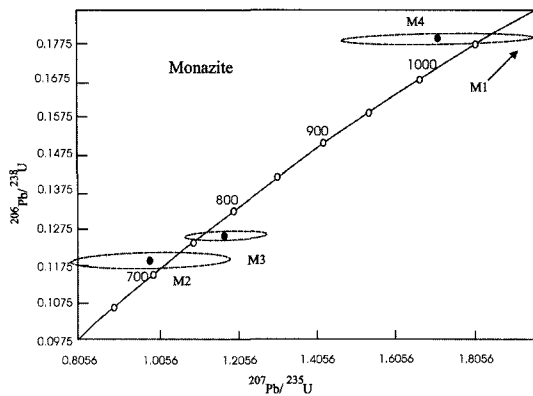


Fig. 8. Concordia diagram of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ for monazites from the study area.

(평균 5 wt%), 경희토류는 크게 부화되고 중희토류는 매우 결핍되어 있다((La/Lu)cn = 596~16,796). 또한 Eu 이상을 나타내는 Eu/Sm 값은 0.18~0.25로써 별다른 이상 값을 나타내지는 않는다. 이런 현상은 분화말기의 카보나타이트에 나타나는 특징이다.

미량원소들의 특징은 Nb, Zr, Zn 값들이 철질 카보나타이트 평균값에 비하여 매우 결핍되어 나타나고, Ga 은 평균값은 48.8 ppm이며 최고치는 146 ppm으로 높은 값을 보이며 모나자이트에 Ge와 함께 함유된 것으로 보인다. U은 낮고 Th은 높게 철질 카보나타이트에 비해 나타난다. 일반적으로 U/Th값은 분화초기에서부터 분화말기단계의 철질 카보나타이트로 갈수록 Th값이 증가하여 1/40에 달한다고는 하나 본 암체의 경우에는 1/10,000까지 이른다. 이는 분화에 따른 Th값의 증가도 있겠지만 홍천시료의 경우에는 본래 U값이 매우 낮은 것에 기인하는 것 같다.

산소 및 탄소 안정동위원소 값의 특징은 Denies (1989)가 제시한 전형적인 카보나타이트에 범주에 속한다. 따라서 연구시료의 탄산염광물 및 전암 안정동위원소 값들은 연구대상 암체가 카보나타이트임을 강력히 지시한다. 그러나 2차적인 열수변질 및 변성작용으로 탄산염광물의 동위원소는 탈가스화로 인한 C^{13} 과 O^{18} 의 동위원소 함량변화를 초래, 결핍되는 경향을 보일 수도 있다. 그러나 본 시료들은 앞에서 언급한바와 같이 본 암의 관입이전에 이 지역의 주 변성작용이 있는 것으로 추정되고 본 암체가 관입양상을 잘 나타내고 있으며, 화성기원을 시사하는 스트론티아나이트와 모나자이트의 미르메카이트형태의 연정 광물조각이 잘 관찰되고 있어 안정동위원소의 큰 변화는 없었으며, 그림에 도시된 대로 화성기원의 탄산염암으로 해석해도

Table 10. Average compositions of the phosphorite in the Sokli complex

Sample No.	P1	P2	P3
(wt%)			
SiO ₂	16.57	16.43	14.96
TiO ₂	0.98	1.84	2.27
Al ₂ O ₃	1.00	2.36	1.72
Fe ₂ O ₃	24.45	38.14	42.47
MnO	0.70	0.52	0.54
MgO	20.81	13.79	13.93
CaO	15.62	11.40	9.59
Na ₂ O	0.14	0.37	0.28
K ₂ O	0.83	2.19	2.10
P ₂ O ₅	2.60	5.33	4.11
Nb ₂ O ₅	0.012	0.578	0.888
ZrO ₂	0.348	0.266	0.146
La ₂ O ₃	0.014	0.022	0.020
Ce ₂ O ₃	0.035	0.061	0.057
SrO	0.149	0.146	0.151
BaO	0.109	0.131	0.070
LOI	15.66	6.01	6.04
(ppm)			
Sc	70	44	35
V	191	565	478
Cr	3	25	14
Co	d.l.	60	38
Ni	d.l.	37	19
Cu	d.l.	537	153
Zn	233	377	404
Ga	20	63	83
Rb	21	75	73
Sr	1258	1278	1345
Y	32	40	30
Zr	2577	1974	1080
Nb	88	3957	6250
Ba	976	1177	630
La	119	191	169
Ce	297	520	483
Eu	6	11	9
Yb	3	3	3
Ta	18	200	138
Pb	4	12	15
Th	24	391	764
U	2	120	29

좋을 것 같다.

암석화학적 연구결과는 최근 이한영 외(2002)가 암석기재학 및 광물화학 연구를 통하여 철질 카보나타이트

트일 것이 라고 하였으나 주성분과 미량성분 등에서 전형적인 철질 카보나타이트와는 차이가 있다. 즉 주성분의 Fe값이 철질 카보나타이트보다 평균 2배가량 농집되어 있고 Ca값은 이보다 1/2이하로 결핍되어 있다. 그리고 미량성분 중 Nb, Zr, Zn값들이 현저히 낮다. 전체 회토류의 높은 함량과 경회토류의 농집으로 인한 높은 분별지수 등은 암석화학적 면에서 본 연구대상 암체가 일반적인 철질카보나타이트의 범주에 해당하며, 미량원소도 철질 카보나타이트의 평균함량보다 결핍되어 있긴 하지만 그 범주 내에 속한다. 그러나 지적한 두 주성분은 현격한 차이를 보인다.

러시아 Kovdor지역의 카보나타이트복합체(Kramm et al., 1993)와 핀란드 Sokli 지역의 카보나타이트(Lee, 2002)의 연구결과와 홍천 철-회토류 광화대를 비교하면 구성광물과 암석화학적특성과 거의 일치한다. 탄산염암복합체 중에서 철질 카보나타이트보다는 카보나타이트 용융체에서 불혼화용액(liquid immiscibility)과 동결정작용(coeval crystallization)으로 형성되어지는 포스코라이트(Phoscorite)가 자철석과 다양한 탄산염광물로 구성되고 철질 카보나타이트에 비해 주성분(Table 10)은 높은 Fe함량과 낮은 Ca, 미량성분은 결핍된 Nb, Zr, Zn, 회토류분포에서 농집된 경회토류로 인한 높은 분별지수 등의 특징이 있다. 이 암석은 좀더 낮은 온도에서 형성되어지는 카보나타이트류 중의 일종이다 (Vartiainen & Paarma, 1979).

일반적으로 맨틀기원의 탄산염암류에서 회토류성분이 높은 것은 CO₂ 같은 유체가 풍부한 환경에서 교대작용에 의하여 회토류원소가 농집된 불균질한 맨틀이 부분용융, 불혼화용액에 의한 탄산염용액이 형성, 분화되면서 회토류원소가 집적되어지는 것으로 설명되어진다(Baker and Wyllie 1990; Brooker, 1998).

동북아시아 지역의 카보나타이트와 연관된 회토류광상의 분포지역을 보면 러시아지괴나 북중국지괴의 경계부분에 발달되는데 국내 홍천지역의 철-회토류광상도 지구구조적으로 연관시켜보면 앞으로 흥미로운 연구가 될 것 같다.

결 론

- 1) 홍천지역의 철-회토류광상의 암체는 퇴적변성기원이 아닌 화성기원의 탄산염암이 관입·정체하면서 많은 양의 자철석, 다양한 탄산염광물, 모나자이트를 정출시켜 철-회토류 광화대를 형성시킨 것으로 보인다.
- 2) 주성분, 회토류, 미량원소들은 어느 정도 분화양상을 보이며 구성광물들과 밀접한 상관성을 보인다. 그

리고 안정동위원소는 화성기원의 탄산염암임을 제시하고 있다.

3) 그러나 일반적인 철질카보나타이트와는 암석화학에서 차이를 나타낸다. 즉 높은 Fe와 결핍된 Ca, 낮은 함량의 Nb, Zr, Zn, 전체회토류의 높은 함량 특히 경회토류의 부화로 인한 높은 분별지수를 보인다.

4) 이상의 특징으로 보아 본 연구대상 암체는 카보나타이트멜트의 불혼화용액에서 유래된 철성분과 경회토류가 농집된 카보나타이트의 일종인 포스코라이트임을 제시한다.

사 사

논문내용의 심사 및 오류를 지적해주시고 친절히 교정해주신 부경대학교 박맹언 교수, 부산대학교 양경희 교수 그리고 전자현미분석을 해주신 기초지원연구원의 이석훈 박사께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김상중, 이현구, 윤경무, 박중권, 2001, 홍천-자은지역 철-회토류광상의 광화작용. 자원환경지질, 34, 319-328.
- 김원조, 박노영, 김선익, 1966, 홍천지구철광상조사보고서. 지질광상 조사연구보고, 9, 31-78.
- 박중권, 황덕환, 1995, 선캠브리아기 철광화대의 희유금속 광물자원 조사연구(2차)(홍천-자은). 한국자원연구소 KR-95(c)-10 KIGAM research report.
- 신병우, 홍만섭, 이유대, 박봉순, 1975, 자은지질도폭. 국립지질광물연구소.
- 이현영, 고상모, 홍세선, 1991, 홍천지역의 변성작용. 지질학회지, 27, 339-356.
- 이현영, 박중권, 황덕환, 2002, 홍천 철-회토류광상의 암석기재학. 암석학회지, 11-2, 90-102.
- 이상헌, 1998, 홍천자철광상의 구성광물의 화학적특징. 암석학회지, 7, 98-110.
- 이종혁, 이상헌, 1989, 홍천철광상의 성인에 대한 암석학적 연구. 지질학회지, 25, 239-285.
- 조문섭, 김종육, 1993, 춘천-홍천지역 용두리 편마암 복합체내에 산출하는 납정석. 암석학회지, 2, 1-8.
- Barker, D. S. and Wyllie, P. J., 1990, Liquid immiscibility in a nephelinite-carbonatite system at 25 kbar and implications for carbonite origin. Nature, 346, 168-170.
- Brooker, R. A., 1998, The effect of CO₂ saturation on immiscibility between silicate and carbonate liquids: an experimental study. Jour. Petrol., 39, 1905-1915
- Deines, P., 1989, Stable isotope variations in carbonatites. Carbonatite Genesis and Evolution (Edited by Keith Bell), Unwin Hyman, London, p. 301-359
- Gaspar, J. C. & Wyllie, P. J., 1983, Magnetite in the carbonatites from the Jacupiranga complex, Brazil. Am.

- Mineral., 68, 195-213.
- Kramm, U., Kogarko, V. A. and Vartiainen, H., 1993, The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb-Sr ages define 380-360 Ma age range for all magmatism. *Lithos*, 30, 33-44.
- Le Bas, M. J., 1981, Carbonatite magmas. *Mineral. Mag.*, 44, 133-140.
- Lee, M. J., 2002, Mineralogie, petrographie, et geochemie de l'association phoscorites-carbonites dans le complexe alcalin de Sokli, Finlande. Ph.D. Thesis, Ecole des mines de Saint-Etienne.
- Mariano, A. N., 1989, Nature of Economic Mineralization in Carbonatites and Related Rocks. In *Carbonatites genesis and evolution* (eds. K. Bell), Unwin Hyman, London, 149-172.
- Vartiainen, H. and Paarma, H., 1979, Geological characteristics of Solki Carbonatite Complex, Finland. *Economic Geology*, 74, 59-68.
- Woolley, A. R. and Kempe, D. R. C., 1989, Carbonatites: Nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In *Carbonatites genesis and evolution* (eds. K. Bell), Unwin Hyman, London, 1-14.

(2003년 5월 2일 접수; 2003년 8월 20일 채택)