한국 포천 철(-동) 스카른 광상의 지질, 광화작용 및 생성연대

김창성¹ · 고지수¹ · 최선규^{1*} · 김상태²

¹고려대학교 지구환경과학과, ²맥매스터대학교 지리지구과학부

Geology, Mineralization, and Age of the Pocheon Fe(-Cu) Skarn Deposit, Korea

Chang Seong Kim¹, Ji Su Go¹, Seon-Gyu Choi^{1*} and Sang-Tae Kim²

¹Dept. of Earth & Environmental Sciences, Korea University, Seoul 136-713, Korea

²School of Geography and Earth Sciences, McMaster University, Ontario L8S4L8, Canada

The Pocheon iron (-copper) deposit, located at the northwestern part of the Precambrian Gyeonggi massif in South Korea, genetically remains controversial. Previous researchers advocated a metamorphosed (-exhalative) sedimentary origin for iron enrichment. In this study, we present strong evidences for skarnification and Fe mineralization, spatially associated with the Myeongseongsan granite. The Pocheon deposit is composed of diverse carbonate rocks such as dolostone and limestone which are partially overprinted by various hydrothermal skarns such as sodic-calcic, calcic and magnesian skarn. Iron (-copper) mineralization occurs mainly in the sodic-calcic skarn zone, locally superimposed by copper mineralization during retrograde stage of skarn. Age data determined on phlogopites from retrograde skarn stage by Ar-Ar and K-Ar methods range from 110.3 ± 1.0 Ma to 108.3 ± 2.8 Ma, showing that skarn iron mineralization in the Pocheon is closely related to the shallow-depth Myeongseongsan granite (ca. 112 Ma). Carbon-oxygen isotopic depletions of carbonates in marbles, diverse skarns, and veins can be explained by decarbonation and interaction with an infiltrating hydrothermal fluids in open system ($XCO_2=0.1$). The results of sulfur isotope analyses indicate that both of sulfide (chalcopyrite-pyrite composite) and anhydrites in skarn have very high sulfur isotope values, suggesting the ^{34}S enrichment of the Pocheon sulfide and sulfate sulfur was derived from sulfate in the carbonate protolith. Shear zones with fractures in the Pocheon area channeled the saline, high fO_2 hydrothermal fluids, resulting in locally developed intense skarn alteration at temperature range of about 500° to 400°C.

Key words : Pocheon, mineralization age, iron mineralization, sodic-calcic skarn, stable isotope

선캄브리아기 경기육괴의 북서부에 위치한 포천 철(-동)광상은 다양한 이론이 제시되어 논쟁 대상이 되었으며, 성인적 측면에서 변성(배기형) 퇴적 광상이 주된 생성이론으로 인지되었다. 본 논문에서는 포천 스카른화작용/철광화작용의 핵심 증거를 통하여 공간적으로 인접한 명성산 화강암이 관계화성암의 가능성을 제시하였다. 포천 스카른은 석회암과 백운암의 다양한 탄산염암을 모암으로 하여 Ca계열, Mg계열 및 Na-Ca계열 스카른이 형성되었다. 철광화작용은 주로 Na-Ca계열 스카른대를 따라 배태되고 있으며, 후퇴 스카른 단계에 국부적으로 동 광화작용이 중첩된다. 포천 후퇴 스카른 단계에 정출된 금운모의 Ar-Ar과 K-Ar연대측정 결과는 $110.3 \pm 1.0 \sim 108.3 \pm 2.8$ Ma이며, 스카른 철(-동) 광화작용은 천부 관입암체인 명성산 화강암의 관입시기(112 Ma)와 일치하여 관계화성암으로 추정된다. 주변 탄산염암, 스카른 및 맥상의 탄산염광물간 산소-탄소 동위원소 빈화된 경향성은 개방계 조건($XCO_2=0.1$)에서 열수의 탈탄산염화

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: seongyu@korea.ac.kr

작용과 침투작용에서 유도되었다. 한편 황화광물(황동석-황철석 혼합물)과 경석고에서 매우 높은 황 동위원소 값은 황 근원물질이 주변 탄산염암에 함유되어 있던 황산염광물로부터 공급되었을 가능성을 지시한다. 포천 광상 주변의 전단대에서는 파쇄대가 중첩되어 발달하여 있으며, 백악기 화강암으로부터 공급된 고온성 광화유체가 이러한 약선대를 따라 유입되어 약 500~400°C의 온도범위에서 강력한 근지성 스카른화작용과 함께 광화작용이 유도되었다.

주요어 : 포천, 광화시기, 철광화작용, Na-Ca 스카른, 안정동위원소

1. 서 언

경기육괴 북서부에 위치한 포천 철광상은 1966년부터 1977년까지 약 65만 톤 정광(약 60 wt. % Fe)을 생산한 국내 대표적인 철광산이며, 총 매장량은 640만 M/T으로 보고되고 있다. 포천 광상은 성인 측면에서 함철퇴적물 기원의 변성 퇴적 광상(Kim, 1977; Lee, 1979), 앰피블라이트와 연계된 해저 화산성 배기형 퇴적 광상(So, 1977), 그리고 접촉교대작용에 의한 스카른 광상(Kanda, 1969)으로 다양하게 해석되었다. 이러한 철광화작용은 기본적으로 동시 생성의 퇴적 기원 광상 또는 후기 생성의 열수 기원 광상으로 요약되며, 특히 암석학적 관점에서 철 광체와 밀접한 산출양상을 보이는 앰피블라이트 성인에 대한 해석 차이로부터 시작되고 있다. 최근 지포리 도폭에서는 포천 광산 주변부에 분포하는 선캄브리아기 감악산 섬강암류 및 중생대 기간 동안 트라이아스기, 쥐라기 및 백악기에 걸쳐서 다양한 화강암류가 관입한 연대자료가 보고되었으나(Hwang and Kihm, 2007), 포천 철광화작용과 관련된 연대자료는 언급된 바 없다.

한편, 2001년과 2011년 한국광물자원공사에서 실시한 포천 광산의 시추 시료에서 철 광체와 함께 다양한 유형의 스카른대가 배태되며, 이러한 자철석 광석에서는 Na-Ca변질작용에 의한 독특한 광물조합이 확인되었다. 이는 IOCG형(iron oxide-copper-gold type) 열수시스템에서 나타나는 Na 열수변질대의 광물상과 서로 유사한 특징을 보인다(Wang and Williams, 2001; Monterio *et al.*, 2008). 이러한 포천 철광화작용에 대한 퇴적 기원 또는 열수 기원의 근본적 문제를 규명하기 위하여, 기 발표 논문에서 제시된 앰피블라이트의 암석·지화학적 특성과 함께 2010년/2011년 포천 광산 시추 시료를 종합적으로 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 포천 광상 주변의 화강암류, 탄산염암, 앰피블라이트(또는 스카른) 및 철광석의 지화학적 특성 및 광화연대에 대한 종합적인 비교 분석을 통하여 기존에 제시된 문제를 재해석을 하고자 한다.

2. 지질 및 광상

2.1. 지질 개요

포천 광상의 지질은 선캄브리아기 편마암류와 감악산 섬강암류, 시대 미상의 변성퇴적암 및 후기 관입한 트라이아스기 반상 섬록암, 쥐라기 포천 화강암, 함석류석 화강암, 복운모 화강암 그리고 백악기 명성산 화강암으로 구성된다(Fig. 1). 선캄브리아기 편마암 복합체를 기반암으로 하여 후기 원생대에 관입한 감악산 섬강암류는 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 결과에서 742 ± 13 Ma로 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2003). 한편 시대 미상 변성퇴적암류는 포천지역을 중심으로 국지적으로 배태되며, 사충리/점이충리와 같은 퇴적구조가 잘 보존된 저변성도 사암과 석회암/백운암으로 구성된다.

최근 발표된 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대측정 결과에서 반상 섬록암은 237 ± 1 Ma이며(Lee *et al.*, 2006), 포천 화강암, 함석류석 혹은 복운모 화강암, 명성산 화강암은 184.0 ± 1.5 Ma, 164.5 ± 2.4 Ma 및 112 ± 2 Ma로 각각 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2006; Hwang and Kihm, 2007). 포천 지역에서 쥐라기 화강암류는 대자울 값이 매우 낮은 값을 갖는 티탄철석 계열의 복운모 화강암과 자철석 계열의 포천 혹은 복운모 화강암으로 비교적 심부에서 정치된 관입암체가 광범위하게 배태된다. 한편, 백악기 화강암류는 대자울 값이 높은 값을 갖는 자철석 계열의 천부형 화강암체로 광상 부근에서 남북 방향을 따라 산출된다.

그리고 지포리 도폭에서는 네 단계의 구조운동이 다음과 같이 언급되었다(Hwang and Kihm, 2007). 처음 광역변성작용과 관련된 압축변형작용, 그리고 감악산 섬강암에 발달한 전단대를 따라 나타나는 연성전단작용(226 ± 1.2 Ma)과 이후 압축변형작용이 중첩되었다. 최후기 구조운동은 주향이동 단층이 유도되었으며, 이러한 단층대를 따라 명성산 화강암(약 112 Ma)이 관입하고 있다.

포천 광산에서는 서측부를 따라 분포하는 감악산 변

Fig. 1. Generalized geologic map of the Pocheon district, South Korea. Modified from Hwang and Kihm (2007).

성 화강암류가 남-북 방향으로 신장된 산출양상을 보이며, 암체 전반에 걸쳐서 압쇄작용 이후에 파쇄작용이 중첩된 복합적인 특징이 확인된다(Fig. 2). 시추시료에서는 전단대의 연성변형을 지시하는 수 mm 크기 흰색 장석 반정이 신장된 대상 조직을 보이고 원압쇄암, 압쇄암과 같은 다양한 압쇄암으로 산출되는 반면, 철광체 인접부에서 파쇄작용에 의하여 장석 반정이 각력상 조직을 보이며 장석, 각섬석, 흑운모가 기질로 구성된 분쇄각력암이 확인된다(Fig. 2). 이러한 복합적인 산상은 전반적으로 전단대를 따라 연성 변형 작용이 유도되고, 오랜 기간 동안 용기/침식된 이후 비교적 천부

에서 재차 취성 변형작용이 중첩된 진화과정을 시사하고 있다. 이러한 광상 부근의 산상은 감악산 섬장암에서 전단대를 형성시킨 트라이아스기 연성 변형작용 이후 백악기 주향이동단층과 관련된 취성 변형작용이 중첩된 구조운동과 일치하고 있다. 한편, 광상 주변부에 분포하는 쥐라기 포천 화강암, 복운모 화강암, 함석류석 화강암 및 백악기 명성산 화강암에서는 취성 및 연성 변형 작용에 의한 조직이 관찰되지 않는다.

2.2. 광상 개요

포천 광상은 변성퇴적암류(주향 N-S 방향, 경사

Fig. 2. Photographs showing some host and metasomatic rocks and their relationships on the Pocheon iron (-copper) deposit. A. Mylonite (Gamaksan); B. Cataclasite; C. Myeongseongsan granite; D. Banded magnetite (mt) ore with disseminated chalcopyrite (cp); E. Gradational contact between altered mylonite and calcic skarn; F. Sodic-calcic skarn with abundant acmite (acm), albite (ab), magnetite and anhydrite (anh).

60~70° W)를 모암으로 하여 변성퇴적암류의 열리와 조화적인 55~75° W 방향의 경사진 렌즈/포켓상 광체로 배태된다(Kanda, 1969). 이러한 철 광상은 평균 연장/폭이 각각 약 100~300 m/4~25 m의 3개 광체로 구성되며, 주 광체의 크기는 180×40×200 m로서 철 평균 품위는 약 35 wt. % Fe이다. 철 광체의 하반을 따라 광범위한 화강반암의 관입 양상이 보고되었으며(Kanda, 1969), 철 광체 주변부를 따라 주로 변성퇴적암류인 규화 석회질암(limesilicate)과 앰피블라이트간 점이적인 접촉 양상이 언급된 바 있다(So, 1977; Kim, 1977). 철광체는 괴상 또는 일부 층상으로 산출하며, 층상 광체는 1 mm 이하의 자철석 박층과 투각섬석 박층의 호층으로, 간혹 소습곡 잔류구조가 확인된다(Fig. 2D). 한편, 앰피블라이트는 주로 각섬석, 사장석, 자철석과 함께 금운모, 녹렴석, 휘석, 녹니석, 설석, 인회석, 석영, 황철석, 황동석이 소량 수반된다. 특히 광체 주변부의 규화 석회질암은 미약한 스카른화작

용이 확인되며, 사문암, 활석, 양기석, 단사휘석, 감람석, 석영과 함께 자철석, 황동광, 황철광, 경철광이 광염상으로 산출된다.

Kanda(1969)는 스카른 철 광체가 화강반암의 접촉대를 따라 주로 배태되며, 변성퇴적암류와 접하는 상반 규화 석회질암에서는 황동석과 황철석의 동 광체가 산출하는 것으로 보고하였다. 한편, 변성퇴적 기원론은 초기 철산화광물-탄산염광물-규산염광물로 구성된 퇴적암이 광역 변성작용을 받아 각섬암과 철 광체로 변화되었으며, 이후 취성 변형작용에 의하여 변형된 것으로 해석하고 있다(Kim, 1977).

한국광물자원공사에서 최근 실시한 시추 위치는 기 개발된 광체의 외각부에 해당되며, 저품위 철 광체를 중심으로 백운석/석회석을 모암으로 하는 다양한 유형의 스카른대가 확인되었다(Fig. 2). 광산 부근 지표 노두에서 전단대 주변부를 따라 탄산염암에서는 석류석과 휘석이 산재되어 있으며, 맥상 스카른도 국부적으

Fig. 3. Schematic logging profile for the drill no. PC-2010-1 with photographs, showing typical relationships between some host rocks and various skarns. See mineral abbreviations used in Table 3.

로 확인되고 있다. 특히, 2010년 1호공 416 m 지점에서 확인된 흑운모 화강암은 지표 노두에 비하여 정장석이 현저하게 홍장석화/견운모화 되어 있어, 열수변질작용의 가능성을 시사하고 있다.

PC-2010-1호공 시추시료는 최상부로부터 압쇄암 → 탄산염암(Mg계열 스카른대) → 압쇄암 → 탄산염암 + 혼펠스 혼합대(Ca계열 스카른대) → 함자철석 Na-Ca계열 스카른대 (약 253~292 m) → 파쇄암 → 변질된 화강암(약 416 m)으로 수직적 변화 양상이 관찰되었다(Fig. 3). 이는 Kanda (1969)가 광산 개발 당시 철광체를 중심으로 상반의 변성퇴적암류(편마암류) → 규화

석회질암 → 대리암 → 철광체 → 규화 석회질암 → 스카른 → 하반의 화강반암으로 변화되는 분포 양상과 전반적으로 일치하고 있다. 즉, 철(-동) 광화작용은 N-S, 60~70° W 방향의 전단대를 따라 변성퇴적암류에 협재된 탄산염암을 중심으로 스카른화작용에 의하여 교대된 산출 양상을 나타내고 있다.

3. 포천지역 화강암류의 지화학적 특징

포천 광산의 노두 및 시추 시료는 전반적으로 접촉 교대작용에 의한 근지성 스카른 광상의 전형적인 특징을 보인다(Fig. 3). 한편, 광상 부근에 배태된 감악산 변성 섬강암류는 주로 원압쇄암질 편마암/압쇄암으로 연성 변형된 특징을 보이고 있어, 광화작용 이전에 관입한 화성암체임을 지시하고 있다. 한편 포천 광상 일원에서는 쥐라기(약 184~164 Ma)와 백악기 기간 동안 다양한 유형의 화강암류가 관입하였다(Yun *et al.*, 2002). 스카른화작용과 철광화작용을 유도한 관계화성암의 수반 광종과 지화학적 연계성을 규명하기 위하여, 광상 주변에 분포하는 쥐라기 및 백악기 화강암류 중에서 풍화 및 변질 작용이 관찰되지 않는 비교적 신선한 시료에 대하여 전암 분석을 실시하였다. 특히 시추에서 확인된 홍장석화된 흑운모 화성암은 관계화성암으로 추정되고 있어 백악기 명성산 화강암 및 쥐라기 포천 화강암, (석류석-)복운모 화강암을 종합적으로 비교 검토하였다. 전암 분석은 캐나다 Activation Lab. Ltd.에서 수행하였으며, 주성분 및 부성분 원소는 유도 결합 플라즈마 분광 분석기(Fusion-ICP-OES), 미량원소 및 REE는 유도 결합 플라즈마 질량분석기(Fusion-ICP-MS)로 분석하였다.

주변 화성암체에 대한 주성분/미량성분/REE 성분은 종합적으로 검토한 결과, 명성산 화강암과 포천 광상 하부 시추 시료인 흑운모 화성암은 전반적으로 유사한 특징을 보이고 있다(Table 1). 백악기 명성산 화강암 및 쥐라기 포천 화강암, 복운모 화강암은 공통적으로 중알루미나질~고알루미나질, I형, 고-칼륨 칼크-알칼리 계열로서 서로 유사한 암석학적 특징을 보이고 있다(Fig. 4). 또한, 이러한 화강암은 약 73.39~77.38 wt. % SiO₂로서 공통적으로 4 % 이내의 좁은 변화 양상을 보이며, 조구조적으로 VAG (Volcanic Arc Granite) 영역에 해당된다. 또한 포천 지역 화강암류는 K₂O-SiO₂ 관계도에서 분화가 매우 진행된 지화학적 특징을 나타내며, 관계화성암에 대한 [(FeO+Fe₂O₃+CaO+Na₂O)/K₂O]-SiO₂관별도(Meinert, 1993)에서 스카른 광상의

Table 1. Bulk chemical analyses of intrusive rocks in the Pocheon area

	Two mica granite			Pocheon granite		Myeongseongsan granite			
	coarse-grained			coarse-grained		altered	altered	aplitic	coarse-grained
	PC2506-7	PC2506-8	PC1305-6	PC2506-4	PC2506-5	PC1001-41	PC1101-10	PC1305-8	PC1305-9
(wt. %)									
SiO ₂	74.69	74.83	73.62	75.18	74.61	75.63	77.38	75.26	73.39
Al ₂ O ₃	13.32	13.06	13.98	13.20	13.30	12.67	12.47	12.40	13.19
Fe ₂ O ₃ ^T	1.43	1.45	1.94	1.43	1.26	1.31	1.28	1.16	2.06
MnO	0.05	0.05	0.03	0.07	0.06	0.03	0.02	0.03	0.04
MgO	0.20	0.14	0.30	0.20	0.21	0.15	0.12	0.10	0.43
CaO	1.11	0.93	1.23	1.12	1.20	0.64	0.62	0.53	1.34
Na ₂ O	3.64	3.65	3.67	3.60	3.74	3.53	3.65	3.67	3.45
K ₂ O	4.47	4.66	4.73	4.96	4.72	4.88	4.88	4.82	4.95
TiO ₂	0.11	0.07	0.29	0.14	0.14	0.10	0.07	0.08	0.21
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.09	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.05
LOI	0.48	0.32	0.52	0.14	0.13	0.39	0.33	0.27	0.30
Total	99.56	99.18	100.40	100.10	99.38	99.35	100.90	98.33	99.39
(ppm)									
Ba	382	237	925	594	585	179	130	69	565
Sr	113	63	281	138	143	76	44	22	140
Y	19.9	18.2	9.9	6.5	7.2	12.4	29.1	16.2	13
Sc	3	3	2	2	2	2	2	2	3
Zr	83	77	195	100	111	84	88	76	153
Be	6	3	5	2	2	3	6	5	3
V	6	< 5	17	5	5	10	9	7	19
Cr	< 20	30	< 20	< 20	30	< 20	< 20	< 20	< 20
Co	< 1	< 1	2	< 1	< 1	1	< 1	< 1	2
Ni	< 20	< 20	20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
Cu	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Zn	40	30	70	< 30	< 30	30	< 30	30	30
Ge	1.9	1.4	1.6	1.4	1.4	1.3	1.6	1.8	1.4
Rb	279	183	229	171	154	216	246	258	185
Nb	21.7	15.8	14.7	15.1	13.4	9.4	19.4	14.6	10.1
Mo	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag	< 0.5	< 0.5	0.9	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	0.8
Sn	6	2	3	< 1	< 1	< 1	< 1	3	2
Cs	6.1	3.7	5	1.3	1.1	1.9	2	4.3	3.3
Hf	3.5	3.2	5.1	3.7	3.9	2.8	3.9	3.2	4
Ta	4.2	1.55	1.92	2.41	1.06	1.36	2.24	1.52	1.51
W	0.8	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	1.2	1	0.8	1.2
Pb	34	31	32	24	24	24	23	32	25
Th	23.3	23	28.7	22.4	22.5	32.8	28.9	39.9	19.7
U	9.79	3.05	2.93	3.51	3.41	5.03	7.09	5.98	3.62
La	31.6	26.8	62.9	30.8	34	24.8	23.6	17.9	47.7
Ce	58.2	52.5	114	53.7	59.4	48.4	49.1	37.6	83.8
Pr	6.3	6.36	12	5.35	5.95	5.51	5.81	4.41	8.42
Nd	19	22.5	39.5	14.3	16.5	18.9	21.5	15.9	27.4
Sm	3.76	4.71	6.31	1.91	2.33	3.46	5.25	3.44	4.12
Eu	0.427	0.338	0.917	0.494	0.517	0.27	0.221	0.167	0.609
Gd	2.92	3.93	3.94	1.19	1.45	2.65	5.1	3.09	3.03
Tb	0.49	0.6	0.53	0.15	0.18	0.4	0.91	0.56	0.43
Dy	2.96	3.29	2.43	0.86	1.05	2.26	5.28	3.21	2.28
Ho	0.59	0.6	0.38	0.18	0.21	0.44	1.07	0.62	0.44
Er	1.88	1.84	0.91	0.64	0.73	1.25	3.08	1.77	1.23
Tm	0.304	0.293	0.123	0.115	0.12	0.204	0.464	0.293	0.197
Yb	2.06	1.92	0.75	0.91	0.87	1.38	3.01	2.03	1.32
Lu	0.276	0.273	0.11	0.145	0.135	0.21	0.451	0.282	0.193

Fig. 4. A. $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ versus SiO_2 ; B. A/NK versus A/CNK (molar); C. K_2O versus SiO_2 ; D. Rb versus $(\text{Y}+\text{Nb})$; E. K/Rb versus SiO_2 ; F. $(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 , showing variation diagrams of typical major and trace components for the Jurassic and Cretaceous granitoids at the Pocheon district. $\text{Rb}/(\text{Y}+\text{Nb})$ diagram showing fields for different granite types from Pearce *et al.* (1984). $\text{A}/\text{NK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$; $\text{A}/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$; Syn-COLG=syn-collisional granite; WPG= within plate granite, VAG=volcanic arc granite, ORG=orogenic granite.

광종은 Mo-Sn 광종과 밀접한 상관성을 보이고 있어 포천 철(동)광화작용과는 상당한 차별성을 보이고 있다(Fig. 4). 한편, 시추 시료에서 확인된 흑운모 화성암은 미량 성분이 명성산 화강암과 전반적으로 유사한

지화학적 특징을 보이고 있어 인접한 명성산 화강암의 동일 암체로 분류하였다. 즉, 명성산 화강암은 쥐라기 포천 화강암, (석류석-)복운모 화강암과 비교하여 Ba, Sr, Zr 성분은 상대적으로 빈화된 반면, Rb, Th 성분

Fig. 5. Chondrite-normalized whole-rock rare earth element (REE) patterns for the Jurassic and Cretaceous granitoids from the Pocheon district, presented in Table 1. C1 chondrite REE normalization values are from McDonough and Sun (1995).

은 상대적으로 부화된 특징을 보인다.

포천 지역의 화강암류의 REE 함량을 McDonough and Sun (1995)이 제시한 콘드라이트의 REE 함량으로 표준화하였으며, 경희토류(LREE)에 비하여 중희토류(HREE)가 상대적으로 결핍된 특징을 보인다. 이러한 REE 변화양상은 쥐라기 복운모 화강암과 백악기 명성산 화강암에서 서로 유사한 특징을 보이는 반면, 쥐라기 포천 화강암은 U자형으로 이질적인 분포양상을 보인다(Fig. 5). 이러한 쥐라기 복운모 화강암과 포천 화강암의 희토류 변화양상은 Yun *et al.* (2002)의 결과와도 전반적으로 일치하고 있다. 특히 백악기 명성산 화강암의 현저한 Eu 이상치는 쥐라기 복운모 화강암과 비교하여 사장석의 분별결정작용 차이에 기인하며, 이는 주성분에서 분화된 지화학적 특성과는 서로 일치하고 있다.

4. 광화시기와 관계화성암

포천 철광화작용에서 동시생성의 변성퇴적 광상 또는 후기생성의 접촉교대 광상에 대한 근본적인 문제점을 재해석하기 위하여 광화시기를 일차적으로 검토하였다. 철광화작용과 관련된 연대측정은 자철석-운모-투

회석-스핀-각섬석의 광물조합을 보이는 Mg계열 후퇴 스카른 단계에 정출된 시료를 선택하였다. 경하에서 운모류는 관상의 자형 결정으로 거의 무색~담록색의 다색성 특징을 보이며, 전자현미분석 결과 비교적 순수한 금운모 조성이 확인되었다. 연대측정 시료는 자철석과 운모의 정출시기와 밀접한 공생관계를 관찰한 이후 해당 시편으로부터 금운모를 단계 분리하였다. PC1103-22시료는 K-Ar 분석법, 그리고 PC1103-31시료는 K-Ar 분석법과 Ar-Ar 분석법을 병행하여 수행하였다. K-Ar 연대측정과 Ar-Ar 연대측정은 캐나다 Activation Lab. Ltd.에서 실시하였으며, K 함량과 Ar 함량은 각각 V-735 ES-ICP와 Micromass 5400 불활성 기체 질량 분광기를 통하여 분석되었다.

K-Ar 연대 측정 결과에 의하면 두 개의 시료에서 각각 109.5 ± 2.8 Ma와 108.3 ± 2.8 Ma로 확인되었다(Table 2). 또한 Ar-Ar 연대 측정 결과에 의하면 ^{39}Ar 유실은 초기 극소량을 제외하고 전반적으로 과잉 유실이 없는 약 98.5 %로서 110.3 ± 1.0 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연대를 지시하며, $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 아이소크론 연대에서도 110.3 ± 1.3 Ma로 두 연대가 서로 일치하고 있어 높은 신뢰도를 나타내고 있다(Fig. 6), 이러한 연대 측정 결과에 따라 철 광화작용의 생성연대는 약 110 Ma로

Table 2. K-Ar and Ar-Ar age data of phlogopites from magnesian skarn in the Pocheon deposit

Sample	Mineral	K-Ar			Ar-Ar				Age (Ma)
		K (wt.%)	Rad ^{40}Ar (10^{-8}ccSTP/g)	Non-Rad. ^{40}Ar (%)	IIA $\pm 1\sigma$ (Ma)	TFA $\pm 1\sigma$ (Ma)	WMPA $\pm 1\sigma$ (Ma)	Ca/K	
PC1103-22	phlogopite	7.55	32.509	22.2					109.5 ± 2.8
PC1103-31	phlogopite	6.74	28.683	27.3					108.3 ± 2.8
					110 ± 1.3	110.0 ± 1.0	110.3 ± 1.0	0.13~2.81	110.3 ± 1.0

Abbreviations: IIA = inversion isochrones age; TFA = total fusion age; WMPA = weighted mean plateau age; Ca/K = apparent Ca/K ratio.

Fig. 6. Phlogopite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra and isochron plot from the Pocheon skarns. A. Age spectrum of cumulative percent ^{39}Ar released versus apparent age. B. isotope correlation plot. WMPA = weighted mean plateau age; TFA = total fusion age. The age error bars for each temperature steps are at the 1σ level.

Fig. 7. Age frequency of the various intrusive rocks and iron mineralization in the Pocheon district.

추정된다. 또한, 인접 화성암체의 정치시기(Hwang and Kihm, 2007)와 철 광화시기를 종합적으로 비교 검토한 결과, 포천 광상과 북측에 접하고 있는 명성산 화강암의 SHRIMP U-Pb 연대자료인 112.0 ± 2 Ma (Hwang and Kim, 2007)와 매우 잘 일치하고 있다(Fig. 7). 즉, PC-2010-1 시추공 기저부(약 415 m)에서 확인된 홍장 석화된 흑운모 화강암은 기존 광산 자료(Kanda, 1969)에 제시된 화성암과 동일 암체로 추정되며, 본 연구에서 수행된 REE 변화양상과 연대측정자료에 의해 관계 화성암인 명성산 화강암임을 시사한다.

5. 스카른 유형과 지화학적 특성

포천 지역에서 변성퇴적암류에 협재된 탄산염암은 석회암에서 백운암질 석회암, 백운암까지 다양한 조성

변화를 보이며, 광산 부근에서는 하부로 갈수록 스카른화작용이 현저하게 진행된 경향성을 보인다(Fig. 3). 포천 스카른은 탄산염암의 다양한 조성 특성에 따라 Ca계열 및 Mg계열 스카른뿐만 아니라, 특이한 조성의 Na-Ca계열 스카른이 배태되고 있다(Go *et al.*, 2013). 이러한 스카른 유형은 지시 광물의 존재 유무와 함께 수반광물의 산출빈도에 따라 구분된다(Table 3). 자철석은 주로 괴상 광체로 배태되며, 간혹 층상 조직이 관찰된다. 층상 광체는 원암의 조성을 반영하여 열수 교대된 자철석 박층과 투각섬석 박층으로 산출한다. Ca계열 스카른과 Mg계열 스카른에 비하여 Na-Ca계열 스카른에서 가장 높은 산출 빈도를 보인다. 층상 철광석에서는 자철석투각섬석-금운모의 공생관계를 보이며(Go *et al.*, 2013), 후기 정출된 황동석과 황철석이 소량 광염상으로 수반된다(Fig. 2).

Table 3. Representative mineral associations of various skarn types in the Pocheon deposit

Sample	ab	acm	cpx	ol	grt	qtz	amp	bt	epi	phl	mus	srp	ser	ves	chu	anh	gyp	mt	ht	cc	spn	dol	cal
PC1001-26B	⊙	○														◆		●					
PC1001-25	●	-	◆		○			-	◆	-						⊙	◆	○		-			◆
PC1001-35	●		○						-									-					
PC1001-29	⊙	○					-		-									⊙					◆
PC1001-30B	⊙	◆	⊙				-		◆							○	◆	◆			-		-
PC1103-2			●		⊙	◆																	
PC1001-4A			⊙		⊙		⊙	-					⊙							-			◆
PC1103-29			●				⊙							◆									◆
PC1103-36							⊙	⊙										-	-	-			⊙
PC1002-1				○																-		●	
PC1001-24			◆	○			○					⊙						-				●	●
PC1001-11A			◆	⊙						-		⊙			-	-		-			⊙	⊙	
PC1001-3			-	-						-	-	●						-				⊙	

Abbreviations : ab=albite, acm=acmite, amp=amphibole, anh=anhydrite, bt=biotite, cal=calcite, cc=chalcopyrite, chu=clinochlore, cpx=clinopyroxene (diopside), dol=dolomite, epi=epidote, grt=garnet, gyp=gypsum, ht=hematite, mt=magnetite, mus=muscovite, ol=olivine, phl=phlogopite, qtz=quartz, ser=sericite, spn=sphene, srp=serpentine, ves=vesuvianite

Frequency and abundance : ● > ⊙ > ○ > ◆ > -

Ca계열 스카른은 모암 조성 차이에 따라 전반적으로 괴상 또는 층상 스카른으로 배태되며, 층상 스카른은 갈색~담갈색 석류석 층과 녹색~담녹색 단사회석 층이 교호되며, 주로 이질 협재 석회암이 교대된 것으로 추정된다. 또한, 혼펠스와 석회암의 경계부에서는 부분적으로 스카른화되어 규회석-담홍색 석류석-단사회석의 점이적인 변화양상이 인지되며(Fig. 2), 혼펠스는 간혹 맥상 스카른에 의하여 절단된다. 후기 맥상 스카른은 주로 단사회석과 암갈색 석류석으로 구성된다. Mg계열 스카른은 담녹색 또는 암녹색을 띠며, 사문석화작용을 받은 스카른에서 검은색 반점이 혼재되어 있다. 또한, 후기 맥상 스카른에서는 맥을 중심으로 검은색 띠를 따라 사문석화된 산출양상이 관찰된다. Na-Ca계열 스카른은 전반적으로 담녹색~연녹색을 띠며, 담홍색 반점이 혼재되는 특징을 보인다. 특히 조장석은 변질되어 붉은색을 띠며 간혹 경석고-석영-방해석이 함께 충전하고 있다(Fig. 2). Na-Ca계열 스카른은 추회석(acmite, $\text{NaFe}^{+3}\text{Si}_2\text{O}_6$)-조장석-투회석-석류석-녹렴석-경석고의 독특한 공생관계를 보이지만, Ca계열 스카른에서는 석류석-Ca계열 단사회석-규회석-베수비아나이트-녹렴석, 그리고 Mg계열 스카른은 주로 감람석-투회석-사문석-활석으로 각 스카른 유형별로 서로 상이한 광물조합의 특징을 보이고 있다(Table 3).

스카른 유형별 지화학적 특성을 규명하기 위하여 탄산염암/스카른/광석에 대한 전암 분석을 수행하였다. 상부 시추 시료는 스카른화작용이 전반적으로 미약하여 탄산염광물이 양호하게 보존된 대리암으로 산출되지만,

하부에서는 스카른화작용이 매우 진행된 변화 추이를 보인다. 스카른 광물조합, 산출빈도와 조직 등을 고려하여 대표적인 Mg계열 스카른, Ca계열 스카른, Na-Ca계열 스카른 및 자철석 광석 총 17개 시료를 선택하였으며, 탄산염암은 육안 관찰시 스카른 광물이 비교적 소량 함유된 22개 시료에 대하여 전암 성분을 실시하였다. 전암 분석은 캐나다 Activation Lab. Ltd.에서 수행 하였으며, 주성분 및 부성분 원소는 유도 결합 플라즈마 분광분석기(Fusion-ICP-OES), 미량 원소는 유도 결합 플라즈마 질량분석기(Fusion-ICP-MS)로 분석하였다.

탄산염암에서 LOI(loss on ignition)는 백운암에서 20.28~40.38(평균 29.95) wt. %와 석회암에서 29.34~34.31(평균 30.74) wt. %로 높은 수치를 나타내고 있다. 또한, MgO는 백운암에서 15.02~24.45(평균 18.59) wt. %, 석회암에서 2.57~10.94(평균 6.86) wt. %로 넓은 조성 변화를 보이며, 석회암 중 MgO 성분이 높은 일부 시료는 백운암질 석회암으로 추정된다. 이러한 탄산염암은 SiO_2 함량이 5~22 wt. %로 조성 변화를 보이며 일부 스카른광물이 함유되어 있으나, 경하에서 약 80 vol. % 이상 탄산염광물이 잔류되어 있다(Table 4). 반면에 Mg계열, Ca계열 및 Na-Ca계열 스카른은 모두 SiO_2 함량이 32.52~47.84 wt. %이며, 대부분 스카른 광물로 교대되어 있다(Table 5). 대부분 스카른의 LOI는 백운암/석회암과 비교하여 현저하게 낮은 수치를 보이고 있어 잔류 또는 재정출된 탄산염 광물의 낮은 산출빈도를 지시한다. 반면에 Na-Ca계열

Table 4. Representative chemical composition of carbonate protolith from the Pocheon deposit

	Dolostone							Limestone			
	PC1103-3	PC1103-37	PC1002-1-2	PC1103-3-1	PC1002-1	PC1001-2	PC1103-21	PC1001-17	PC1103-36	PC1001-18	PC1001-20
(wt. %)											
SiO ₂	17.04	17.26	15.38	16.86	12.30	10.86	10.63	15.17	18.85	11.33	10.42
Al ₂ O ₃	2.28	1.21	0.30	1.24	0.25	0.25	0.39	2.40	3.71	2.44	1.71
Fe ₂ O ₃	0.90	5.81	1.12	0.76	1.19	0.28	2.59	3.21	4.51	1.13	1.66
MnO	0.02	0.27	0.04	0.02	0.04	0.02	0.09	0.13	0.29	0.03	0.05
MgO	17.22	17.07	21.22	20.47	21.09	19.37	21.50	2.57	9.10	4.83	10.94
CaO	33.20	29.56	30.94	30.61	30.85	35.51	30.41	46.58	33.60	45.06	38.91
Na ₂ O	0.09	0.02	0.00	0.04	0.03	0.01	0.02	0.07	0.10	0.26	0.00
K ₂ O	0.58	0.33	0.14	0.21	0.07	0.02	0.05	0.31	2.40	0.73	0.05
TiO ₂	0.10	0.04	0.01	0.15	0.01	0.01	0.02	0.29	0.25	0.16	0.34
P ₂ O ₅	0.05	0.02	0.02	0.07	0.00	0.00	0.01	0.07	0.06	0.04	0.18
LOI	27.85	28.63	30.45	30.20	33.59	34.18	34.30	29.34	25.46	33.84	34.31
Total	99.33	100.20	99.62	100.60	99.41	100.50	100.00	100.10	98.32	99.85	98.58
(ppm)											
Ba	475	16	11	300	9	11	20	186	167	76	21
Sr	145	317	345	128	384	196	170	637	547	444	492
Y	3	9	2	5	3	<1	2	12	11	7	9
Sc	2	<1	<1	2	<1	<1	<1	3	4	3	4
Zr	21	69	3	35	3	6	7	105	109	38	40
Be	<1	2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
V	20	9	8	15	7	8	10	26	29	20	23
(mole %)											
CaO	57.5	51.5	50.5	51.3	50.6	56.7	48.9	88.9	68.0	85.7	70.4
MgO	41.5	41.4	48.2	47.8	48.1	43.0	48.1	6.8	25.6	12.8	27.5
FeO	1.1	7.1	1.3	0.9	1.4	0.3	2.9	4.3	6.4	1.5	2.1

스카른의 LOI는 비교적 높은 함량 변화가 확인되며, 이는 Na-Ca계열 스카른에서 후기 정출된 경석고와 함께 탄산염광물의 높은 산출 빈도에 기인한다.

스카른화작용과 연계된 철광화작용의 진화특성을 규명하기 위하여 원암인 탄산염암으로부터 스카른과 철광석 사이의 지화학적 연계성을 검토하였다. Ca-Mg-Fe 관계도(mole %)에 제시된 바와 같이 초기 스카른 단계에서는 백운암과 석회암의 CaO와 MgO 성분 차이에 따라 Ca계열 스카른과 Mg계열 스카른으로 원암의 조성 차이에 따라 서로 상이한 광물조합을 보이며(Fig. 8), 이는 현미경 관찰 결과와도 일치한다(Table 3). 한편 Na-Ca계열 스카른은 백운암과 석회암의 중간 영역에 도시되며, Ca계열 스카른의 광물상과 전반적으로 일치하는 경향성을 보인다. 스카른화작용이 진행됨에 따라 광화유체로부터 FeO+Fe₂O₃ 성분이 다량 공급됨으로써 전진 스카른의 후기부터 자철석이 집중적으로 정출

Fig. 8. Whole-rock Ca-Mg-Fe diagram (mole proportion) for the Pocheon carbonate rocks, skarns and iron ores, showing the most common mineral assemblages during skarn formation. See mineral abbreviations used in Table 3.

Table 5. Bulk chemical analyses of various skarns and iron ores from the Pocheon deposit

	Sodic-calcic skarn			Calcic skarn				Magnesian skarn				Iron ore			
	PC1001 -30	PC1001 -33	PC1001 -25	PC1001 -12	PC1001 -14	PC1103 -2	PC1103 -7	PC1103 -22	PC1103 -23	PC1103 -26	PC1103 -32	PC-1	PC1001 -23	PC1001 -26	PC1001 -34
<i>(wt. %)</i>															
SiO ₂	36.67	43.53	32.52	45.94	46.14	44.36	45.61	37.28	46.15	47.84	41.88	20.14	26.46	10.42	21.29
Al ₂ O ₃	3.86	5.61	5.82	9.22	6.74	8.41	9.39	14.71	6.66	1.62	4.74	1.13	1.75	3.06	3.78
Fe ₂ O ₃ ^T	24.32	18.92	27.64	6.89	5.07	6.57	9.65	14.03	8.57	9.00	17.81	65.73	49.65	79.49	58.37
MnO	0.24	0.23	0.23	0.21	0.17	0.18	0.40	0.27	0.37	0.18	0.14	0.23	0.25	0.11	0.16
MgO	5.46	5.83	3.42	4.81	5.71	8.53	6.62	16.00	11.63	16.23	16.34	8.20	2.93	0.72	2.48
CaO	16.86	15.41	18.37	29.83	35.05	29.23	23.23	9.40	23.68	23.55	14.56	3.81	9.49	4.63	8.76
Na ₂ O	3.04	4.23	2.40	0.16	0.05	0.12	0.29	0.88	0.21	0.06	0.09	0.26	2.87	0.92	2.09
K ₂ O	0.26	0.20	0.11	1.07	0.04	0.09	1.43	2.30	0.26	0.57	2.60	0.78	0.06	0.15	0.10
TiO ₂	0.22	0.28	0.22	0.63	0.39	1.14	1.24	1.28	0.61	0.06	0.52	0.02	0.13	0.15	0.19
P ₂ O ₅	0.04	0.07	0.03	0.11	0.09	0.29	0.44	0.37	0.17	0.02	0.10	0.05	0.05	0.03	0.04
LOI	7.54	6.05	5.56	0.65	0.81	1.97	1.62	4.19	1.94	1.63	0.93	-	5.03	1.17	3.55
Total	98.52	100.40	96.32	99.52	100.30	100.90	99.93	100.70	0.20	100.80	99.72	99.98	98.66	100.90	100.80
<i>(ppm)</i>															
Ba	30	78	29	769	12	19	384	388	49	117	121	67	24	18	< 3
Sr	370	469	314	178	69	61	209	215	255	24	10	13	262	181	216
Y	23	53	77	22	27	45	57	71	29	7	15	3	18	12	19
Sc	4	5	4	10	7	12	14	14	8	1	6	2	3	2	4
Zr	61	86	53	192	131	375	450	1,474	261	33	177	7	43	30	63
V	30	43	59	66	41	81	25	47	69	12	49	11	46	65	61
Cr	20	30	20	30	40	< 20	< 20	20	140	< 20	40	< 20	< 20	< 20	20
Co	6	3	2	10	8	6	10	17	10	4	8	43	7	8	6
Cu	< 1	< 1	< 10	< 10	< 10	< 10	50	< 10	< 10	< 10	10	2,540	< 1	< 1	< 1
Zn	96	133	50	280	250	150	230	340	290	90	470	90	146	53	64
Ge	5	7	19	2	2	1	3	2	1	4	2	5	7	6	7
Rb	< 1	18	7	31	2	3	138	246	15	101	459	85	2	5	5
Nb	5.5	6.0	6.0	13.0	11.0	29.0	56.0	108.0	23.0	3.0	30.0	3.0	4.3	5.1	3.6
Sn	213	246	411	11	14	26	121	624	114	114	143	16	354	481	138
Cs	0.2	0.8	< 0.5	0.6	< 0.5	< 0.5	1.1	11.9	< 0.5	5.9	31.4	3.6	0.4	0.2	0.1
Hf	1.6	2.3	1.7	4.9	3.8	8.2	8.3	26.4	5.2	0.6	3.8	0.1	1.1	0.8	1.7
Ta	0.31	0.33	0.10	0.80	0.50	2.20	3.30	8.00	1.50	0.20	0.90	0.16	0.20	0.18	0.15
W	347	47	69	27	1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	10	869	196	307
Pb	3	5	6	14	8	< 5	< 5	8	12	< 5	106	17	9	13	7
Th	4.78	5.32	4.30	9.30	10.10	7.50	9.50	59.40	7.40	1.00	9.70	0.35	3.19	2.00	3.06
U	12.9	31.8	87.5	2.1	3.3	1.7	1.8	2.4	0.9	< 0.1	2.5	0.3	15.8	14.3	11.8
La	21.1	29.1	16.3	38.1	46.1	69.4	96.5	206.0	41.7	2.6	1.6	0.7	16.5	7.2	11.5
Ce	39.7	53.9	30.2	71.2	86.3	129.0	183.0	405.0	76.6	7.6	4.6	1.7	30.2	14.8	23.3
Pr	4.38	6.19	3.43	8.02	9.55	14.30	20.90	45.30	8.48	1.19	0.77	0.21	3.27	1.66	2.62
Nd	17.40	26.50	13.50	29.6	33.6	55.2	80.1	167.0	32.5	5.8	4.4	0.9	12.8	6.6	10.4
Sm	4.34	9.23	3.40	5.40	6.10	11.50	15.20	26.70	7.10	1.50	1.80	0.25	3.04	1.54	2.43
Eu	3.61	8.98	6.18	1.05	0.95	1.68	2.09	1.73	1.03	0.06	0.07	0.01	2.40	2.14	2.01
Gd	5.05	14.40	5.50	4.90	5.50	10.70	14.00	20.50	6.30	1.50	2.40	0.32	3.42	2.04	2.75
Tb	0.86	2.53	1.30	0.70	0.90	1.60	2.10	2.70	0.90	0.20	0.50	0.06	0.60	0.39	0.50
Dy	4.73	12.40	9.50	4.20	5.30	8.90	11.20	14.60	5.40	1.40	3.10	0.42	3.28	2.26	2.95
Ho	0.82	1.90	2.40	0.80	1.00	1.70	2.20	2.90	1.10	0.30	0.60	0.09	0.63	0.40	0.63
Er	1.83	3.82	10.10	2.40	3.10	4.80	6.00	7.90	3.00	0.80	1.70	0.27	1.64	0.94	1.98
Tm	0.21	0.39	1.93	0.38	0.50	0.69	0.89	1.18	0.45	0.12	0.25	0.05	0.22	0.11	0.32
Yb	1.17	2.19	13.70	2.50	3.20	4.60	5.70	7.80	3.10	0.80	1.60	0.33	1.26	0.61	2.16
Lu	0.19	0.34	2.08	0.42	0.47	0.80	0.96	1.34	0.57	0.12	0.23	0.09	0.21	0.10	0.38

되었으며, 철광화작용이 유도된 후퇴 스카른 단계에서는 모든 스카른 유형이 전반적으로 유사한 화학조성을 보인다.

한편 백운암 기원의 Mg계열 스카른에서는 MgO이 각각 11.63~16.34 wt. %, 석회암 기원의 Ca계열 스카른에서 MgO 성분은 4.81~8.53 wt. %이며, 스카른 화작용 시 SiO₂ 성분 증가에 따라 MgO 성분과 CaO 성분은 각각 감소하고 있으나, 전반적으로 원암의 조성에 따라 상이한 진화 특성을 보인다. 즉, Ca계열 스카른과 석회암 그리고 Mg계열 스카른과 백운암에서 MgO-SiO₂ 성분과 CaO-SiO₂ 성분은 공통적으로 음의 상관관계를 나타내고 있어 스카른화작용에 의한 조성 변화를 보인다(Fig. 9). Na₂O 함량은 석회암에서 0.00~0.26 wt. %이고 스카른화작용 이후 Ca계열 스카른에서 0.03~0.34 wt. %로 전반적으로 일정한 함량을 보이지만, Fe₂O₃ 함량은 스카른화작용이 진행되면서 1.13~4.51 wt. %에서 5.00~12.32 wt. %로 현저하게 증가하고 있다. Na₂O 함량은 백운암에서 0.00~0.21 wt. %이고 스카른화작용 이후 Mg계열 스카른에서 0.06~0.88 wt. %로 미약한 변화를 보이지만,

Fe₂O₃ 함량은 스카른화작용이 진행됨에 따라 0.28~10.8 wt. %에서 8.57~17.81 wt. %로 증가하고 있다.

Na-Ca계열 스카른에서 MgO 성분은 3.42~5.83 wt. %로 Ca계열 스카른과 유사하지만, Na₂O 성분은 Mg계열 또는 Ca계열 스카른(0.05~0.88 wt. %)에 비하여 2.40~4.23 wt. %로 현저하게 부화된 경향을 보인다. 한편 철광석에서 MgO와 CaO 성분은 시료에 따라 상당한 차이를 보이지만, Na₂O 성분은 0.26~2.87 wt. %로서 상대적으로 높은 함량 분포를 나타내고 있다. 특히 Na-Ca계열 스카른에서 SiO₂ 함량이 감소됨에 따라 Fe₂O₃ 함량이 증가하며, 후퇴 스카른 단계에 철광석으로 변화되는 연속적인 진화 특징을 보인다(Fig. 9). 이러한 지화학적 변화 양상은 Mg계열 스카른 및 Ca계열 스카른과 비교하여 Na-Ca 스카른이 철광화작용과 매우 밀접하게 관련되어 있음을 시사하고 있다.

한편, 미량 성분 중 Sr 성분은 백운암에 비하여 석회암이 다소 높은 경향을 보인다. Mg계열, Ca계열 및 Na-Ca계열 스카른에서 Chondrite (McDonough and Sun, 1995)로 표준화한 REE는 각각 서로 상이한 특징을 보이고 있다. 특히 Mg계열 및 Ca계열 스카른에

Fig. 9. Major element oxide diagrams illustrating the effects of various skarn styles for the Pocheon marble protoliths with interpreted iron mineralization trends.

Fig. 10. Chondrite-normalized, whole-rock rare earth element (REE) patterns for the Pocheon magnesian, calcic and sodic-calcic skarns, and iron ores presented in Tables 4 and 5. Shaded area is range of REE contents for the sodic-calcic skarn. C1 chondrite REE normalization values are from McDonough and Sun (1995).

서 공통적으로 음의 Eu 이상치를 보이지만, Na-Ca계 열 스카른은 양의 Eu 이상치를 나타내고 있으며, 이는 조장석의 높은 산출빈도에 기인한다(Fig. 10). 한편, 철 광석에서도 Na-Ca계열 스카른과 같이 전반적으로 유사한 REE 분포양상을 나타내며, 조장석의 높은 산출 빈도에 기인하여 양의 Eu 이상치를 보인다. 특히 철광 석 중 PC-1시료는 자철석-매그네사이트-투각섬석-금운 모와 함께 황동석-황철석이 소량 수반되는 후퇴 스카 른 단계의 시료이며, 음의 Eu 이상치는 후퇴 스카 른 단계에서 조장석이 완전히 소멸된 결과로 해석된다 (Table 5).

6. 안정동위원소

포천 철광상의 광화시기가 백악기 광화작용으로 확 인됨에 따라 근원물질 및 스카른화작용과 관련된 열수 -탄산염암 반응비에 의한 진화 특성을 검토하기 위하여 탄산염광물, 황산염광물, 황화광물을 대상으로 산소, 탄소, 황 동위원소 분석을 실시하였다. 산소-탄소 동위원소 분석은 캐나다 McMaster University의 VG-OPTIMA 동위원소 질량분석기와 중국 Chinese Academy of

Science의 MAT235 질량분석기가 사용되었고, 표준시료 는 NBS-18과 NBS-19로서 산소-탄소 동위원소 값의 정 확도는 각각 McMaster University $\pm 0.04\%$, $\pm 0.08\%$, Chinese Academy of Science는 $\pm 0.2\%$, $\pm 0.2\%$ 이다. 황 동위원소 분석은 캐나다 Activation Lab. Ltd. 에서 수행하였고, 오차 범위는 $\pm 0.2\%$ 이다.

산소-탄소 동위원소 원암 대조군으로 선택한 백운암 과 석회암 시료는 스카른 외각부에 분포하며, 현미경 관찰 시 스카른 광물이 거의 함유되지 않은 암석으로 대부분 탄산염광물이 재결정화된 대리암에 해당된다. 이러한 탄산염암은 간혹 미립 운모류가 산출되며, 탄 산염암에 함유된 이질 성분이 열변성작용 시 정출된 변성광물로 추정된다. 또한, 스카른화작용에 의하여 재 정출된 탄산염광물은 Na-Ca계열, Ca계열, Mg계열 스 카른과 함께 철광석 및 맥상 시료로부터 선별하여 실 시하였다. 원암 대조군으로 선택한 포천 탄산염암은 해 성 석회암의 산소-탄소 동위원소 영역과 비교하여 매 우 빈화된 경향을 보이며(Table 6), 이러한 산소 동위 원소 편이는 열변성작용과 열수교대작용으로 추정된다.

스카른화작용 시 산소-탄소 동위원소의 변화는 원암 인 탄산염암과 열수의 동위원소 특성뿐만 아니라 온도,

Table 6. Oxygen and carbon isotope analyses of carbonates from the Pocheon deposit

Sample no.	Mineral	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ (‰)	Remarks
PC1103-4	dolomite	0.40	11.46	fresh dolostone
PC1101-3	dolomite	0.42	12.81	fresh dolostone
PC1103-6	dolomite	2.83	12.32	fresh dolostone
PC1103-11	dolomite	2.70	12.17	fresh dolostone
PC1001-2	dolomite	-4.14	5.78	Mg skarn
PC1001-3	dolomite	-5.16	6.28	Mg skarn
PC1001-21	dolomite	-4.35	6.38	Mg skarn
PC1002-1	dolomite	-5.94	7.00	Mg skarn
PC1101-33	dolomite	-7.61	7.67	Mg skarn
PC1103-19	dolomite	-5.65	8.45	Mg skarn
PC1103-12	dolomite	-3.58	8.75	Mg skarn
PC1103-21	dolomite	-3.07	8.83	Mg skarn
PC1103-5	calcite	1.43	12.21	fresh limestone
PC1001-13	calcite	0.56	6.51	bleached limestone
PC1001-28	calcite	-4.80	5.30	Na-Ca skarn
PC1001-11A	calcite	-2.50	7.15	Mg skarn
PC1001-11B	calcite	-3.30	6.74	Mg skarn
PC1001-24	calcite	-4.48	6.89	vein
PC1001-20	calcite	-2.89	4.08	vein
PC1101-7	calcite	-4.76	1.71	vein
PC1103-41	calcite	-4.67	2.91	vein
PC1103-16	calcite	-4.31	2.01	vein
PC1001-18	calcite	-3.50	5.70	vein

XCO_2 , 수/암 반응비에 따라 좌우된다(Zheng and Hoefs, 1993). 포천 탄산염암, 스카른 및 맥상 탄산염 광물의 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 값은 마그마 기원의 열수 교대작용에서 유도된 산소-탄소 동위원소 변화양상을 나타내고 있어(Fig. 11) 변성퇴적광상은 광상 성인 측면에서 배제된다. 즉 이러한 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 의 변화양상은 탄산염광물과 열수의 동위원소 평형 상태에서 유도된 반응관계를 시사하며, Zheng and Hoefs (1993)이 제시한 탄소-산소 동위원소 모암 반응식에 적용한 결과 포천 철광상의 스카르화 작용은 개방계 환경에서 유도된 $\text{XCO}_2=0.1$ 의 탄소 분압 조건과 조화적인 관계를 보이고 있다(Fig. 11). 그러나 맥상 방해석에서는 Mg계열 스카른과 비교하여 산소 동위원소 값이 상대적으로 매우 빈화된 양상을 보이며(Fig. 11), 이는 후기 빈화된 지표수와 반응한 결과로 해석된다(Hall *et al.*, 1988).

탄산염암 원암은 포천 백운암과 해성 석회암, 그리고 화성 기원의 탄산염광물은 Mg계열 스카른에서 정출된 백운석을 기준으로 검토한 결과, 스카르화작용과 관련된 수-암(W/R) 반응비와 생성온도는 $\text{XCO}_2=0.1$ 탄소 분압 조건에서 약 5이상의 높은 수/암 반응비와 함께 $500^\circ\sim 400^\circ\text{C}$ 의 온도영역으로 추정되며, 전형적인

Fig. 11. Water-rock interaction model of both the Pocheon marble protoliths (dash curve) and marine limestone (continuous curve) to form magnesian, calcic and sodic-calcic skarns, and iron ores. Fluid/rock ratios (values given on the curves) for open-system condition are shown on the infiltration curve for $\text{XCO}_2=0.1$. Boxes outlining the $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ fields for marine limestone and igneous calcite are from Bowman (1998).

스카른 광상에서 나타나는 동위원소의 경향과 일치한다(Bowman, 1998).

황 동위원소 포천 광상에서 황화광물은 황동석과 황철석이 철광체 내에서 미립 광염상으로 산출되며

Table 7. Sulfur isotope data of sulfides and sulfates from the Pocheon deposit

Sample no.	Mineral	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ (‰)	Associated minerals	Remarks
PC1001-26B	anhydrite	33.0	mt, ab, acm	prograde stage in Na-Ca skarn
PC1001-25	anhydrite	32.7	ab, grt, mt, cpx, epi, cal	prograde stage in Na-Ca skarn
PC-1	chalcopyrite-pyrite composite	14.8	mt, amp, phl	retrograde stage in Na-Ca skarn

See Table 3 for mineral abbreviations.

(Fig. 2), 소규모 동 광체가 보고된 바 있다(Kanda, 1969). 한편 포천 경석고는 열수 기원으로 국내 스카른 광상에서 처음 발견되었으며, Na-Ca계열 스카른에서 높은 산출 빈도를 보인다(Fig. 2). 특히 경석고는 추회석-조장석-자철석-석류석이 정출된 이후 후퇴 스카른 단계에서 생성된 각섬석-석영-방해석과 함께 수반되고 있으며, 이러한 황산염광물의 존재는 매우 높은 산화 환경에서 유도된 스카른화작용을 지시한다. 한편 황동석과 황철석은 전반적으로 자철석-매그네사이트 이후에 정출되며, 후기 스카른 단계에 광염상으로 산출된다. 포천 경석고의 $\delta^{34}\text{S}$ 는 32.7 ‰와 33.0 ‰, 황동석-황철석의 복합시료에서 $\delta^{34}\text{S}$ 는 14.8 ‰이며(Table 7), 포천 황 동위원소 값은 국내 열수광상의 황 동위원소 값과 비교하여 매우 높은 수치를 나타내고 있다. 이러한 황 동위원소 값은 마그마성 열수광상에서 비등작용에 의한 동위원소 분별작용 또는 주변 탄산염암에 함유된 황산염광물이 열수작용에 의하여 추출/유입 가능성을 고려할 수 있다. 한편 금성 광상과 태백산 지역에서 황화광물의 높은 황 동위원소 값은 탄산염암에 소량 함유된 황산염광물에 기인한 것으로 보고되었다(Ishihara *et al.*, 2002a; Ishihara *et al.*, 2002b). 포천 광상에서 황화광물과 황산염광물의 황 동위원소 값은 모두 높은 수치를 보이고 있으며, 이는 황 근원물질이 비등작용에 의한 동위원소 분별작용이라기 보다는 주변 탄산염암에 함유되어 있던 황산염광물이 수-암반응에 의하여 추출/유입된 것으로 해석된다. 한편, Na-Ca계열 스카른에서 황산염광물의 높은 산출 빈도는 산소 분압이 매우 높은 천부 환경에서 광화작용이 유도되었음을 시사하며, 조장석화작용은 Na성분의 공급과잉에 기인하고 있어 포천 탄산염암 중 증발암의 존재 가능성도 배제할 수 없다(Benavides *et al.*, 2007).

7. 토의 및 결론

포천 광상은 동시 생성 광상 또는 후기 생성 광상의 서로 상반된 이론이 제기된 바 있어 성인적 측면에서

재검토가 요구되는 광상이다. 포천 광상의 동시 생성 이론은 다음과 같이 부분적으로 해석상 이견을 보이고 있다. 변성퇴적 성인론에서는 철산화물-탄산염광물-규산염광물로 구성된 선캄브리아기 퇴적물이 광역변성작용에 의하여 형성되었거나(Kim, 1977), 흑운모 편암과 화성 기원의 앰피블라이트가 후퇴 변성작용에 의하여 철 광체로 부화되었다는 이론(Lee, 1979)이다. 그리고, 해저 화산성 배기형 광상 이론은 앰피블라이트의 기원으로부터 광상 성인을 해석하였으며, 철광석의 층상 조직은 광역변성작용 시 유도된 변성분화작용으로 언급하였다(So, 1977). 즉 포천 광상은 성인 측면에서 변성 퇴적광상 또는 접촉교대광상으로 양분되며, 이는 앰피블라이트와 철광체를 광역변성작용 또는 열수작용의 산물로 간주하는 해석상 문제로부터 출발하고 있다. 이 연구를 통하여 수행된 광화시기, 지화학적 및 동위원소 연구 결과를 종합적으로 검토한 결과, 포천 광상은 접촉교대작용에 수반되는 철광화작용으로 스카른화작용의 특징을 요약하면 다음과 같다.

1. 포천 철광상은 선캄브리아기 변성암을 기반으로 시대 미상의 변성퇴적암류 협제된 탄산염암에 발달한 약선대를 따라 백악기 화강암으로부터 공급된 고온성 광화유체에 의하여 형성된 근지성 스카른 광상으로 Ar-Ar과 K-Ar연대측정 결과에 의하면 광화시기는 약 110 Ma이며, 이는 명성산 화강암의 생성연대와 일치하고 있어 관계화성암으로 추정된다. 명성산 화강암은 주로 자철석 계열, I형, 중알루미나질~고알루미나질 지화학적 특징과 함께 분화가 매우 진행된 천부 암체의 특징을 보인다.

2. 포천 스카른은 탄산염암의 다양한 조성 특성에 따라 Ca계열 스카른, Mg계열 스카른 및 Na-Ca계열 스카른으로 배태되며, 각 스카른 유형별로 서로 상이한 광물조합을 보인다. 철광화작용은 주로 Na-Ca계열 스카른과 밀접한 연관성을 보이며, 동 광화작용은 후퇴 스카른 단계에 자철석에 중첩되어 광염상 국부적인 산상을 보인다. 기존 변성퇴적 기원에서 언급된 앰피블라이트는 접촉교대작용에서 유도된 Na-Ca계열 스카른

과 동일한 암상이며, 전진/후퇴 스카른 단계에서 정출된 광물조합(사장석-단사회석-자철석-석류석-금운모-녹립석-경석고-각섬석-녹니석-사문석-설석-인회석-탄산염 광물-석영)과 일치한다.

3. 산소-탄소 동위원소 결과에 의하면, 스카른화작용/철광화작용은 전반적으로 개방계($XCO_2=0.1$) 조건에서 유도되었으며, 전진 스카른 단계는 약 $500^{\circ}\sim 400^{\circ}C$ 의 온도 범위에서 유도된 높은 수압 반응비($W/R > 5$)의 진화 양상을 보인다. 황화광물과 경석고에 대한 황 동위원소 값은 반암형 광상에서 주로 나타나는 마그마 기원보다는 주변 탄산염암에 함유되어 있던 황산염광물로부터 용출, 공급되었을 가능성을 지시하며, Na-Ca 계열 스카른에서 경석고의 존재는 철광화작용이 산화분압이 매우 높은 천부 환경에서 유도되었음을 시사하고 있다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부(MSIP) 2012년도 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행한 경기육괴 선택 브리아 철광상의 성인 연구(NRF-2012RIA1A2005723)의 일부이며, 논문 심사에 유익한 조언을 주신 익명의 심사위원과 서정훈 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

References

- Benavides, J., Kyser, T.K., Clark, A.H., Oates, C. J., Zamora, R., Tarnovschi, R. and Castillo, B. (2007) The Mantoverde iron oxide-copper-gold district, III Region, Chile: The role of regionally derived, non-magmatic fluids in chalcopyrite mineralization. *Economic Geology*, v.102, p.415-440.
- Bowman, J.R. (1998) Stable-isotope systematics of skarns. In Lentz, D.R. (ed.) *Mineralized Intrusion-Related Skarn Systems*. Mineral. Assoc. Can., Short Course, v.26, pp.99-145.
- Go, J.S., Choi, S.-G., Seo, J., Park, J.-W. and Kim, S.-T. (2013) Skarn alteration in iron oxide-copper-gold systems the Pocheon magnetite deposit, Korea. In Jonsson, E. *et al.*, (ed), *Mineral Deposit Research for a High-Tech World. 12th Biennial SGA Meeting Proceedings*, v.3, p.1363-1365.
- Hall, D.L., Cohen, L.H. and Schiffman, P. (1988) Hydrothermal alteration associated with the Iron Hat iron skarn deposit, eastern Mojave Desert, San Bernardino County, California. *Economic Geology*, v.83, p.568-587.
- Hwang, J.H. and Kihm, Y.H. (2007) Geological Report of the Jipori Sheet (1/50,000). KIGAM, 54p.
- Ishihara, S., Kajiwar, Y. and Jin, M.S. (2002a) Sulfur content and isotopic ratio of Cambro-Ordovician carbonate rocks from South Korea: A possible source for Mesozoic magmatic-hydrothermal ore sulfur. *Resource Geology*, v.52, p.41-48.
- Ishihara, S., Jin, M.S. and Kajiwar, Y. (2002b) Possible carbonate origin of ore sulfur from Geumseong Mo deposit, South Korea. *Resource Geology*, v.52, p.279-282.
- Kanda, Y. (1969) Geology and ore deposit of Pocheon iron mine, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v.2, p.53-67.
- Kim, H.S. (1977) Mineralogy and petrology of the Precambrian iron deposits, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v.13, p.191-211.
- Lee, B.-J., Kim, Y.B. and Kee, W.-S. (2006) Geological Report of the Gisan Sheet (1/50,000). KIGAM, 39p.
- Lee, S.H. (1979) Ore petrological studies on the genesis of the metamorphic iron deposits in southern Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v.15, p.210-229.
- Lee, S.R., Cho, M., Cheong, C.S., Kim, H. and Ingate, M.T.D. (2003) Age, geochemistry, and tectonic significance of Neoproterozoic alkaline granitoids in the northwestern margin of the Gyeonggi massif, South Korea. *Precambrian Research*, v.122, p.297-310.
- Meinert, L.D. (1993) Skarn and skarn deposits. In Sheahan, P. and Cherry, M.E. (eds.) *Ore Deposit Model Volume II. Geoscience Canada, Reprint Series 6*. p.117-134.
- McDonough, W.F. and Sun, S.-S. (1995) The composition of the earth. *Chemical Geology*, v.120, p.223-253.
- Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Carvalho, E.R., Hitzman, M.W., Johnson, C.A., de Souza Filho, C.R. and Torresi, L. (2008) Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajas mineral province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, v.43, p.129-159.
- Pearce, J. A., Harris, N.B.W. and Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrology*, v.25, p.956-983.
- So, C.S. (1977) Origin of amphibolite and associated magnetite ore from the Pocheon iron mine, Korea. In Klemm, D.D. and Schneider, H.-J. (ed.) *Time- and Strata-bound Ore Deposits*. p.406-418.
- Wang, S. and Williams, P. Jour. (2001) Geochemistry and origin of Proterozoic skarns at the mount Elliott Cu-Au (-Co-Ni) deposit, Cloncurry district, NW Queensland, Australia. *Mineralium Deposita*, v.36, p.109-124.
- Yun, H.S., Hong, S.S. and Lee, Y.S. (2002) Petrology and petrochemistry of the Jurassic Daebo granites in the Pocheon-Gisanri area. *Jour. Petrol. Soc. Korea*, v.11, p.1-16.
- Zheng, Y.F. and Hoefs, J. (1993) Carbon and oxygen isotopic covariations in hydrothermal calcites. *Mineralium Deposita*, v.28, p.79-89.

2014년 4월 15일 원고접수, 2014년 5월 7일 1차수정, 2014년 5월 8일 게재승인