Jour. Petrol. Soc. Korea Vol. 11, No. 2, p. 90~102, 2002

홍천 철-희토류광상의 암석기재학

이한영* · 박중권 · 황덕환

한국지질자원연구원 지질연구부

Petrography of Hongcheon Fe-REE Deposits

Han Yeang Lee*, Joong Kwon Park and Duck Hwan Hwang

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

요 약: 홍천 철-희토류광체는 자철석, 안케라이트, 능철석, 마그네사이트, 스트론티아나이트가 주구성광물이며 모나자이트, 콜롬바이트, 퍼구소나이트, 인회석, 아지린휘석, Na-앰피볼, 황철석, 황동석, 중정석등이 부구성광물들이다. 광체주변부는 Na 교대작용에 의하여 페나이트화(fenitization) 되었으며 순수 알바이트와 Na-앰피볼로 구성된다. 희토류광의 주구성광물은 모나자이트 $(Ce_{0.49}La_{0.31}\ Pr_{0.14}\ Nd_{0.03}Gd_{0.03})PO_4$이며, 스트론티아나이트 $Ca_{0.02\text{-}0.16}Sr_{0.84\text{-}0.98}CO_3$와 미르메키틱 조직을 보이고 앤케라이트등의 탄산염광물들에 의하여 용식되어있다. 광물정출순서는 미세균열발달 유무에 의하여 전기와 후기로 나누어 지며, 그중 전기광물은 용액내에 축적된 CO_2 개스로 인한 파쇄작용 때문에 미세균열이 형성되어 있다. 자철석, 안케라이트, 마그네사이트, 모나자이트, 인회석들이 전기 정출광물들이며, 콜롬바이트, 퍼구소나이트, 능철석, 희수연석등은 미세균열이 없는 후기광물들이다. 그러나 안케라이트, 마그네사이트, 모나자이트, 스트론티아나이트, 중정석, 황철석은 전기에서부터 후기까지 연속적으로 수반되며 이들은 미세균열이 잘 발달된 것들과 없는 것들이 복합적으로 관찰되어진다. 다양한 탄산염광물, 자철석, 희토류광물인 모나자이트, 퍼구소나이트, Sr 함유광물인 스트론티아나이트, Nb광물인 콜롬바이트가 출현하는 것으로 대표되는 광물조합 및 광물화학, 모나자이트와 안케라이트의 미르메키틱 광물조직, 광체주변부를 따라 형성된 페나이트들은 홍천 철-희토류광상이 탄산염암멜트에서 형성되었고 암석은 후기 철질-탄산염암 또는 안케라이트-탄산염암임을 강력히 시사한다.

핵심어: 페나이트, 철질-탄산염암, 탄산염암멜트, 미세균열, 모나자이트, 안케라이트

Abstract: The studied Fe-REE ore consists of magnetite, ankerite, siderite, magnesite and strontianite as the major constituent, and monazite, columbite, fergusonite, apatite, aegirine-augite, Na-amphibole, pyrite, chalcopyrite, sphalerite, molybdenite and barite as accessaries. Wall rock of ore deposits is replaced to fenite due to Na-metasomatism and mainly consists of sugary albite and Na-amphibole. Monazite $(Ce_{0.49}La_{0.31}Pr_{0.14}Nd_{0.03}Gd_{0.03})PO_4$ is the main mineral for REE deposit and shows myrmekitic intergrowth with strontianite $Ca_{0.02\text{-}0.16}Sr_{0.84\text{-}0.98}CO_3$ and is corroded by carbonate minerals. Mineral forming sequence can be divided into early and late periods by the development of microfractures. The early period minerals such as magnetite, ankerite, magnesite, monazite and apatite show well developed networks of microfractures due to cataclastic deformation caused by enriched CO_2 gas in melts during emplacement. The late minerals of columbite, fergusonite, siderite molybdenite, chalcopyrite and sphalerite formed after the brecciation event and have little micro-fractures. Ankerite, magnesite, monazite, strontianite, barite and pyrite seem to be formed continuously from the ealy to the late period since they show textures both with well developed fractures and also with little fractures. Mineral chemistry, mineral assemblages such as various carbonate minerals, magnetite, REE minerals of monazite and fergusonite, Sr mineral of strontianite, and Nb minerals of columbite, myrmekitic texture of monazite and ankerite, and well developed fenite along ore deposits observed from this studied area strongly indicate that this Hongcheon Fe-REE ore deposits are formed from carbonatitic melt and its rock type is late differentiated Fe-carbonatite or ankerite-carbonatite.

Key words: Fenite, Fe-carbonatite, carbonatitic melt, micro-fractures, monazite, ankerite

*Corresponding author: Tel. 82-42-868-3103, Fax. 82-42-861-9720, E-mail. hanlee@kigam.re.kr

서 언

선캠브리아기 편마암내에 형성된 홍천철광상은 탄산염광물과 REE, Sr, Nb, Ba 함량이 높게 나타나 암석학적으로 매우 흥미로우며 본 광상에 대한 연구는 김원조 외(1966)의 철광상 성인 연구, 박중권과 황덕환 등(1995)의 희토류광상 분포연구, 이상헌(1998)의 철광상 구성광물에 관한 연구, 김상중 외(2001)의 광화작용에 대한 연구가 있었다. 철-희토류광물 성인에 대해서는 퇴적변성기원(김원조 외, 1966)과 화성기원(김상중 외, 2001)으로 보는 견해가 있으며 광체의 석기질 부분에는 다양한 탄산염광물들로 구성되어 있어 일반적인 금속광상 암체와는 다른 양상인 국내 유일의 특이한 암상을 보인다. 따라서 암체의 종류와 성인이 우선적으로 밝혀져야 조사지역의 철-희토류광상의 형성과정을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 일차적으로 광상을 형성하는 암체의 암석기재 및 광물화학 연구를 통하여 암석학적 특성과 성인을 알아보고자 한다.

일반지질

본 역은 선캠브리아기의 경기 편마암 복합체에 속하며 흑운모 편마암, 각섬석-흑운모 편마암, 화강암질 편마암류로 구성되며 후기에 이를 관입한 쥬라기의 홍천 화강암이 조사지역을 벗어난 동남부에 분포하고 있다(Fig. 1). 이 지역의 변성암 및 화강암의 암석학적 연구는 신병우 외(1975), 이종혁과 이상헌(1989), 이한영 외(1991), 조문섭 과 김종욱(1993), 좌용주(1997)가 있다. 신병우 외(1975)는 이 지역 변성암류의 구분과 분포지를 조사하였으며 이종혁과 이상헌(1989)은 본 연구지역 철광체의 성인이 변성기원임을 보고하였다. 이한영 외(1991)와 조문섭 과 김종욱(1993)은 홍천변성암류의 변성온도 및 압력을 제시하였고 좌용주(1997)는 홍천 화강암의 지구화학 연구를 수행하였다.

흑운모 편마암은 조사지역을 가로지르는 장남천의 동부지역에 분포하고 흑운모와 석영으로 주로 구성되어 유색광물대와 무색광물대가 잘 관찰되며 N30~70°W 주향과 15~60°SW 경사를 보인다. 흑운모-각섬석 편마암은 장남천의 서부지역에 분포하며 흑운모 편마암과는 점이적이다. 흑운모, 각섬석, 사장석이 주 구성광물이며 석영이 드물다. 각섬석의 선상배열로 엽리가 현저하며 앰피볼라이트가 협재한다. 편리를 보이는 조립질의 화강암질 편마암은 *중골 입구 하천 가장자리와 두촌중학교 뒷편에 분포하며, 석영은 신장되어 파동소*

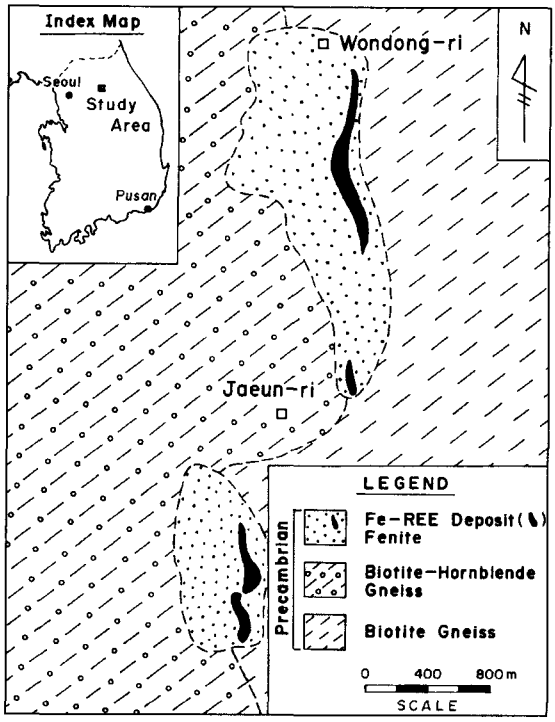

Fig. 1. Simplified geological map of Honcheon Fe-REE ore deposits.

광을 보이며 장석류들은 변질작용에 의한 견운모화의 특징을 보인다. 이외에 규장반암, 염기성 맥암들이 소수 관찰되고 있다.

광상을 이루는 암체는 남부 및 북부 광체로 나누어지며 대부분 다량의 자철석과 탄산염광물을 함유하나 국부적으로는 자철석을 거의 함유하지 않는 부분이 불규칙적으로 산출되기도 하며 전체적으로는 대상형태를 띄고 있다(Fig. 2). 주변암의 틈을 따라 주입되어 반용테를 형성하기도 하고 접촉부에는 편리를 따라 층층관입(lit-par-lit injection) 형태로 관입하거나 열극을 충진한 형태들이 관찰된다(Fig. 3). 광체는 주 구성광물이 안캐라이트, 자철석이며, 부구성광물은 능철석, 마그네사이트, 스트론티아나이트, 모나자이트, 훠구소나이트, 콜롬바이트, 인회석, 아지린휘석, 중정석 황철석, 황동석 등이 수반된다. 이들 암체주변에는 알바이트화 작용을 받은 변질기원의 페나이트가 대상으로 분포하고 있으며 주구성광물은 재결정화된 알바이트, Na-앰피볼이며 탄산염암과의 접촉부에는 농집된 암녹색의 금운모가 관찰된다. 변질광물인 견운모와 적철석, 이차 탄산염광물인 방해석이 관찰된다.

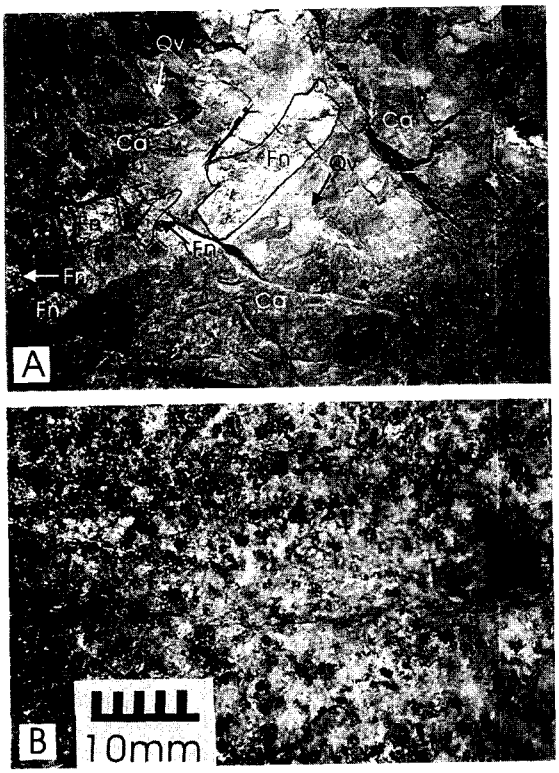

Fig. 2. (a) Enclosed fenite (Fn) fragments and quartz vein (Qv) in carbonate rock (Ca). (b) Intergrowth of granular shape magnetites (dark color) and carbonate minerals (milky white color) in ores.

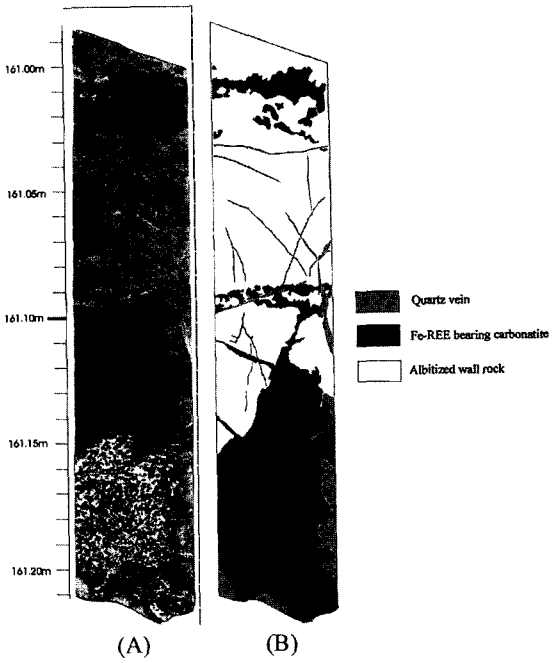

Fig. 3. Injected carbonate rock, wall rock of fenite and quartz vein are well shown in drilling core.

광물화학

본 조사지역에서 대표적인 시료에 대하여 100개 이상의 박편을 만들었으며 기초과학지원연구원의 전자현미분석기(CAMECA-FX51 기종)를 사용하여 각 광물에 대한 화학분석을 시도하였다. 분석조건은 15 kv의 전압, 20 nA의 빔전류, 1 μm의 빔직경, 10초의 측정시간을 사용하였다. 대표적인 각 광물의 분석자료는 Table 1~8에 요약되어 있다.

안캐라이트

Fe-REE 광상의 주구성광물이며 자철석과 연정을 이루며 다른 탄산염광물과 함께 기질부의 대부분을 형성한다. 입자크기는 세립에서 조립까지 다양하며 경하에서의 다른 탄산염광물과의 구별은 어렵다. 탄산염광물 중에서 능철석과 함께 가장 많은 양을 나타낸다. 화학성분은 Table 1에 나타나 있으며 Fe값(Fe/(Fe+Mg+Mn))은 0.1-0.2를 보인다.

능철석 및 Fe-마그네사이트

능철석은 부분적으로 자형의 능면체로 산출되나(Fig. 4a) 주로 다른 탄산염광물들과 군집을 이루며 이차적으로 자철광을 교대하여 산출된다. Fe값 (Fe/(Fe+Mg+Ca))은 0.70 정도를 보인다. 마그네사이트 역시 경하에서는 다른 탄산염광물들과 구별이 어렵고 전자현미분석에서 확인되며 일반적으로 유백색을 띄고 주로 Fe/Fe+Mg비가 0.20-0.35를 보이는 Fe-마그네사이트이다. 두 광물의 화학성분은 Table 1에 요약되어 있다.

스트론티아나이트

스트론티아나이트는 Sr을 함유하는 광석광물로서 탄산염광물 중 앞서 언급한 안캐라이트, 능철석 등과 주종을 이룬다. 연한 분홍색을 띠며 대상으로 발달하고 주로 안캐라이트, 모나자이트, 인회석 등과 군집을 이루며 모나자이트와 함께 밀메카이트 형태의 연정을 이룬다(Fig. 4b). 이런한 조직특성은 탄산염광물들이 모나자이트와 동일 마그마 기원임을 나타낸다. Sr/Sr+Ca비는 0.84-0.98이며 약간의 Ca 성분이 Sr을 치환하고 있다(Table 2). 광체 평균 함량은 1.78%이고 농집된 부분은 10-41%의 분포를 보인다.

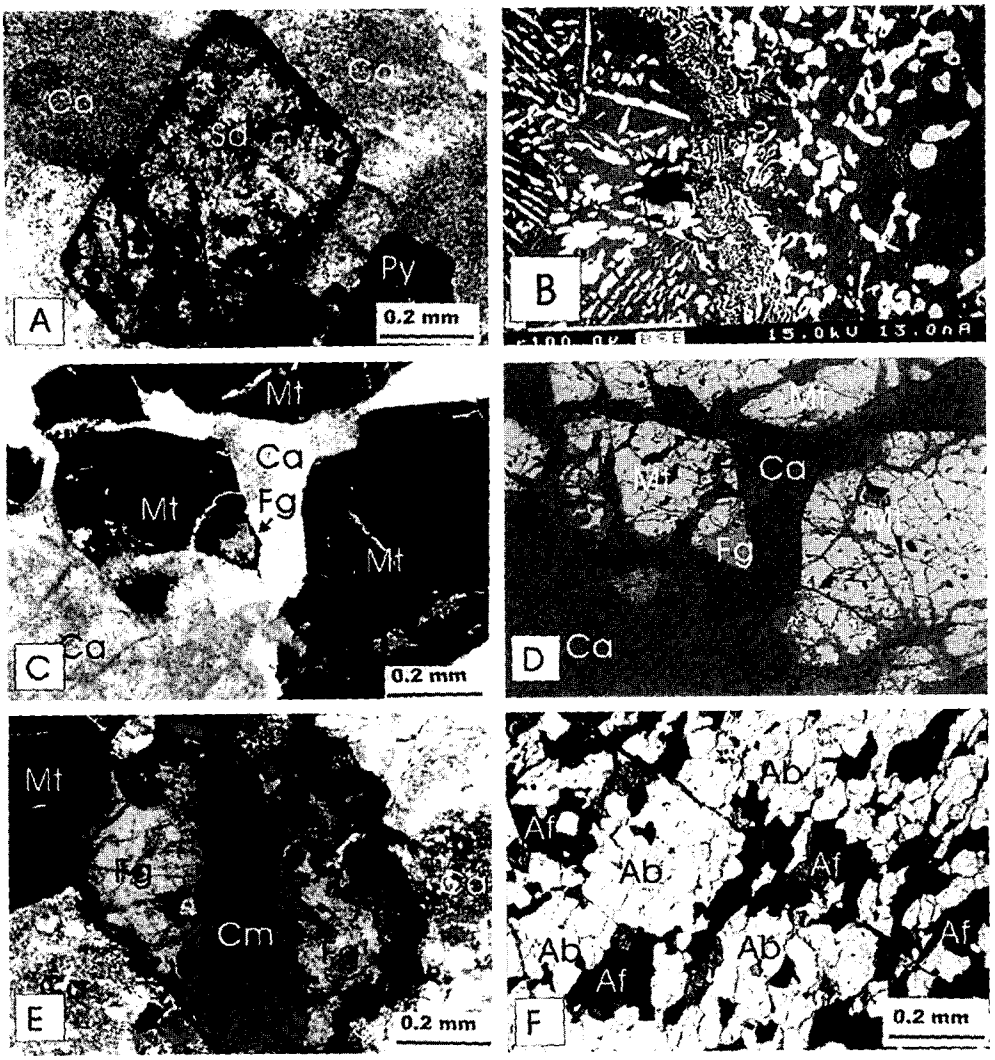

Fig. 4. (a) Euhedral siderite of late stage in matrix (Open); Sd: siderite, Py: pyrite, Ca: carbonate mineral. (b) Back-scattered electron image showing myrmekitic intergrowth of monazite (white) and strontiate (gray). (c) Magnetite (mt) is replaced by fergusonite (fg) in carbonate mineral (ca); cross. (d) same as photo c under open reflect light. (e) Columbite (cm) replaced by fergusonite (fg) in carbonate mineral (ca); cross. (f) Sugary texture albite (ab) and Na-amphibole (af) in fenite.

방해석

대부분 이차광물로 석영과 함께 세맥을 형성하거나 앰피볼류의 변질에 의한 이차광물로 산출되며 순수한 성분의 방해석들이다.

자철석

자형 내지 반자형으로 광염상으로 산출되며 전체적으로 대상분포이나 부분적으로 집접되어 괴상의 철광체(40~50%)를 형성한다. 입자크기는 2~3 mm이며 신장성이나 방향성을 나타내지는 않는다. 광체의 자철석 함량은 평균 20~30% 모달값을 보이나 부분적으로 1~2% 미만인 곳도 있다. 자철석 광물입들은 미세균열이 발달하고 안케라이트등에 둘러싸여 용식경계를 이룬다 (Fig. 4c, 4d). 균열부분에는 교대된 적철석과 탄산염 광물로 충진되며 간혹 황철석이 수반된다. 적철석은 주로 자철석을 국부적으로 교대하며 매우 적은 양으로 나타난다. 화학성분은 Ti성분이 없는 순수 자철석이다.

Table 1. Representative microprobe analysis of Ankerite, Siderite and Fe-magnesite from Hongcheon Fe-REE deposits.

Sample No.	Ankerite		Siderite	Magnesite
	#2	#76	#56	#4
MgO	15.70	12.46	6.75	28.36
CaO	27.02	29.17	3.32	0.12
MnO	6.76	8.35	47.60	1.14
FeO	4.92	4.64	2.71	27.38
CO_2	45.49	45.01	40.80	43.47
Total	99.51	99.63	101.18	100.47
Oxygen basis 6 (O)				
Mg	0.77	0.62	0.36	1.37
Ca	0.95	1.04	0.13	0.00
Mn	0.19	0.22	1.43	0.03
Fe	0.10	0.13	0.08	0.74
C	2.00	2.00	2.00	1.92

Table 2. Representative microprobe analysis of Strontianite. from Hongcheon Fe-REE deposits.

Sample No.	1	3	6	8
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	4.84	1.25	1.31	8.99
MnO	0.00	0.00	0.05	0.00
FeO	0.02	0.00	0.03	0.07
SrO	63.92	68.66	68.80	58.83
CO_2	31.21	30.41	30.56	32.32
Total	99.99	100.32	100.75	100.21
Oxygen basis 6				
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.24	0.06	0.07	0.44
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	1.75	1.93	1.92	1.55
C	2.01	2.01	2.01	2.00
Total	4.00	4.00	4.00	3.99

적철석

광체주변의 알바이트화작용을 받은 변질대에서 산출되는 다량의 적철석은 대부분 유색광물의 변질산물이고, 광체내에서는 주로 자철석이 국부적으로 교대되어 생성된 이차광물로 산출된다. 광체내의 적철석은 자철석에 비하여 매우 적은 양이며 부분적으로 마타이트화(martitization)한 자철석의 가상과 자철석의 잔류체가 남아 있기도 하며 마타이트내에는 후기에 형성된 탄산염광물이 존재하기도 한다.

콜롬바이트

자철석, 훠구소나이트 등과 군집을 이루며 경하에서 입상으로 적색-적갈색을 보이며, 부분적으로 중심부에 불투명하게도 보인다. 벽개가 발달하기도 하며 크기는 0.01~1 mm 이고 훠구소나니트에 의해 교대되기도 한다(Fig 4e). 콜롬바이트와 훠구소나이트는 미세균열이 없이 신선하게 나타난다. 적색부분은 Mn 함량이 높은 Mn-콜롬바이트로서 대표적인 분자식은 $(Mn_{0.57}Fe_{0.24}Mg_{0.19})Nb_2O_6$이며, 불투명한 부분은 Fe-콜롬바이트로서 대표적인 분자식은$(Fe_{0.82}Mn_{0.15}Mg_{0.03})Nb_2O_6$이다(Table 3).

훠구소나이트

입상으로 오렌지색을 띄며 크기는 0.1~0.5 mm이고 콜롬바이트를 교대한다(Fig. 4e). 자형의 결정들이 자철석, 모나자이트등과 무리를 이루며 모나자이트 결정내에 훠구소나이트의 성장한 것이 관찰된다. 콜롬바이트 잔존체를 포획하고 있으며, 자철석을 교대하기도 한다. Fe-콜롬바이트가 훠구소나이트 입자 외곽에 검은테 형태로 나타나기도 한다. 화학성분은 $(REE_{0.90}Ca_{0.05}Th_{0.05})NbO_4$이며 탄탈륨은 거의 없다(Table 4).

모나자이트

희토류 광석광물로서 안케라이트, 능철석, 스트론티아나이트등의 탄산염광물과 밀접하게 연정으로 나타난다. 입자크기는 0.02~2 mm로 다양하며, 균열이 발달된 것과 균열이 없는 미립의 신선한 2종류로 나눌 수 있다. 스트론티아나이트와 밀메카이틱 연정구조가 관찰되며(Fig. 4b) 탄산염광물들에 둘러싸여 용식된 것도 관찰된다. 이러한 조직특성은 모나자이트와 탄산염광물과는 동일한 마그마의 안정된 온도에서 형성된 것으로 보인다. 희토류원소중에는 Ce, La, Pr 순으로 함량이 높고 Nd, Gd도 소량으로 나타나나 Th 의 함량은 거의 없다. Ce/Ce+La+Pr+Nd+Gd 비는 0.49, La/Ce+La+Pr+Nd+Gd 비는 0.31, Pr/Ce+La+Pr+Nd+Gd 비는 0.14, Nd/Ce+La+Pr+Nd+Gd 비는 0.03, Gd/Ce+La+Pr+Nd+Gd 비는 0.03의 값을 보인다(Table 5).

인회석

인회석은 자철석, 탄산염광물들과 군집을 이루며 크기는 1 mm 내외로 조립이고 타형으로 대부분 변질을 받아 미세한 탄산염광물로 교대되거나 스트론티아나이트등의 초미립 포획물을 함유하여 포키리틱 석리를 보이고 있다.

Table 3. Representative microprobe analysis of Columbite from Hongcheon Fe-REE deposits.

Sample No.	manganocolumbite			ferrocolumbite		
	9	10	16	12	13	17
Nb_2O_5	80.612	80.788	80.119	79.542	79.505	79.160
Ta_2O_5	-	-	-	-	-	-
FeO	4.958	4.853	5.850	11.653	15.376	16.686
CaO	-	-	-	-	-	-
MnO	11.729	11.532	11.311	6.967	4.061	3.154
TiO_2	0.460	0.390	0.629	0.400	0.369	0.537
MgO	2.557	2.527	2.404	1.608	0.889	0.751
P_2O_5	-	-	-	-	-	-
ThO_2	-	-	-	-	-	-
La_2O_3	-	-	-	-	-	-
Ce_2O_3	-	-	-	-	-	-
Pr_2O_3	-	-	-	-	-	-
Nd_2O_3	-	-	-	-	-	-
Sm_2O_3	-	-	-	-	-	-
Eu_2O_3	-	-	-	-	-	-
Gd_2O_3	-	-	-	-	-	-
Total	100.316	100.090	100.313	100.17	100.200	100.288
Oxygen basis (6)						
Nb	1.993	2.001	1.984	1.988	1.996	1.988
Ta	-	-	-	-	-	-
Fe	0.227	0.222	0.268	0.539	0.714	0.775
Ca	-	-	-	-	-	-
Mn	0.543	0.535	0.525	0.326	0.191	0.148
Ti	0.019	0.016	0.026	0.017	0.015	0.022
Mg	0.209	0.206	0.196	0.133	0.074	0.062
P	-	-	-	-	-	-
Th	-	-	-	-	-	-
La	-	-	-	-	-	-
Ce	-	-	-	-	-	-
Pr	-	-	-	-	-	-
Nd	-	-	-	-	-	-
Sm	-	-	-	-	-	-
Eu	-	-	-	-	-	-
Gd	-	-	-	-	-	-

Na-앰피볼

페나이트의 주 구성광물로서 알바이트와 연정을 이루며(Fig. 4f) 아지린휘석과 함께 북광체를 가로지르는 하상에서 조립질의 Na-파이리볼 형태로 산출되기도 한다. 화학성분은 앰피볼그룹 중 알페소나이트에 속한다(Table 6). Na/Na+Ca+K는 0.75이며 Mg/Mg+Fe+Mn는 0.54~0.80이며 대표적인 분자식은 $(Na_{0.75}Ca_{0.18}K_{0.06})_3(Mg_{0.80\sim0.54}Fe_{0.18\sim0.43}Mn_{0.02\sim0.03})Si_8O_{22}(OH)_2$이다.

아지린휘석

조립질이며 섬유상의 조직을 보이며 광체와 주변 변질대에서 산출된다. 주로 Na-앰피볼과 군집을 이루어 Na-파이리볼로 불리는 형태로 산출된다. 담황록색으로서 알바이트와 자철석의 작은입자를 함유한다. 반면 Na-앰피볼은 흑색-암록색을 나타낸다. 적갈색의 순수한 엑마이트도 관찰이 되며 엑마이트 주변은 Na-앰피볼로 교대되어 나타나기도 하며 중심부는 철의 부화로

Table 4. Representative microprobe analysis of fergusonite from Hongcheon Fe-REE deposits.

Sample No.	1	2	7	8	11	15
Nb_2O_5	44.636	44.407	44.435	44.467	44.400	44.284
Ta_2O_5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FeO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
CaO	0.828	0.893	0.410	0.493	1.465	0.534
MnO	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000	0.000
TiO_2	0.000	0.070	0.005	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.046	0.022	0.000	0.000
P_2O_5	0.034	0.037	0.071	0.057	0.078	0.066
ThO_2	4.754	5.333	1.632	1.982	6.837	2.173
La_2O_3	5.885	5.194	6.979	6.992	5.065	7.931
Ce_2O_3	22.234	20.898	24.967	24.639	20.106	26.000
Pr_2O_3	3.095	3.209	3.622	3.087	3.038	2.824
Nd_2O_3	12.122	13.236	12.310	12.483	12.073	10.489
Sm_2O_3	1.875	1.986	2.068	1.940	2.056	2.050
Eu_2O_3	1.022	1.213	0.984	0.919	1.363	0.862
Gd_2O_3	2.839	2.814	2.920	2.775	2.914	2.899
Total	99.324	99.290	100.526	99.856	99.395	100.112
			Oxygen basis (4)			
Nb	1.007	1.004	0.9944	0.999	1.001	0.995
Ta	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.067	0.048	0.022	0.039	0.078	0.028
Mn	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000
P	0.002	0.002	0.003	0.004	0.003	0.003
Th	0.081	0.061	0.018	0.034	0.078	0.025
La	0.163	0.096	0.128	0.129	0.094	0.146
Ce	0.406	0.383	0.452	0.673	0.367	0.473
Pr	0.084	0.058	0.065	0.084	0.055	0.051
Nd	0.324	0.236	0.217	0.332	0.215	0.186
Sm	0.048	0.034	0.035	0.050	0.035	0.035
Eu	0.026	0.021	0.017	0.016	0.023	0.015
Gd	0.047	0.047	0.048	0.046	0.048	0.048

인하여 불투명하다. 2차 변질의 탄산염광물이 관찰된다. 아지린 휘석의 화학성분은 Table 7에 표시되어 있으며 Na/Na+Ca는 0.8, Fe/Fe+Mg는 0.8의 값을 보이고 대표적인 분자식은 $(Na_{0.8}Ca_{0.2})(Fe_{0.8}Mg_{0.2})SiO_6$이다.

알바이트

광체와 펜아이트화한 주변 변질대에서 산출되며 순수 알바이트성분을 갖는다. 백색 반투명의 결정상(Fig. 4f)을 보이기 때문에 광체중의 탄산염광물과의 식별이 어렵다.

금운모

암록색을 띄며 탄산염암이 관입하여 페나이트화한 모암의 접촉부에 농집되어 나타난다(Fig. 5). 화학성분은 Al 함량이 많고 Mg(Mg/Mg+Fe) 값이 0.74정도이며 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(Table 8).

황화광물 및 황산염광물

황철석은 광염상으로 광화대와 변질대 전반에 광범위하게 산출되며 크기는 수mm - 수μm로 다양하나 대

Table 5. Representation microprobe analysis of monazite from Hongcheon Fe-REE deposits.

Sample No.	2	3	4	5	6
SiO_2		0.01	0.02	0.03	0.22
P_2O_5	27.44	27.18	26.56	26.91	26.58
CaO	0.04	0.07	0.05	0.1	0.08
La_2O_3	23.05	20.34	21.40	21.07	20.98
Ce_2O_3	35.81	34.74	34.81	33.98	35.07
Pr_2O_3	6.84	6.68	6.05	6.22	6.08
Nd_2O_3	2.77	6.17	6.16	6.01	6.05
Eu_2O_3	0.20	0.81	0.68	0.74	0.65
Gd_2O_3	2.59	4.10	3.92	3.80	3.85
Ho_2O_3	-	-	-	0.03	0.01
Er_2O_3	0.43	0.06	-	-	0.01
Tm_2O_3	0.20	-	0.08	0.08	0.21
Yb_2O_3	0.09	0.07	-	0.01	0.05
Lu_2O_3	0.31	0.08	0.06	-	0.02
ThO_2	0.01	0.07	0.21	0.35	0.18
Total	99.78	100.38	100.00	99.33	100.04
			oxygen basis (16)		
P	3.808	3.776	3.734	3.774	3.710
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	3.808	3.776	3.734	3.774	3.710
La	1.393	1.231	1.311	1.287	1.276
Ce	2.149	2.087	2.116	2.061	2.116
Pr	0.409	0.399	0.366	0.375	0.365
Nd	0.162	0.362	0.365	0.356	0.356
Eu	0.011	0.045	0.039	0.042	0.037
Gd	0.141	0.223	0.216	0.209	0.210
Ho	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Er	0.022	0.003	0.000	0.000	0.001
Tm	0.010	0.000	0.004	0.004	0.011
Yb	0.005	0.004	0.000	0.001	0.003
Lu	0.015	0.004	0.003	0.000	0.001
Th	0.000	0.003	0.008	0.013	0.007
Ca	0.007	0.012	0.009	0.018	0.014
Total	4.324	4.373	4.436	4.366	4.396

부분이 미립이다. 형태는 자형에서 타형까지 다양하며 광화대에는 밀집된 괴상형태(10 cm 내외)로 산출되기도 한다. 경하에서 심히 파쇄되거나 균열이 발달하는 것이 관찰되며 자철석의 균열을 충진하기도 하여 지속적으로 오랜 기간에 걸쳐 형성된 것 같다. 황동석은 미립으로 소량 산출되며 타형이고 황철석 및 섬아연석과 용리조직을 보이거나 황철석내에 미세하게 광염으로 나타난다. 섬아연석, 희수연석은 미립으로 소량 산출되며 광염상으로 인회석 및 다른 황화광물들과 군집을 이룬다. 중정석은 미량이나 농집된 곳은 Ba의 함량이 10%까지 증가되며, 스트론티아나이트와 연정을 이루며 후기에 정출한 모나지이트에 의하여 포획되기도 한다.

광물형성시기

광체와 변질대의 광물생성 순서를 알기 위한 광물조합은 앞서 언급한 탄산염광물, 희토류 함유광물, Na-앰피볼, 아지린휘석 외에 알바이트, 석영, 황화 및 황산염광물도 포함된다. 광화대와 변질대인 페나이트의 장석광물은 순수한 알바이트이며 재결정작용에 의해 당정질 조직을 보이고 있어 탄산염광물과의 식별이 어렵

Table 6. Representation microprobe analysis of Na-Amphiboles from fenite.

sample No.	#10	#18	#49	#50
SiO_2	52.019	51.471	54.492	53.625
TiO_2	0.292	0.270	0.115	0.082
Al_2O_3	3.501	2.324	2.284	2.772
FeO	16.238	21.533	7.562	7.656
MnO	1.165	0.220	1.996	2.061
MgO	13.309	10.018	18.889	18.950
CaO	2.475	1.563	3.485	3.920
Na_2O	6.861	7.915	7.244	6.788
K_2O	0.549	1.152	0.769	0.830
Total	96.414	96.470	96.841	96.689
cation based on 23 oxygens				
Si	8.068	7.857	7.803	7.710
Al	0.640	0.418	0.385	0.470
Ti	0.034	0.031	0.013	0.009
Fe	2.106	2.749	0.906	0.920
Mg	3.078	2.280	4.033	4.062
Mn	0.153	0.029	0.242	0.251
Na	2.064	2.343	2.011	1.892
Ca	0.412	0.255	0.535	0.604
K	0.109	0.224	0.140	0.152
Total	16.663	16.186	16.067	16.069

다. 석영은 주로 페나이트에서 세맥으로 발달되고 파쇄대를 충진하며 탄산염광물과 함께 미립의 집합체를 이루기도 한다. 황화광물은 황철석, 황동석, 섬아연석, 휘수연석이 산출되며, 황철석은 미립으로 광화대와 변질대 전반에 걸쳐 광염상으로 나타나며, 균열이 잘 발달된 것과 다른 광물의 균열을 충진한 것들로 구분된다. 이러한 현상은 파쇄작용이 일어나기 전과 이후에 걸쳐서 오랜 기간 생성된 것으로 생각되며, 파쇄작용 이전의 황철석은 소량이다. 황산염광물인 중정석은 스트론티아나이트와 집합체를 이루며 균열이 없는 신선한 모나자이트 결정 내에 포획된다.

야외조사와 현미경 관찰의 광물조직에 의한 광체의 구성광물 생성순서는 Fig. 6과 같다. 주변암 변질대인 페나이트의 구성광물인 알바이트, Na-앰피볼은 광체의 구성광물들과 별개로 경하에서 함께 수반되어 나타나지 않으므로 생성순서 전후기를 관찰할 수 없어 제외하였다. 생성시기를 전기와 후기로 나눈 기준은 파쇄작용 이전과 이후로 균열의 유무와 관련지어 구분하였다. 즉 광화작용중 파쇄작용이 일어나기 이전에 형성된 광물들은 미세균열이 잘 발달되어 있으며, 파쇄작용 후기에 형성된 광물들은 상대적으로 신선하였다. 미세균열이 발달된 대표적인 광물들은 자철석, 모나자이트, 안케라이트, 마그네사이트, 인회석, 스트론타아나이트, 중정석, 휘수연석, 황철석등이다. 그러나 이들중 자철석, 인회석, 중정석, 휘수연석을 제외하고는 미세균열이 없는 것도 관찰이 되는데 이런 광물들은 파쇄작용 이후에도 광물형성이 지속적으로 이루어진 것 같다. 광체의 기질부를 이루는 안케라이트, 마그네사이트, 스트론티아나이트는 전후기를 걸쳐 지속적으로 결정작용이 있었으나 능철석은 미세균열 발달이 보이지 않아 후기에 형성된 것 같다. 자철석의 미세균열내에 이러한 탄산염광물로 충진되어 있고 후기에 교대된 능철석 입자 내에 자철석의 잔류체를 남기며 외곽이 용식된 구조가 관찰되는 점이 미세균열과 더불어 자철석의 형성이 전기에 이루어졌음을 시사한다.

적철석은 자철석의 주변부나 미세균열을 따라 교대되어 나타나 후기 형성을 나타낸다. 콜룸바이트와 훠구소나이트는 밀접하게 공존되어 나타나며 전자는 후자에 의하여 교대되어 잔류체로써 남아 있기도 하며 자철석을 교대, 절단해서 성장하기도 하여 후기 형성광물의 특징을 나타낸다.

스트론티아나이트와 모나자이트는 서로 용리조직을

Table 7. Representation microprobe analysis of aegirin-augite and acmite from fenite.

	aegirin-augite			acmite		
Sample No.	#3	#5	#7	#11	#12	#14
Na_2O	10.23	11.98	11.50	11.64	13.14	12.99
SiO_2	52.83	52.93	52.38	52.80	52.04	52.78
Al_2O_3	2.05	3.33	1.48	3.31	1.63	2.08
MgO	3.93	1.35	2.26	1.50	0.31	0.59
K_2O	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	5.45	2.65	3.51	2.85	0.44	0.89
TiO_2	0.08	0.01	0.06	0.08	0.00	0.22
*Fe_2O_3	25.23	27.73	28.47	27.76	32.48	32.07
MnO	0.98	0.23	0.78	0.17	0.17	0.26
Total	100.8	100.2	100.4	100.1	100.2	101.9
Na	0.791	0.889	0.908	0.910	1.056	1.022
Si	2.107	2.027	2.132	2.129	2.157	2.141
Al	0.096	0.150	0.071	0.157	0.079	0.100
Mg	0.233	0.077	0.137	0.090	0.019	0.035
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.233	0.109	0.153	0.123	0.019	0.039
Ti	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	0.007
Fe	0.743	0.784	0.855	0.826	0.993	0.960
Mn	0.033	0.007	0.027	0.006	0.006	0.009
Total	4.239	4.044	4.284	4.245	4.330	4.313

Table 8. Representation microprobe analysis of phlogipite from Hongcheon Fe-REE deposits.

Sample No.	Drill core, DH00-1-170(190.1m)			
Point No.	#33	#34	#35	#36
Na_2O	0.789	0.592	0.147	0.221
SiO_2	39.868	39.712	39.187	42.852
Al_2O_3	12.803	12.739	12.529	15.276
MgO	20.563	20.530	19.164	16.337
K_2O	7.838	8.238	9.213	8.791
CaO	0.056	0.017	0.018	0.010
TiO_2	0.093	0.100	0.110	0.135
FeO	9.534	10.292	11.766	9.333
MnO	0.492	0.515	0.262	0.362
Total	92.041	92.739	92.401	93.322
	oxygen basis (22)			
Na	0.228	0.171	0.043	0.063
Si	5.951	5.920	5.931	6.235
Al	2.252	2.238	2.235	2.619
Mg	4.576	4.563	4.324	3.543
K	1.492	1.567	1.779	1.632
Ca	0.009	0.003	0.003	0.001
Ti	0.011	0.011	0.012	0.015
Fe	1.190	1.283	1.489	1.135
Mn	0.062	0.065	0.034	0.044
Total	15.773	15.820	15.850	15.288

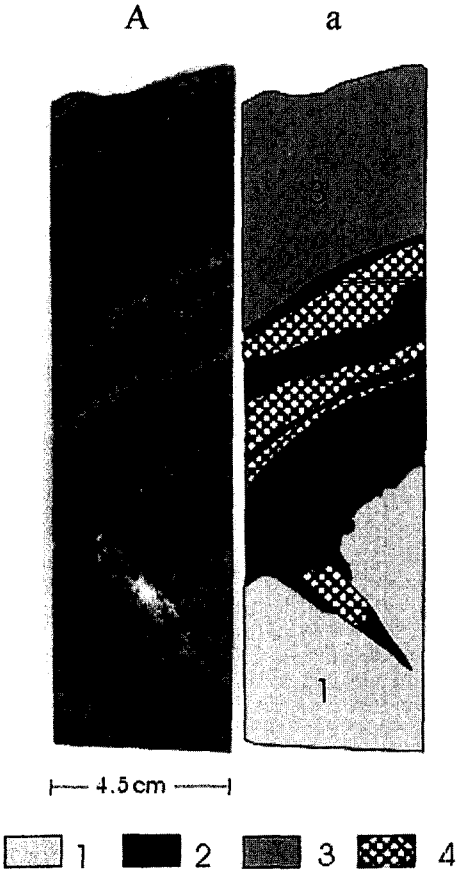

Fig. 5. Sketch of phlogopite (2) formed along the boundary of fenite (1) and injected carbonate rock (4). (3) area indicates Na-pyribole consisted of Na-amphibole and aegirin-augite.

보이며 밀접하게 나타나므로 후기의 두광물 형성시기는 동일한 것 같다. 인회석은 미세균열의 발달과 후기 형성의 탄산염광물내에 잔류체로 남기도하여 전기에 형성된 광물임을 보인다. 이상 언급한 것을 요약하여 광물형성시기를 나타내면 전기에 안케라이트, 마그네타이트, 중정석, 모나자이트, 스트론티아나이트, 인회석, 황철석, 휘수연석들이 형성되고 후기에 능철석, 적철석, 콜롬바이트, 훠구소나이트, 황동석, 섬아연석이 형성되었다. 그러나 전기광물 중에서 안케라이트, 모나자이트, 스트론티아나이트, 황철석은 후기에도 지속적으로 결정화 작용을 계속했다.

방해석과 석영은 세맥을 형성하며 다른광물들의 균열을 충진하기도 한다. 또한 주변암의 변질부인 페나이트에 많은 세맥들이 발달하고 광체로 관입하는 것으로 보아 페나이트화 과정중의 변질작용 및 이로 인한

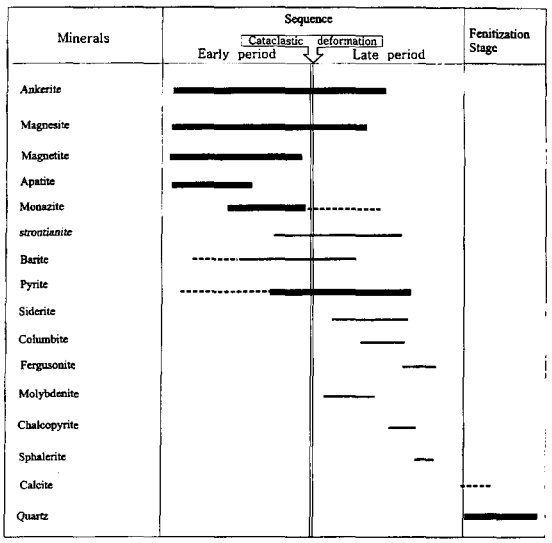

Fig. 6. Mineral forming sequence of carbonate rock and fenite in studied area.

이차적인 탈규산화작용에 기인하여 전후기에 지속적으로 형성된 것으로 보여진다(Woolley and Kempe, 1989; Mariano, 1989).

토의 및 결언

홍천 철-희토류 광상을 이루는 암석의 성인을 알기 위하여 전술한 암석기재, 광물조직, 광물화학, 광물생성순서 연구를 행하였으며 이러한 결과들을 검토하면 아래와 같다.

광물조성은 탄산염광물인 안케라이트, 마그네사이트, 능철석, 스트론티아나이트 등이 기질부의 주종을 이루어 자철석이 주구성광물들과 군집으로 나타나고 모나자이트, 스트론티아나이트, 훠구소나이트, 콜롬바이트, 인회석 등이 있다. 이러한 광물들은 Fe-카보나타이트의 전형적인 조성광물이라 할 수 있다(Le Bas, 1981; Woolley, 1982; Middlemost, 1985). 광화된 암체 주변부에 교대되어 대상으로 나타나는 알바이트, 아지린휘석, 광물화학에서 전술한 Na-앰피볼의 알페소나이트로 구성된 페나이트도 전세계적으로 나타나는 카보나타이트 산출상태와 같다.

야외조사와 현미경관찰에 의한 광물생성순서는 각 광물입자의 균열유무에 따라 전기와 후기로 나눌 수 있다. 이 미세균열은 일반적으로 카보나타이트가 정체되어 냉각·정출되면서 집적된 많은 양의 CO_2가 탈가스화 될 때 파쇄작용을 이르켜 미세균열이 발달된다

(Le Bas, 1987). 따라서 미세균열이 잘 발달된 광물이 파쇄작용이 일어나기 이전에 형성되었기 때문에 전기에 형성된 광물이며 자철석이 대표적이다. 능철석, 콜롬바이트, 훠구소나이트는 대표적인 후기 광물이다. 안케라이트, 모나자이트, 스트론티아나이트처럼 미세균열이 잘 발달된 것과 균열이 전혀 없는 신선한 것들로 구성된 광물은 전기와 후기에 걸쳐서 지속적으로 정출된 광물로 보인다.

김상중 외(2001)는 Na-카보나타이트와 Fe-카보나타이트 시기로 나누어 Na-카보나타이트 시기에 Na-교대작용, 철광물, 모나자이트의 형성, Fe-카보나타이트 시기에 희토류, 인회석 및 황화광물, 최후말기에 열수용액의 석영, 방해석 세맥들의 3단계 광물형성 시기로 구분하고 광체성인을 내몽고의 Bayan Obo와 같다고 하였다. 허나 광체의 광물조성 및 광물화학으로 보아 Fe-카보나타이트용액에서 이들 광물들은 정출된 것이며, 이 용액은 CO_2가 풍부하고 희토류성분이 부화된 불균질한 맨틀에서 부분용융(Wyllie, 1975)되어 분화된 것이다. 광물생성 순서는 전술한 것처럼 파쇄작용으로 인한 미세균열의 유무에 의한 전-후기로 구분할 수 있으며 인회석은 전기에 해당한다. 또한 내몽고의 Bayan Obo 광상은 불순질의 석회암모암에 열수용액이 가해져 형성된 전형적인 열수교대광상(Chao *et al.*, 1997)이며, 본 역의 Fe-카보나타이트 화성기원과는 성인을 달리한다. 또한 주변 변질대나 광체에서의 방해석과 석영의 세맥군들은 전술한 바와 같이 페나이트화 과정에서 발생하는 탈규소작용에 의한 것이다.

이종혁과 이상헌(1989)과 이상헌(1998)은 철-희토류광체주변부의 변질부인 페나이트를 석영-장석질 대상편마암이라 하였고 이들은 변성작용시 원소치환에 의한 순수 알바이트와 Na-앰피볼로 되었다고 하나 이들 광체주변부의 변질대를 벗어나면 Na-앰피볼과 순수 알바이트를 관찰할 수 없어 이들 생성이 변성작용으로 보는 견해는 설득력이 없다. 또한 광염상의 자철석은 항상 관입형태의 탄산염광물들과 같이 나타나며 주변의 편마암에서는 관찰되지 않는 것으로 보아 철광체의 퇴적변성기원도 야외관찰이나 구성광물 조합으로 볼 때 합리성이 결여된다고 할 수 있다.

철과 희토류광물을 배태하는 본 역의 광체는 주변 편마암의 편리를 따라 층층관입 형태로 관입하고 소규모의 균열을 충진하기도 하여 서서히 주입된 것 같다. 그리고 광체주변부를 교대하여 페나이트를 형성하였다 (*Le Bas, 1987*).

본 역의 철-희토류광체의 성인은 맨틀기원의 분화된 Fe-카보나타이트 용액이 홍천변성암류에 층층관입하면서 자철석과 인회석은 전기에, 희토류광물인 모나지이트, 탄산염광물인 안케라이트, 스트론티아나이트는 전-후기에 걸쳐 지속적으로 정출되며, 후기에 능철석, 콜롬바이트, 퍼구소나이트등을 형성시킨 화성기원이다. 따라서 이들 광체를 형성하는 암체는 후기-카보나타이트인 Fe-카보나타이트 또는 안케라이트-카보나타이트로 보인다. 그리고 이들 암체 주변의 순수 알바이트와 Na-앰피볼로 구성된 변질부는 카보나타이트가 관입시 Na 교대작용에 의하여 페나이트화 한 것이며 이 작용은 전-후기에 지속적으로 이루어졌으며 이 과정에서 탈규소화 작용 및 용리작용이 일어나 방해석, 석영세맥들이 발달하였다.

사 사

논문내용의 심사 및 오류를 지적해주신 부경대학, 환경지질과학과 박맹언, 박계헌 교수와 전자현미분석을 해준 기초지원연구원의 이석훈 박사, 자료정리를 도와준 충남대 윤진호 군에게 감사를 드린다.

참고문헌

김상중, 이현구, 윤경무, 박중권, 2001, 홍천-자은지역 철-희토류광상의 광화작용. 자원환경지질, 34, 319-328.

김원조, 박노영, 김선억, 1966, 洪川地區 鐵鑛床 調査報告. 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, 自隱地質圖幅. 國立地質鑛物硏究所.

이한영, 고상모, 홍세선, 1991, 홍천지역의 변성작용. 지질학회지. 27, 339-356.

이상헌, 1998, 홍천자철광상의 구성광물의 화학적특징. 암석학회지. 7, 98-110.

이종혁, 이상헌, 1989, 홍천철광상의 성인에 대한 암석학적 연구. 지질학회지. 25, 239-285.

조문섭, 김종욱, 1993, 춘천-홍천지역 용두리 편마암 복합체내에 산출하는 남정석. 암석학회지, 2, 1-8.

좌용주, 1997, 복운모화강암의 암석학적 특징; 청산, 인제-홍천, 영주 및 남원. 암석학회지, 6, 210-225.

Chao, E.C.T., Back, J.M., Minkin. J.A., Tatsumoto, M., Junwen, W., Conrad, J.E. and Mckee, E.H., 1997, The sedimantary carbonate-hosted Giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit of Inner Mongolia, China: A cornerstone example for giant polymatallic ore deposits of hydrothermal origin. U.S.G.S. Bullutin 2143, 102.

Le Bas, M. J., 1981, Carbonatite magmas. Mineral. Mag., 44, 133-140.

Le Bas, M. J., 1987, Nephelinites and carbonatites. In Alkaline igneous rocks (eds. J. G. Pitton and B. G. J. Upton), Geological Society Special Publication No. 30, 53-83.

Mariano, A. N., 1989, Nature of economic mineralization in carbonatites and related rocks. In Carbonatites - genesis and evolution (eds. K. Bell), UnwinHyman, London, 149-176.

Middlemost, E. A. K., 1985, Magma and magmatic rocks. Longman, London, 221-226.

Woolley, A. R., 1982, A discussion of carbonatite evolution and nomenclature, and the generation of sodic and potassic fenites. Mineral. Mag., 46, 13-17.

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), UnwinHyman, London, 1-14.

Wyllie, P. J. and Huang, W. L., 1975, Influence of mantle CO2 in the generation of carbonatites and kimberlites. Nature, 257, 297-299.

(2002년 5월 20일 접수, 2002년 6월 25일 채택)