

홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체에서 산출되는 자철석의 광물화학

Mineral Chemistry of Magnetite from the Hongcheon Carbonatite-Phoscorite Complex, Korea

신 동 북(Dongbok Shin)^{1*} · 오 영 북(Youngbok Oh)² · 이 미 정(Mi-Jung Lee)³

¹공주대학교 지질환경과학과

(Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 314-701, Korea)

²(주)넥스지오

(NexGeo Inc., Seoul 138-800, Korea)

³극지연구소

(Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea)

요약 : 홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체를 형성하는 주 구성광물인 자철석은 각각 세 시기에 걸쳐 정출되었으며 후기로 가면서 함량이 점차 감소한다. 자철석에 대한 전자현미분석결과 Ti, V은 미량 검출되지만 초기에서 후기로 가면서 증가하는 경향을 보여준다. 반면, Mg, Mn은 뚜렷이 감소하는데 이는 일반적인 카보나타이트질 마그마 분화특성을 잘 나타낸다. Al 또한 카보나타이트와 포스코라이트에서 감소하는 경향을 보여주며, Cr은 대부분 검출한계 미만을 나타내나 후기 포스코라이트에 와서는 미량 정출된다. 자철석은 초기에는 Fe²⁺가 주로 Mg²⁺와 Mn²⁺에 의해 치환되고, Fe³⁺는 Al³⁺에 의한 치환되는 양상이 주를 이루었으나 후기에 와서는 감소하면서 거의 순수한 자철석 조성을 갖게 된다. V의 증가와 Mn의 감소는 마그마 분화가 산소분압이 점차 감소하는 환경에서 진행되었음을 나타내고, 감람석, 금운모의 부재와 더불어 자철석의 Mg, Al, Cr 및 Ti 원소들의 함량이 낮은 것은 홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체가 결빙된 모마그마로부터 생성되었음을 지시한다. 특히, 후기로 가면서 철질 탄산염광물과 석영의 산출이 두드러지면서 전형적인 카보나타이트-포스코라이트 복합체에 비해 연구지역 자철석의 Mg 함량이 적게 산출되는 것은 마그마 분화가 최후기까지 진행되었음을 시사한다.

주요어 : 홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체, 자철석, 전자현미분석, 광물화학

ABSTRACT : Magnetite, a major constituent mineral of the Hongcheon carbonatite-phoscorite complex, was produced over three stages in each rock type and decreased in quantity toward the late stage. Electron microprobe analyses for magnetite revealed that Ti and V were detected in traces, but showed increasing tendency from early to late stage. On the contrary, Mg and Mn decreased distinctly, and it is the general differentiation trend of carbonatitic magma. Al also showed decreasing tendency in carbonatite and phoscorite, and Cr was mostly below detection limit except late phoscorite. In early

*Corresponding author: +82-41-850-8509, E-mail: shin@kongju.ac.kr

stage, Fe^{2+} was largely replaced by Mg^{2+} and Mn^{2+} , and Fe^{3+} by Al^{3+} in magnetite, but it has nearly pure composition in late stage. Tendency of increase in V and decrease in Mn toward late stage represents that magma differentiation progressed under the condition of decreasing oxygen fugacity. Low concentrations of Mg, Al, Cr and Ti, as well as the absence of olivine and phlogopite, suggest that the Hongcheon carbonatite-phoscorite complex was generated from depleted magma. Especially, lower concentrations of Mg in magnetite compared to other typical carbonatite-phoscorite complex, and abundant occurrence of Fe-carbonate minerals and quartz in late stage, suggest that magma differentiation of the Hongcheon carbonatite-phoscorite proceeded to the latest stage.

Key words : Hongcheon carbonatite-phoscorite complex, magnetite, electron microprobe analysis, mineral chemistry

서 론

카보나타이트-포스코라이트 복합체(carbonatite-phoscorite complex)는 전 세계적으로 약 20여 개소에서 드물게 산출되며, 희토류 및 희유원소를 포함하는 광물들이 산출되어 암석학적 혹은 광상학적으로 중요한 암체로 여겨지고 있다. 카보나타이트는 국제지질과학연합회(IUGS)에서 분류한 기준에 따르면 탄산염광물을 50 wt.% 이상 함유하는 화성기원암이며 관입암과 분출암의 형태로 산출되기도 한다. 초기에는 Ca가 우세한 칼시오카보나타이트(calcio-carbonatite) 조성을 갖고 분화가 진행될수록 Mg가 우세한 마그네시오카보나타이트(magnesian-carbonatite) 영역에 이르고 분화 후기에 이르러서는 Fe가 우세한 페로카보나타이트(ferro-carbonatite)를 형성한다(Streckeisen, 1980). 분출암 형태로는 Na가 우세한 네트로카보나타이트(nätro-carbonatite)로서 아프리카 탄자니아에 위치한 올도이노 령가이(Oldoinyo Lengai) 화산에서 산출된다(Dawson, 1962; Kjarsgaard and Hamilton, 1989). 포스코라이트는 카보나타이트와 함께 산출되는 암석으로 주구성광물은 자철석, 인회석, 감람석으로 구성되며 부구성광물로 탄산염광물을 포함하는 암석이다(Le Maitre, 2002). 대표적으로 러시아 콜라반도(Kola Peninsula)의 카보나타이트-포스코라이트 복합체를 들 수 있다(Woolley, 1989).

국내에서는 유일하게 강원도 홍천군 자은리 일대 선패브리야기 편마암 내에 배태되어 있으며, 과거 철광상으로 개발되기도 하였다. 이 암체에 대하여는 그동안 철 및 희토류 광화작용에 관한 광상학적 연구와 더불어 암체의 기원 및 특징에 관한 암석기재학 및 암석화학적 연구가 진행되어 왔다(Kim *et al.*, 1966; Park and Hwang, 1995; Lee,

1998; Kim *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2002; Park and Lee, 2003; Kim *et al.*, 2005; Oh *et al.*, 2010). 이 암체의 성인과 관련하여 퇴적변성기원(Kim *et al.*, 1996)으로 보는 견해가 있었으나, Kim *et al.* (2001)는 다양한 탄산염광물을 포함하는 이 암체의 독특한 암상을 근거로 카보나타이트일 가능성을 제시하였고 이후 연구자들에 의해서 화성기원 암체로 간주되어 오고 있다(Lee *et al.*, 2002; Park and Lee, 2003; Kim *et al.*, 2005). 특히, Park and Lee (2003)는 연구지역 카보나타이트에서 자철석이 우세하게 산출되는 가운데 다양한 탄산염광물이 기질부를 이루는 철광체에 대해 러시아의 코브도(Kovdor)와 핀란드의 속리(Sokli) 지역에서 산출되는 포스코라이트에 해당한다고 언급한 바 있다. 이후 Oh *et al.* (2010)는 구성광물, 조직 및 산출양상 등에 대한 연구를 바탕으로 카보나타이트-포스코라이트 복합체의 암석기재학적 특징을 제시하고 이들의 분화 특성을 해석한 바 있다.

카보나타이트와 포스코라이트를 구성하는 주요 광물인 자철석의 화학조성은 철-티탄 산화광물과 더불어 마그마의 분화특성을 지시하는 도구로 활용되어 왔다(Mitchell, 1978; Haggerty, 1991, 1994; Lee *et al.*, 2005). 이에 본 연구에서는 홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체를 구성하는 자철석의 화학조성을 제시하고, 정출시기에 따른 변화양상을 통하여 복합체의 분화 특성을 파악하고자 한다.

지질 및 암석기재학

지질개요

연구지역은 행정구역상 강원도 홍천군 두촌면 자은리와 천현리에 속하며 지질학적으로는 경기면

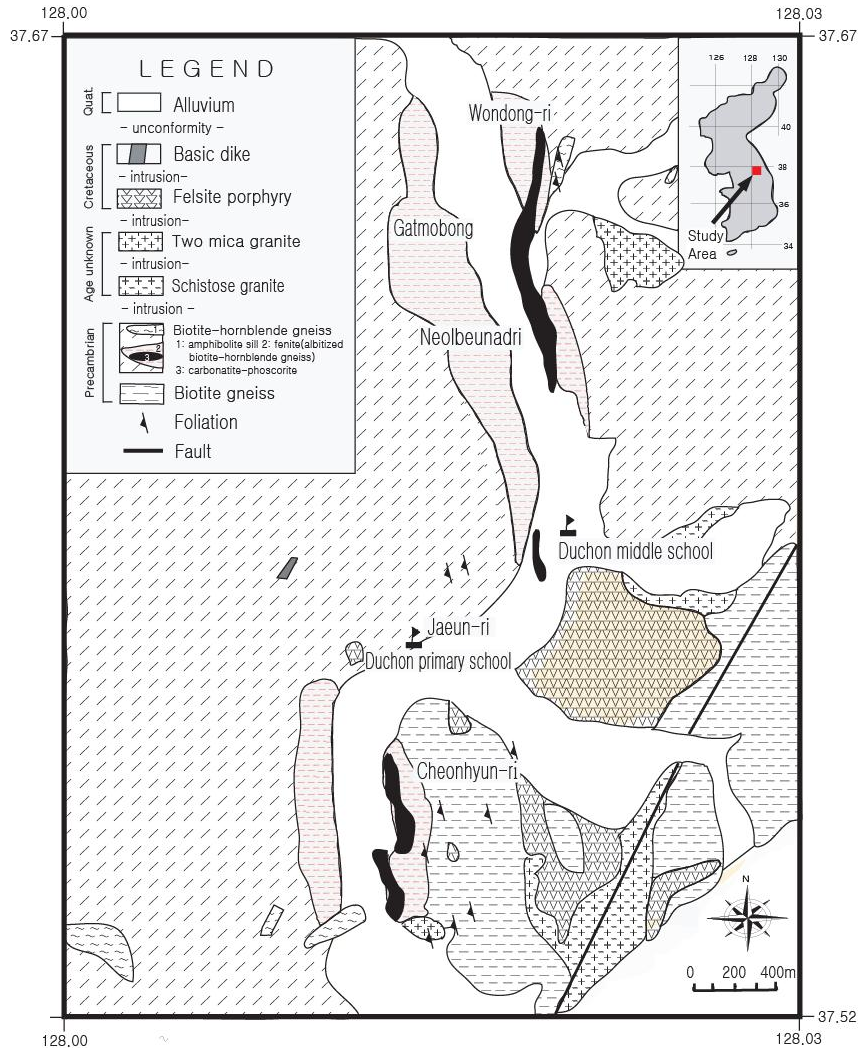


Fig. 1. Geological map of the Hongcheon Fe-REE deposits (Oh *et al.*, 2010).

성암 복합체에 해당하는 선캠브리아기의 흑운모 편마암과 흑운모-각섬석 편마암이 발달하고, 이를 관입한 중생대 화강암류와 백악기 규장질암과 소규모 염기성 암맥으로 구성되어 있다(그림 1). 이 지역의 지질은 선행연구를 통해 자세히 보고된 바 있다(Shin *et al.*, 1975; Lee and Lee, 1989; Lee *et al.*, 1991; Cho and Kim, 1993).

흑운모 편마암은 연구지역을 가로지르는 장남천의 동부에 주로 분포하며, 석영과 장석이 주를 이루는 우백대와 흑운모로 주로 구성된 우흑대의 편리가 발달되어 있으며 전체적으로 갈색 내지 암갈색을 띤다. 흑운모-각섬석 편마암은 장남천 서부에

분포하며 주구성광물은 흑운모, 각섬석, 사장석이고 석영은 드물게 산출된다. 육안상 조립질 내지 중립질로 흑운모 및 각섬석이 선상배열을 하고 있어 엽리가 현저하며 국부적으로 각섬석의 농집대나 각섬암을 협재한다. 편마상 화강암은 연구지역 남동부에 분포하는데 조립질의 편리가 발달하며 흑운모 편마암을 관입하였고 규장반암의 관입을 받았으며, 심한 변질작용으로 인해 견운모, 녹니석, 녹염석, 황철석 등의 이차 변질광물이 산출된다. 흑운모 화강암은 연구지역 북부와 남부 2개소에서 소규모로 산출되는데, 연구지역 동부에 넓게 발달하는 중생대 화강암 저반에서 파생된 것으로 보이

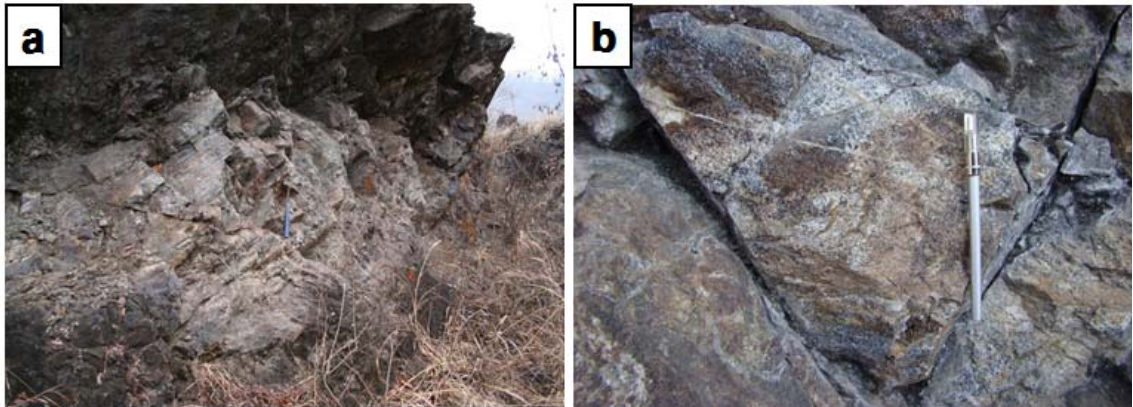


Fig. 2. Occurrences of carbonatite-phoscorite rocks showing banded (a) and intermingled (b) pattern in the Hongcheon Fe-REE deposits.

며 조립 내지 중립질을 이루고 석영, 사장석, 흑운모, 각섬석과 소량의 인회석, 저어콘을 수반한다. 규장반암은 자운부락 동쪽에 소규모로 분포하며 미정질의 석리와 자형 내지 반자형의 장석과 석영이 반정을 이루며, 소량의 견운모가 수반된다. 염기성 맥암은 연구지역 곳곳에 확인되며 신선한 부분은 암회색을 띠나 대부분 변질 받아 담록색을 나타낸다. 전체적으로 분결맥 형태의 방해석 세맥이 발달하며 반상조직이 발달한다.

카보나타이트-포스코라이트 복합체

홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체는 장남천을 따라서 남북방향으로 총 3개소에서 단속적인 형태로 산출되며 이들 중 중부암체는 하상을 따라 소규모로 산출된다(그림 1). 연구지역의 북부암체는 산 능선과 하상을 따라 분포하며 하상광체는 NS 주향과 30°W 경사를 나타낸다. 산 능선 광체의 북쪽에는 이 지역 기반암인 흑운모 편마암이 분포하며 중단부에는 석영과 장석질이 우세한 페나이트(fenite)가 산출된다. 북부암체는 도로 개설로 인하여 남북방향으로 절단되어 있으며 광체의 일부분이 노천으로 드러나 손실되어 있는 형태를 보인다. 남부암체는 북부암체에 비해 규모가 크며 남북방향으로 50~55°W 경사를 보이며 길게 발달하고 있다. 남부암체는 과거 자운-철광상으로 개발된 지역으로 노천 채굴한 흔적이 남아있다. 이 암체의 오른쪽에는 기반암인 흑운모 편마암이 분포하며 이들 내에 관입한 암상으로 배태되어 있고 흑운모

편마암 사이에는 페나이트가 분포하며 대부분 풍화에 의해 손실되거나 변질받은 형태로 나타난다.

연구지역 카보나타이트와 포스코라이트 암체는 서로 다양한 조직적 관계를 보이며 산출된다. 탄산염광물이 우세한 밝은 부분의 카보나타이트와 자철석 및 인회석이 괴상으로 산출되는 어두운 부분의 포스코라이트가 상호 교호하는 층상구조를 이루거나 불균질한 혼합상 혹은 패치(patch) 형태로 산출되기도 한다(그림 2). 두 암상의 경계는 뚜렷하거나 혹은 점이적으로 변하는 등 일정하지 않으나 서로 끊고 끊기는 관계를 보여주고 있다(Oh *et al.*, 2010).

자철석의 산출

Oh *et al.* (2010)에 의하면 연구지역 카보나타이트와 포스코라이트는 각각 세 차례에 걸쳐 정출이 이루어졌는데 카보나타이트는 초기는 돌로마이트와 자철석, 중기에는 철질 돌로마이트, 모나자이트, 인회석 및 자철석이 주를 이루고 후기에 와서는 석영과 더불어 Fe가 부화된 철질 탄산염광물로 앵커라이트와 능철석이 주를 이루면서 산출된다. 반면, 포스코라이트는 초기에는 자철석과 돌로마이트, 중기에는 인회석, 자철석 및 철질 돌로마이트가 주를 이루고, 후기에 와서는 석영, 앵커라이트 및 자철석이 주로 수반된다. 자철석은 거의 대부분의 정출 시기에 주광물로 산출되며, 산점상 혹은 집합체를 형성한다(그림 3).

카보나타이트는 초기에는 자철석이 돌로마이트

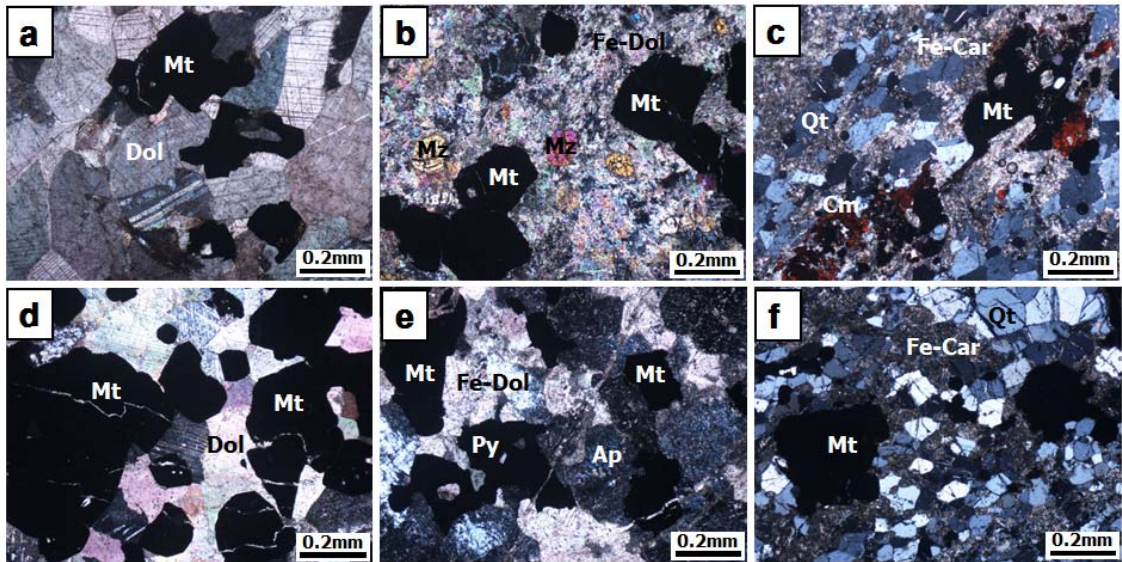


Fig. 3. Photomicrographs of carbonatite (a-c) and phoscorite (d-f) rocks from stage I to III, respectively. Carbonatite: (a) dolomite and magnetite in stage I, (b) main REE mineralization in stage II, (c) abundant occurrence of quartz and Fe-carbonate in stage III, Phoscorite: (d) magnetite and dolomite in stage I, (e) main occurrence of apatite in stage II, (f) abundant quartz and Fe-carbonate in stage III. Abbreviations: Dol: dolomite, Mt: magnetite, Mz: monazite, Ap: apatite, Qtz: quartz, Cm: columbite, Py: pyrite.

에 비해 소량 산출되며, 반자형 내지 타형을 이루며 대체로 0.2 mm 이하의 크기를 보이거나 1 mm가 넘는 경우도 관찰된다. 이들 자철석 결정 내에서는 미세한 균열조직이 발달한 경우도 관찰된다. 중기 자철석은 초기에 비해 세립질로 소량 산출되며 탄산염광물에 의해 교대된 조직을 보이거나 균열 면이 발달한다. 다량의 석영이 탄산염광물과 함께 정출되는 후기 자철석은 현저히 줄어들어 소량 산출되며 반자형 내지 타형을 이룬다.

포스코라이트의 경우 자형 내지 반자형을 보이는 초기 자철석이 중립 내지 조립질로 다량 산출되는데 일부는 능철석으로 교대작용을 받아 있다. 자철석에는 균열 면이 흔히 관찰되어 자철석이 탄산염광물 이전에 정출되었음을 시사하며, 이는 탄산염광물 생성시기에 CO₂가 풍부한 가스에 의한 과쇄작용의 영향을 받은 것으로 보인다. 중기 자철석은 인회석과 함께 포스코라이트 중기 정출작용의 주 구성광물로 산출되며 초기에 비해 적은 함량을 보인다. 반자형 내지 타형을 이루는 가운데 대부분 균열을 보이며 일부는 탄산염에 의해 교대되어 능철석화 되어 있다. 자철석은 모든 정출시기에 걸쳐 주 구성광물로 산출되지만 초기와 중기보다 후기

에 전체적인 함량은 감소한다(Oh *et al.*, 2010).

연구방법

화학성분 변화를 통한 복합체의 분화양상을 파악하기 위해 카보나타이트와 포스코라이트 암석의 초기, 중기 및 후기에 해당하는 자철석을 대상으로 전자현미분석을 실시하였다. 분석은 한국기초과학지원연구원 전주센터의 SHIMADZU사 EPMA 1600를 이용하였다. 분석조건은 15 kV 전압, 10 nA 전류, 3 μm의 빔(beam) 직경이다. 표준물질로 Si와 Al은 남정석, Fe는 황철석, Mg는 MgO, Mn은 장미휘석(rhodonite), Ti는 금홍석, V과 Cr은 금속원소를 사용하였다. 검출한계는 0.001 wt.% 이하이며, ±0.5%의 오차범위를 갖는다.

광물화학

카보나타이트와 포스코라이트에 산출되는 자철석에 대한 전자현미분석 결과를 종합하면 표 1과 같다. 카보나타이트의 초기 자철석은 TiO₂ 함량이 0.03 wt.% 이하이며, Al₂O₃은 0.04~0.65 wt.%

Table 1. Representative chemical composition of magnetite from the Hongcheon Fe-REE deposits

Sample	HC06-4A	HC06-4A	HC06-4A	HC06-4A	HC06-4A	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC04-11	HC10-7	HC10-7	HC10-7
Rock type	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C2	C2	C2
SiO ₂	0.02	0.02	0.04	0.06	0.04	0.08	0.08	0.01	0.04	0.01	0.06	0.02	0.05	0.07	0.02	0.05	0.02	0.05	0.01	0.04
TiO ₂	0.01	0.00	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.00	0.03	0.03	0.07	0.05	0.08
Al ₂ O ₃	0.06	0.04	0.05	0.16	0.04	0.35	0.17	0.50	0.25	0.65	0.59	0.57	0.11	0.12	0.20	0.33	0.30	0.24	0.22	0.24
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.06	0.06	0.01	0.00	0.00
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02
Fe ₂ O ₃	68.65	68.28	68.58	68.20	68.29	68.36	68.85	68.45	68.71	68.12	68.04	68.11	68.64	69.01	68.91	68.45	68.57	68.52	68.37	68.36
FeO	30.99	30.79	31.01	30.96	30.89	30.90	30.70	30.51	30.39	30.36	30.95	30.71	30.37	30.66	30.72	30.97	30.88	31.20	30.97	31.17
MgO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.20	0.30	0.37	0.44	0.41	0.11	0.22	0.37	0.32	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.07	0.06	0.07	0.09	0.07	0.05	0.07	0.09	0.45	0.25	0.28	0.02	0.05	0.02
Total	99.76	99.15	99.71	99.42	99.29	99.93	100.18	99.94	99.96	99.68	99.84	99.71	99.62	100.29	100.41	100.17	100.14	100.15	99.70	99.96
Number of cations on the basis of 4 oxygens																				
Si	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.000	0.002
Ti	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002
Al	0.003	0.002	0.002	0.007	0.002	0.016	0.008	0.023	0.011	0.030	0.027	0.026	0.005	0.005	0.009	0.015	0.014	0.011	0.010	0.011
Cr	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000
V	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Fe ³⁺	1.995	1.996	1.993	1.987	1.993	1.976	1.986	1.975	1.983	1.968	1.967	1.971	1.990	1.988	1.987	1.977	1.982	1.980	1.985	1.979
Fe ²⁺	1.001	1.000	1.002	1.002	1.002	0.993	0.984	0.978	0.975	0.975	0.994	0.988	0.979	0.982	0.984	0.994	0.992	1.002	0.999	1.003
Mg	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.011	0.017	0.021	0.025	0.023	0.006	0.012	0.021	0.018	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.015	0.008	0.009	0.001	0.002	0.001

FeO and Fe₂O₃ are calculated by Droop's(1987) method. C1-3: early, middle, late carbonatite, P1-3: early, middle, late phosphorite, respectively

(평균 0.26 wt.%) 함량을 보인다. Cr₂O₃는 대부분 검출한계 미만으로 나타나나 일부 시료에서는 0.08 wt.%에 이르고, V₂O₃도 최대 0.02 wt.%로 대부분 검출한계 미만으로 나타난다. MgO는 0.44 wt.% 미만(평균 0.17 wt.%), MnO는 최대 0.45 wt.%(평균 0.09 wt.%) 함량을 보여준다. 중기 자철석의 TiO₂ 함량은 0.02~0.08 wt.%로서 초기에 비해 약간 증가했으나, Al₂O₃는 0.06~0.28 wt.%(평균 0.18 wt.%)로서 초기에 비해 약간 감소했다. Cr₂O₃는 초기와 마찬가지로 대부분 검출한계 미만으로 나타났으나 일부 시료에서는 0.13 wt.%에 이르기 도 한다. V₂O₃는 초기 자철석에 비해 다소 증가한 평균 0.01 wt.% 함량을 보인다. MgO 함량은 최대 0.07 wt.%로서 초기 카보나타이트에 비해 낮은 값을 보여주며, MnO는 한 개 시료에서만 0.39 wt.%로 높게 나타나고 나머지는 0.07 wt.% 미만의 낮은 함량을 보여준다. 후기 자철석의 TiO₂ 함량은

0.02~0.09 wt.%로서 중기와 유사하나, Al₂O₃는 0.01~0.04 wt.% (평균 0.03 wt.%)로서 감소한다. Cr₂O₃는 초기 및 중기 자철석과 같이 대부분 검출 한계 미만으로 나타났고, V₂O₃는 중기에 비해 증가한 0.02~0.09 wt.% (평균 0.06 wt.%) 함량을 보인다. MgO 함량은 최대 0.02 wt.%로서 중기보다도 더 낮은 값을 보여주며, MnO는 검출한계 미만으로 나타났다.

포스코라이트의 경우 초기 자철석은 TiO₂ 함량이 0.04 wt.% 미만, Al₂O₃는 최대 0.34 wt.% (평균 0.22 wt.%)로서 초기 카보나타이트와 유사하며, Cr₂O₃도 대부분 검출되지 않는 가운데 일부 시료에서 0.01~0.02 wt.% 값을 보인다. V₂O₃도 대부분 검출한계 미만으로 나타나고 두 개 시료에서 각각 0.02 wt.%, 0.04 wt.%를 나타낸다. MgO 함량은 일부 극미량인 경우를 제외하고 대부분 0.38~0.69 wt.% (평균 0.38 wt.%)로서 카보나타이트의

Table 1. (continued)

Sample	HC10-7	HC10-7	HC10-7	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10-6A	HC10B-2HC-10B-2HC-10B-2	HC10B-2HC-10B-2HC-10B-2	HC10B-2HC-10B-2HC-10B-2	
Rock type	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C2	C3	C3	C3	
SiO ₂	0.05	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.03	0.07	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.07	0.01	0.05			
TiO ₂	0.06	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.09	0.02	
Al ₂ O ₃	0.19	0.27	0.24	0.06	0.14	0.06	0.08	0.18	0.22	0.18	0.17	0.12	0.14	0.17	0.18	0.14	0.16	0.04	0.03	0.01		
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.08	0.13	0.00	0.07	0.05	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00		
V ₂ O ₃	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.09	0.06		
Fe ₂ O ₃	68.20	68.47	68.77	68.60	69.03	68.54	68.73	68.48	68.84	68.96	68.24	68.63	68.51	68.58	68.63	69.04	69.07	68.32	67.96	68.07		
FeO	31.04	31.13	31.14	30.94	31.16	31.01	31.19	31.24	30.82	31.20	30.87	30.99	31.06	31.04	31.00	31.22	31.20	31.00	30.99	30.90		
MgO	0.01	0.01	0.05	0.03	0.01	0.04	0.04	0.00	0.03	0.04	0.00	0.01	0.02	0.04	0.04	0.02	0.07	0.02	0.01	0.00		
MnO	0.02	0.00	0.00	0.05	0.06	0.00	0.03	0.00	0.39	0.01	0.06	0.07	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00		
Total	99.60	99.96	100.25	99.75	100.49	99.72	100.36	100.10	100.47	100.45	99.45	99.90	99.81	100.00	99.94	100.48	100.61	99.50	99.18	99.11		
Number of cations on the basis of 4 oxygens																						
Si	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.003	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.002			
Ti	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001		
Al	0.008	0.012	0.011	0.003	0.006	0.003	0.013	0.008	0.010	0.008	0.008	0.005	0.006	0.008	0.008	0.006	0.007	0.002	0.001	0.001		
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
V	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.002		
Fe ³⁺	1.983	1.983	1.985	1.993	1.990	1.991	1.982	1.981	1.983	1.988	1.988	1.990	1.988	1.986	1.989	1.990	1.987	1.989	1.985	1.989		
Fe ²⁺	1.003	1.002	0.999	0.999	0.998	1.001	1.000	1.004	0.987	0.999	0.999	0.999	1.002	0.999	0.998	1.000	0.998	1.003	1.006	1.004		
Mg	0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.004	0.001	0.000	0.000		
Mn	0.001	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.001	0.000	0.013	0.000	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000		

초기 자철석에 비해 높은 값을 나타내며, MnO 또한 최대 3.33 wt.% (평균 1.98 wt.%)로서 카보나타이트보다 현저히 높다. 포스코라이트의 중기 자철석의 경우 TiO₂ 함량은 최대 0.08 wt.%로서 초기 자철석에 비해 약간 증가한 값을 보이고, Al₂O₃는 초기 자철석과 비슷한 0.02~0.52 wt.% (평균 0.24 wt.%) 조성 범위를 갖는다. Cr₂O₃는 대부분 검출한계 미만을 나타내며, V₂O₃도 미량이지만 초기 자철석보다는 증가한 평균 0.02 wt.% 함량을 보인다. MgO 함량은 초기보다 줄어든 0.43 wt.% 미만(평균 0.09 wt.%)의 조성을 보이며, MnO 또한 0.33 wt.% 미만으로 초기에 비해 적게 포함된다. 후기에 와서 TiO₂ 함량은 0.04~0.28 wt.% (평균 0.13 wt.%)로서 중기에 비해 현저히 증가한 값을 보이고, Al₂O₃는 중기보다 약간 감소한 0.07~0.28 wt.% (평균 0.17 wt.%) 조성을 갖는다. 반면, Cr₂O₃는 0.06~0.16 wt.% (평균 0.10 wt.%)로서 초기 및 중기보다 높은 함량을 보이며 후기 카보나타이트의 자철석보다도 많은 함량을 나타낸다. V₂O₃

도 미량이지만 중기보다 증가한 평균 0.08 wt.% 함량을 보인다. MgO와 MnO는 대부분 검출한계 미만으로 초기 및 중기에 비해 줄어든 값을 뚜렷이 나타낸다.

이러한 분석결과를 종합하면 Mg 함량은 카보나타이트와 포스코라이트 모두 초기에서 후기로 가면서 감소하는 경향이 뚜렷이 나타나고, Ti은 반대로 후기로 가면서 증가하는 경향을 보여준다. Al은 후기로 가면서 대체로 감소하는데, 특히 카보나타이트에서 그러한 경향이 뚜렷하다. Cr은 포스코라이트의 경우 중기까지는 0.02 wt.% 미만으로 검출되나 후기에 와서 증가한 양상을 보이고, 카보나타이트에서는 일부 시료에서 0.1 wt.% 이상의 함량을 보이기도 하나 대부분 검출한계 미만이거나 극미량 산출된다. Mn은 전체적으로 포스코라이트에서의 함량이 높은 편이나 초기에서 후기로 가면서 포스코라이트와 카보나타이트 모두에서 뚜렷이 감소하는 경향을 보인다.

Table 1. (continued)

Sample	HC04-5	HC04-5	HC04-5	HC10-5	HC10-5	HC10-5	HC10-5	HC10-5	HC10-5	HC10-5	HC10-5	HC10-11	HC10-11	HC10-11	HC10-11	HC10-11	HC10-11	
Rock type	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P1	P2	P2	P2	P2	P2	P2	
SiO ₂	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.03	0.00	
TiO ₂	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.08	0.06	0.08	0.07	
Al ₂ O ₃	0.26	0.17	0.00	0.25	0.22	0.30	0.34	0.34	0.22	0.24	0.07	0.18	0.05	0.40	0.30	0.52	0.27	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	
V ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02	0.04	0.03	0.02	
Fe ₂ O ₃	68.42	68.76	68.97	69.24	68.66	69.56	68.55	68.77	68.59	68.54	68.96	68.34	68.48	68.22	68.45	67.85	68.52	
FeO	30.94	31.08	30.99	26.81	27.47	27.10	27.18	27.42	27.42	28.31	28.84	30.99	30.97	31.13	30.99	30.73	31.19	
MgO	0.02	0.01	0.02	0.66	0.48	0.69	0.53	0.51	0.45	0.38	0.41	0.00	0.01	0.00	0.06	0.16	0.00	
MnO	0.01	0.02	0.05	3.33	2.73	3.24	2.95	2.87	2.83	2.17	1.59	0.03	0.11	0.14	0.13	0.17	0.03	
Total	99.67	100.07	100.04	100.31	99.59	100.94	99.58	99.93	99.54	99.70	99.92	99.63	99.73	100.02	100.03	99.57	100.09	
Number of cations on the basis of 4 oxygens																		
Si	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
Al	0.012	0.007	0.000	0.011	0.010	0.013	0.016	0.015	0.010	0.011	0.003	0.008	0.002	0.018	0.013	0.024	0.012	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
V	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	
Fe ³⁺	1.987	1.990	1.999	1.988	1.988	1.984	1.983	1.983	1.988	1.984	1.994	1.987	1.990	1.973	1.979	1.967	1.982	
Fe ²⁺	0.999	1.000	0.998	0.855	0.884	0.859	0.874	0.879	0.883	0.911	0.927	1.001	1.000	1.000	0.996	0.990	1.003	
Mg	0.001	0.000	0.001	0.038	0.028	0.039	0.030	0.029	0.026	0.022	0.023	0.000	0.001	0.000	0.004	0.009	0.000	
Mn	0.000	0.001	0.002	0.108	0.089	0.104	0.096	0.093	0.092	0.071	0.052	0.001	0.004	0.005	0.004	0.006	0.001	

카보나타이트-포스코라이트 복합체의 분화

화성기원의 카보나타이트에 산출되는 자철석은 콜라반도(Kola Peninsula)의 경우와 같이 Ti 함량이 1~2 wt.% 가량으로 높은 경우도 있으나(Lee *et al.*, 2005), 대부분 낮게 산출되고, 반면 Mg와 Al 함량은 상당히 높은 것으로 알려져 있다(Kukhareenko *et al.*, 1965; Prins, 1972; Secher and Larsen, 1980; Gapar and Wyllie, 1983). 홍천 카보나타이트와 포스코라이트 복합체의 자철석의 경우 일부 시료를 제외하고는 Ti 함량이 적고(<0.1 wt.%), Mg와 Al 또한 상당히 낮은 조성을 보이면서 기존 암체와는 다소 차이를 나타낸다. 일반적으로 카보나타이트는 분화가 진행됨에 따라 자철석의 Mg, Ti이 점차 감소하고, Al, Mn은 감소, 증가 혹은 일정하게 유지되는 경향을 보이는데(Prins, 1972; Gaspar and Wyllie, 1983; Dawson *et al.*, 1996; Chakhmouradian and Zaitsev, 1999; Karchevsky and Moutte, 2004; Lee *et al.*, 2005), 연

구지역이 홍천 희토류 광상의 자철석은 카보나타이트와 포스코라이트의 정출 과정에서 후기로 갈수록 Ti는 미약하게 증가하고, Al, Mg, Mn은 감소하는 양상을 나타낸다.

한편, Fe²⁺/(Fe²⁺+Mg) 비는 카보나타이트와 포스코라이트 모두 정출 초기에서 후기로 가면서 증가하는 양상을 보인다(그림 4). 이는 자철석이 암종과 정출시기에 따라 Mg, Mn, Al, Ti 등에 의한 치환 정도의 변화가 있었던 것으로 볼 수 있다. Fe³⁺, Fe²⁺O₄ 조성을 갖는 초기 정출된 자철석은 Fe²⁺가 주로 Mg²⁺와 Mn²⁺에 의해 치환되고, Fe³⁺는 Al³⁺에 의한 치환되는 양상이 주를 이루었으나 정출 후기에 와서는 치환작용이 감소하면서 거의 순수한 자철석 조성을 갖게된 것으로 보인다(그림 5). Fe³⁺/(Fe²⁺+Fe³⁺) 비는 카보나타이트에서 Ti 함량에 따른 변화가 거의 없이 일정한 값을 나타내는 반면 포스코라이트에서는 Fe³⁺에 의한 치환이 초기 자철석에서 일부 강하게 존재하였음을 보여준다.

카보나타이트와 포스코라이트의 자철석에는 생

Table 1. (continued)

Sample	HC10-11	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC10-6B	HC0627	HC0627	HC0627	HC0627	HC0627	HC0627
	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B	-19B
Rock type	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P2	P3	P3	P3	P3	P3	P3
SiO ₂	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.01
TiO ₂	0.07	0.01	0.02	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.28	0.25	0.08	0.11	0.10	0.06	0.04
Al ₂ O ₃	0.15	0.02	0.22	0.15	0.16	0.35	0.28	0.32	0.14	0.33	0.17	0.18	0.19	0.24	0.28	0.08	0.07
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.12	0.13	0.10	0.08	0.07	0.16	0.06
V ₂ O ₃	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.04	0.09	0.13	0.07	0.09	0.10	0.02	0.07
Fe ₂ O ₃	68.66	69.07	69.09	68.67	68.87	68.98	68.76	68.47	68.68	68.38	67.55	67.26	68.07	68.00	67.60	68.00	67.98
FeO	30.64	31.15	31.29	31.02	31.06	30.52	30.32	31.02	31.05	30.86	31.43	31.33	31.22	31.29	31.23	30.92	30.95
MgO	0.14	0.02	0.01	0.00	0.07	0.39	0.43	0.02	0.02	0.14	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
MnO	0.33	0.00	0.03	0.00	0.03	0.14	0.16	0.02	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.04	100.30	100.68	99.85	100.25	100.42	100.00	99.85	99.94	99.83	99.66	99.28	99.75	99.84	99.42	99.25	99.18
Number of cations on the basis of 4 oxygens																	
Si	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
Ti	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.007	0.002	0.003	0.003	0.002	0.001
Al	0.007	0.001	0.010	0.007	0.007	0.016	0.013	0.014	0.007	0.015	0.008	0.008	0.009	0.011	0.013	0.003	0.003
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.005	0.002
V	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.003	0.004	0.002	0.003	0.003	0.001	0.002
Fe ³⁺	1.986	1.996	1.987	1.993	1.989	1.982	1.984	1.984	1.991	1.980	1.962	1.961	1.976	1.971	1.968	1.984	1.986
Fe ²⁺	0.985	1.000	1.000	1.000	0.997	0.974	0.972	0.999	1.000	0.993	1.014	1.015	1.007	1.008	1.010	1.003	1.005
Mg	0.008	0.001	0.000	0.000	0.004	0.022	0.024	0.001	0.001	0.008	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Mn	0.011	0.000	0.001	0.000	0.001	0.005	0.005	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

성초기에 Ti를 함유한 울보스피넬(ulvospinel)이 용리조각을 이루며 산출되고, 후기로 가면 순수한 조성을 가지는 티탄철석이 정출되는 특징이 있다 (Lee *et al.*, 2005; Reguir *et al.*, 2008). 그러나 연구지역 카보나타이트와 포스코라이트에는 울보스피넬이나 티탄철석과 같은 Ti 함유 광물이 관찰되지 않고, 자철석 내 TiO₂ 함량이 최대 0.28 wt.%를 넘지 않는 미량 산출되나 후기로 가면서 약간 증가하는 양상을 보인다. 이러한 특징은 카보나타이트와 포스코라이트 복합체가 전체적으로 낮은 산소분압 환경 하에서 정출되었음을 시사한다. 한편, 카보나타이트질 마그마의 자철석 정출과정에서 산소분압이 감소할 때 V 함량은 증가하고, Mn은 반대로 감소하는 경향을 띠는 것으로 알려져 있다 (Horn *et al.*, 1994; Toplis and Corgne, 2002; Righter *et al.*, 2006; Reguir *et al.*, 2008). 상기한 바와 같이 카보나타이트와 포스코라이트 모두 초기에서 후기로 가면서 미량이지만 V 함량은 증가

하고, Mn은 감소하는 경향을 보여주고 있어서 연구지역 복합체를 형성한 마그마의 분화가 산소분압이 점차 감소하는 환경에서 진행되었음을 나타낸다.

카보나타이트-포스코라이트 암체에는 자철석, 인회석 외에도 감람석이나 금운모가 흔히 포함되는 것으로 알려져 있다 (Le Maitre, 2002; Krasnova *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004, 2005). 그러나 이제까지의 연구결과 홍천 카보나타이트-포스코라이트 암체에서는 감람석이나 금운모의 산출이 보고된 바 없다 (Kim *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2002; Oh *et al.*, 2010). 따라서 이들 광물의 부재나 자철석의 Mg, Al의 함량이 낮은 것은 연구지역 암체를 형성한 모마그마가 원래부터 이들 원소들이 상당히 결핍된 특성을 가졌음을 시사한다. Cr의 경우 Fe³⁺에 잘 치환되는 성질을 갖는 원소이나 (Hom *et al.*, 1994; Righter *et al.*, 2006) 연구지역 자철석의 Cr 함량이 적은 것도 카보나타이트와 포스코라이트가 결

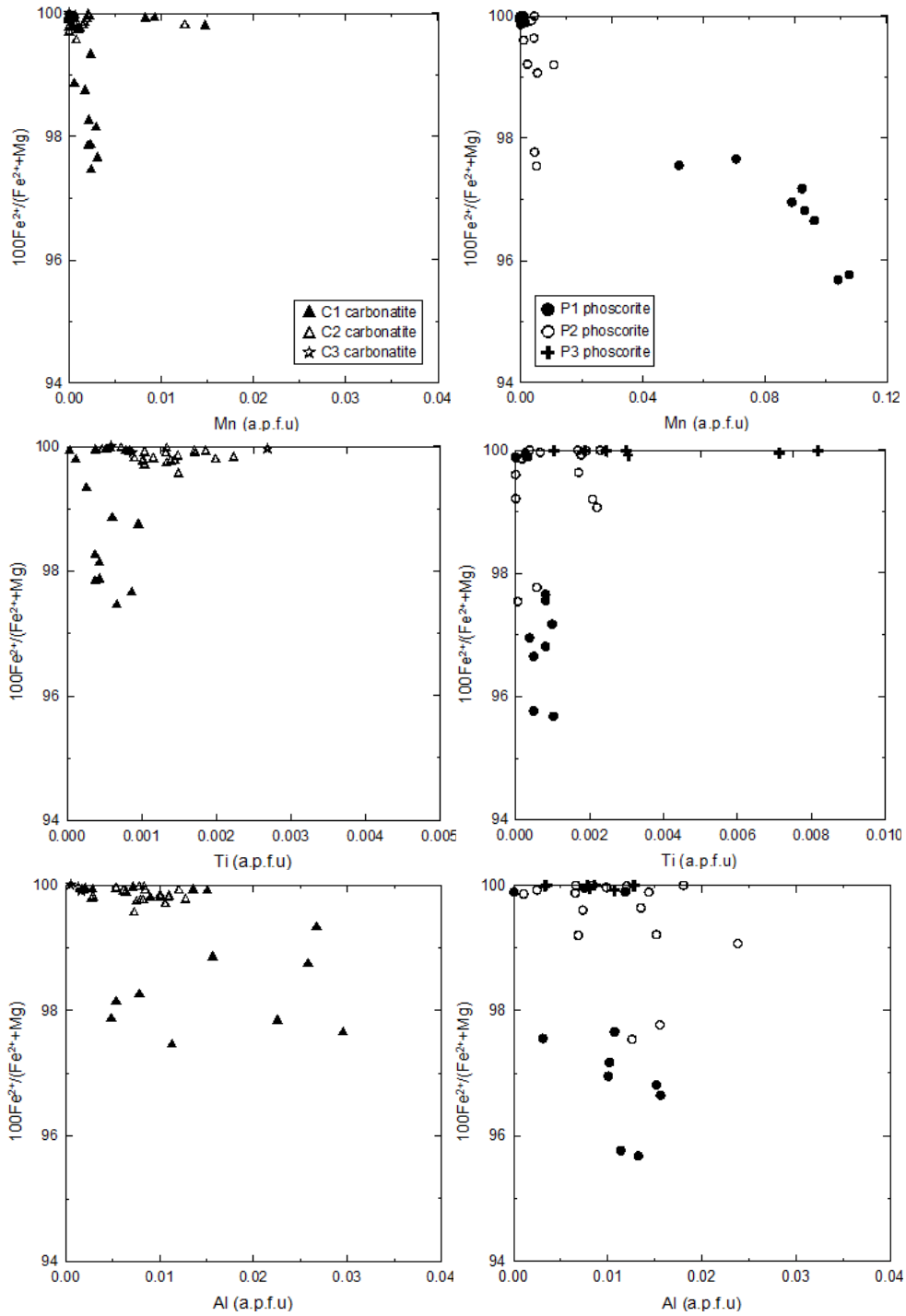


Fig. 4. Compositional variation of $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Mg})$ against Mn, Ti, Al (a.p.f.u.) for magnetite from the Hongcheon Fe-REE deposits.

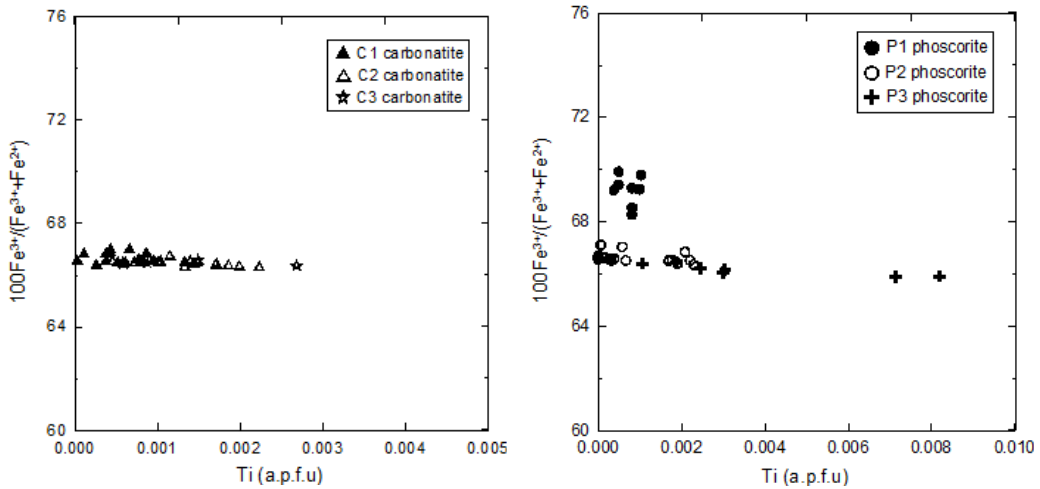


Fig. 5. Compositional variation of $Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Fe^{2+})$ against Ti (a.p.f.u.) for magnetite from the Hongcheon Fe-REE deposits.

핍된 모마그마로부터 생성된 것으로 해석할 수 있다(Kransnova *et al.*, 2004; Reguir *et al.*, 2008).

전세계적으로 대표적인 카보나타이트-포스코라이트 복합체인 러시아 콜라반도에 위치한 코브도(Kovdor)와 브요리야르비(Vuorijarvi), 그리고 핀란드 속리(Sokli) 지역 암체와 비교 도시해본 결과 연구지역 자철석은 이들 지역에 비해 낮은 Mg 함량을 나타낸다(그림 6). 이러한 특징은 홍천 회토류 광상의 카보나타이트와 포스코라이트가 분화단계에 있어 후기까지 진행되었음을 보여준다. Ti 함량이 대단히 낮은 가운데 초기에서 후기로 갈수록 Mg의 함량이 감소하는 경향을 보이는 것은 결정 분화 과정 중 말기의 저온환경에서 나타나는 현상으로 보고된 바도 있다(Gaspar and Wykkie, 1983). 선행 연구에서도 탄산염광물에 대한 전자현미분석 결과 초기에는 돌로마이트 내지 철질 돌로마이트 성분을 보이다가 후기에는 앵커라이트와 같은 철질 탄산염광물이 주를 이루는 등 탄산염광물의 Fe 부화 양상이 두드러지고 또 다량의 석영이 산출됨으로써 카보나타이트질 마그마의 분화 말기에 해당하는 특징을 나타내는 것으로 해석되었다(Mitchell, 2005; Oh *et al.*, 2010).

이와 같이 모마그마의 결핍된 조성과 마그마분화가 최후기까지 진행된 특징으로 인해 연구지역 자철석에는 Mg, Al 및 Ti과 같은 원소들이 미량 산출되는 것으로 해석되며, 아울러 Mg, Mn 함량이 초기에서 후기로 가면서 감소하는 것은 일반적

인 카보나타이트질 마그마 분화특성을 잘 보여준다. 아울러 홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체를 구성하는 자철석의 정출 시기에 따른 미량원소 성분이 카보나타이트와 포스코라이트에서 상호 유사하게 나타나는 것은 자철석이 모마그마가 분별정출작용에 의한 분화과정을 겪으면서 순차적인 용액불혼화작용에 의해 생성되었을 가능성을 뒷받침한다(Oh *et al.*, 2010).

결론

홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체를 구성하는 자철석에 대한 전자현미분석결과 초기에서 후기로 가면서 Mg, Mn은 뚜렷이 감소하고, Al 또한 감소하는 경향을 보이고, Ti와 V는 반대로 후기로 가면서 증가하는 경향을 나타낸다. Cr은 대부분 검출한계 미만을 나타내나 후기 포스코라이트에 와서 미량 정출된다. 이러한 경향은 자철석이 암종과 정출시기에 따라 Mg, Mn, Al, Ti, V, Cr 등에 의한 치환 정도의 변화가 있었던 것으로 볼 수 있다.

$Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ 비는 카보나타이트와 포스코라이트 모두 초기에서 후기로 가면서 증가하는 양상을 보이는데 자철석은 초기에는 Fe^{2+} 가 주로 Mg^{2+} 와 Mn^{2+} 에 의해 치환되고, Fe^{3+} 는 Al^{3+} 에 의해 치환되는 양상이 주를 이루었으나 후기에 와서는 감소하면서 거의 순수한 자철석 조성을 갖게 된다. V의 증가와 Mn의 감소는 마그마 분화가 산소분압

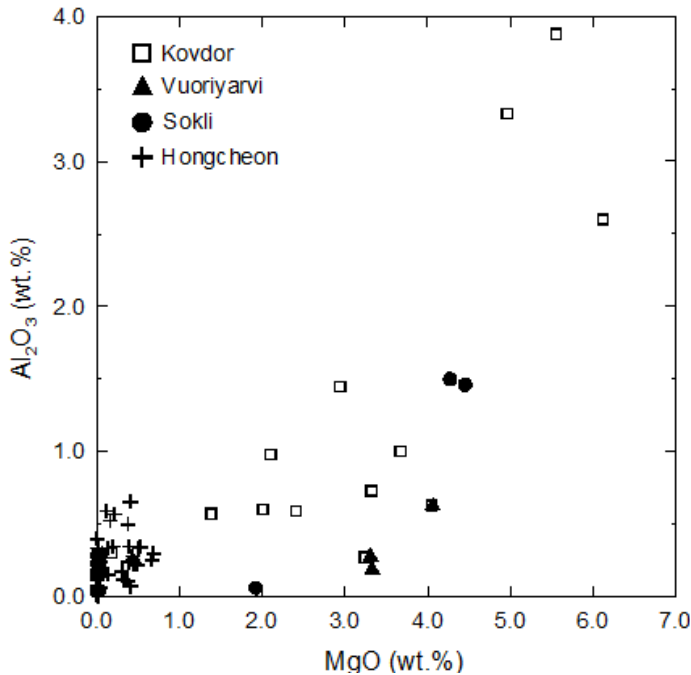


Fig. 6. Compositional variation of Al_2O_3 against MgO for magnetite from the Hongcheon Fe-REE deposits in comparison with Kovdor, Vuoriyarvi, and Sokli complex in Kola peninsula. Data from Krasnova *et al.* (2004), Lee *et al.* (2004), and Karchevsky and Moutte (2004).

이 점차 감소하는 환경에서 진행되었음을 나타내고, 감람석, 금운모의 부재와 더불어 자철석의 Mg, Al, Cr 및 Ti 원소들의 함량이 낮은 것은 홍천 카보나타이트-포스코라이트 복합체가 결핍된 모마그마로부터 생성되었음을 지시한다.

모마그마의 결핍된 조성과 마그마분화가 최후기까지 진행된 특징으로 인해 자철석의 Mg, Al 및 Ti와 같은 원소들이 미량 산출되는 것으로 해석되며, 미량원소조성의 순차적 변화는 일반적인 카보나타이트질 마그마 분화특성을 잘 보여준다.

사 사

본 논문을 심사해 주시고 유익한 비평과 조언을 주신 지세정 박사님과 추창오 박사님께 감사드립니다. 이 논문은 2008년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임(No. 331-2008-1-C00277).

REFERENCES

- Chakhmouradian, A.R. and Zaitsev, A.N. (1999) Calcite-amphibole-clinopyroxene rock from the Afrikanda complex, Kola Peninsula, Russia: mineralogy and a possible link to carbonatites. I. Oxide minerals. *The Canadian Mineralogist*, 37, 177-198.
- Cho, M. and Kim, J.W. (1993) Occurrence of kyanite in the Yongduri gneiss complex of the Chuncheon-Hongcheon area: its tectonometamorphic implication. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 2, 1-8 (in Korean with English abstract).
- Dawson, J.B. (1962) Sodium carbonate lavas from Oldoinyo Lengai, Tanganyika. *Nature*, 195, 1075-1076.
- Dawson, J.B., Steele, I.M., Smith, J.V., and Rivers, M.L. (1996) Minor and trace element chemistry of carbonates, apatites and magnetites in some African carbonatites. *Mineralogical Magazine*, 60, 415-425.
- Droop, G.T.R. (1987) A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51, 431-435.
- Gaspar, J.C. and Wyllie, P.J. (1983) Magnetite in the

- carbonatites from the Jacupiranga Complex, Brazil. *American Mineralogist*, 68, 195-213.
- Haggerty, S.E. (1991) Oxide mineralogy of the upper mantle. In: Lindsley, D.H. (ed.), *Oxide minerals: petrologic and magnetic significance*. *Reviews in Mineralogy*, 25, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., 355-416.
- Haggerty, S.E. (1994) Upper mantle mineralogy. *Journal of Geodynamics*, 20, 331-346.
- Horn, I., Foley, S.F., Jackson, S.E., and Jenner, G.A. (1994) Experimentally determined partitioning of high field strength- and selected transition elements between spinel and basaltic melt. *Chemical Geology*, 117, 193-218.
- Karchevsky, P. I. and Moutte, J. (2004) The phoscorite-carbonatite complex of Vuoriyarvi, northern Karelia. In: Wall, F. and Zaitsev, A.N. (eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. *Mineralogical Society Series 10*, The Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 163-200.
- Kim, S.J., Lee, H.K., Yin, J., and Park, J.K. (2001) Fe-REE Mineralization of the Hongcheon-Jaeun District. *Economic and Environmental Geology*, 34, 319-328 (in Korean with English abstract).
- Kim S.J., Lee, H.K., Yin, J.W., and Park, J.K. (2005) Chemistry and origin of monazites from carbonatite dikes in the Hongcheon-Jaeun district, Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25, 57-67.
- Kim, W.J., Park, N.Y., and Kim, S.U. (1966) Investigation report on the Hongcheon iron deposits. *Geological Survey of Korea, Geology and Ore Deposits Investigation Report*, 9, 31-78.
- Kjarsgaard, B.A. and Hamilton, D.L. (1989) The genesis of carbonatites by immiscibility. In: Bell, K., (ed.), *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Chapman and Hall, London, U.K., 388-404.
- Krasnova, N.I., Balaganskaya, E.G., and Garcia, D. (2004) Kovdor - classic phoscorite and carbonatites. In: Wall, F. and Zaitsev, A.N. (eds.), *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: The Key Example of the Kola Alkaline Province*. *Mineralogical Society Series 10*, The Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 99-132.
- Kukharensko, A.A., Orlova, M.P., Bulakh, A.G., Bagdasarov, E.A., Rimszkaya-Korsakova, O.M., Nefedov, E.I., Ilinskiy, G.A., Sergeev, A.S., and Abakumova, N.B. (1965) The caledonian complex of Ultramafic, Alkaline Rocks and Carbonatites of the Kola Peninsula and Northern Karelia. *Nedra, Leningrad, Russia*, 772p. (in Russian).
- Lee, C.H. and Lee, S.H. (1989) Petrological studies on the genesis of the Hongcheon iron deposits, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 25, 239-258 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.Y., Koh, S.M., Hong, S.S., and Kim, J.H. (1991) Metamorphism in the Hongcheon area, Korea. I. Petrology, Pressure, and Temperature. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 339-356 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.Y., Park, J.K., and Hwang, D.K. (2002) Petrography of Hongcheon Fe-REE Deposits. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 11, 90-102 (in Korean with English abstract).
- Lee, M.J., Garcia, D., Moutte, J., Williams, C.T. and Wall, F. (2004) Carbonatites and phoscorites from the Sokli complex, Finland. In: Wall, F. and Zaitsev, A.N. (eds.), *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province*. *Mineralogical Society Series 10*, The Mineralogical Society of Britain & Ireland, London. 133-162.
- Lee, M.J., Lee, J.I., and Moutte, J. (2005) Compositional variation of Fe-Ti oxides from the Sokli complex, northeastern Finland. *Geosciences Journal*, 9, 1-13.
- Lee, S.H. (1998) Geochemistry of minerals in the Hongcheon magnetite deposits, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 7, 98-110 (in Korean with English abstract).
- Le Maitre, R.W. (2002) *Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 236p.
- Mitchell, R.H. (1978) Manganian magnesian ilmenite and titanian clinohumite from the Jacupiranga carbonatite, Saopaulo, Brazil. *American Mineralogist*, 63, 544-547.
- Mitchell, R.H. (2005) Carbonatites and Carbonatites. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2049-2068.
- Oh, Y.B., Park, J.R., Shin, D.B., and Lee, M.J. (2010) Petrography of Hongcheon carbonatite-phoscorite complex. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 367-380 (in Korean with English abstract).
- Park, J.K. and Hwang, D.H. (1995) Investigation on rare metals mineral resources of the Precambrian Fe-mineralized district (II) (Hongcheon-Jaeun). *Korea Institute of Geology, Mining & Materials, KR-95(c)-10 KIGAM research report* (in Korean with English abstract).

- Park, J.K. and Lee H.Y. (2003) Petrochemistry of the Hongcheon Fe-REE ore deposit in the Hongcheon area, Korea. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 12, 135-153 (in Korean with English abstract).
- Prins, P. (1972) Composition of magnetite from carbonatites. *Lithos*, 5, 227-240.
- Requir, E.P., Chakhmouradian, A.R., Halden, N.M., Yang, P., and Zaisev, A.N. (2008) Early magmatic and reaction-induced trends in magnetite from the carbonatites of Kerimasi, Tanzania. *The Canadian Mineralogists*, 46, 879-900.
- Richter, K., Leeman, W.P., and Hervig, R.L. (2006) partitioning of Ni, Co and V between spinel-structured oxides and silicate melts: Importance of spinel composition. *Chemical Geology*, 227, 1-25.
- Secher, K. and Larsen, L.M. (1980) Geology and mineralogy of the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland. *Lithos*, 13, 199-212.
- Shin, B.W., Hong, M.S., Lee, Y.D. and Park, B.S (1975) Geologic map of Jaeun. Geological and Mineral Institute of Korea, 16p.
- Streckeisen, A. (1980) Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau*, 69, 194-207.
- Toplis, M.J. and Corgne, A. (2002) An experimental study of element partitioning between magnetite, clinopyroxene and iron-bearing silicate liquids with particular emphasis on vanadium. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144, 22-37.
- Wolley, A.R. (1989) The spatial and temporal distribution of carbonatites. In: Bell, K. (ed.), *Carbonatites, Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London, 15-37.
-
- 접수일(2013년 12월 3일), 수정일(1차 : 2013년 12월 24일),
게재확정일(2013년 12월 25일), 책임편집위원 : 이용재