

## <Review>

# 한반도 중생대 철 광화작용의 재조명

서지은<sup>1,\*</sup> · 최선규<sup>1</sup> · 이영재<sup>1</sup> · Etsuo Uchida<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>와세다대학교 자원환경공학과

### 요 약

한반도에서 대표적인 양양, 홍천, 포천 철광상은 선캠브리아이언의 변성퇴적광상으로 보고된 바 있다. 그러나, 최근 양양광상이 트라이아스기(약 233-226 Ma)에 충돌 후 환경에서 섭장암 관입 이후 형성된 남-북 방향의 연성 전단대를 따라 일어난 파쇄작용과 함께 유입된 광화유체에 의해 216-212 Ma에 형성된 철산화물-인회석형(IOA-type) 광상임이 밝혀졌다. 그리고 최근 홍천 Fe-REEs 광상과 춘천 용화 Fe-Nb 광상이 카보네타이트와 관련된 화성기원의 광상으로 보고되었다. 홍천 카보네타이트 광상과, 용화 포스코라이트-카보네타이트 복합체의 광화연대는 각각 233-227 Ma와 195-193 Ma로 규명되었다. 포천 철광상도 최근에 모암인 석회암과 백운암이 열수작용에 의해 교대된 Ca계열, Mg계열 및 Na-Ca계열의 스카른형 광상으로 기재되었다. 철 광화작용은 주로 Na-Ca계열과 Mg계열 스카른대를 따라 산출되며, 후퇴 스카른 단계에 국부적으로 동 광화작용이 중첩된다. 광상 주변에 여러 시기의 변형작용이 일어났으며, 최후기에 일어난 주향이동 단층대를 따라 관입한 명성산 화강암(약 112 Ma)이 철 광화작용을 유도하였다. 한반도 내 고생대 말/중생대 초 대륙충돌대에 속하는 경기육괴 홍천과 양양 지역에서 충돌 이후 트라이아스기(약 230 Ma) 맨저라이트/섭장암을 형성한 맨틀/하부지각 기원의 마그마를 발생하였고, 이에 이어 알칼리 성분과 함께 Fe-P 성분이 다량 함유된 독특한 광화유체가 유입되어 Na-Ca-K 변질작용과 함께 IOA형 광화작용을 유도하였다. 양양 철광화작용과 홍천-용화 카보네타이트 광화작용은 국내에서 처음으로 확인된 트라이아스기 광화작용으로 조구적 측면에서 대륙충돌 이후 유도되는 후-충돌대형 화성활동과 연관된 맨틀기원의 알칼리계열 마그마와 관련이 있다.

**주요어:** 철광화작용, IOA, 포스코라이트-카보네타이트, 스카른, 양양

**Jieun Seo, Seon-Gyu Choi, Young Jae Lee and Etsuo Uchida, 2021, Review of the Mesozoic Iron Mineralization in South Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 57, no. 4, p. 615-628**

**ABSTRACT:** In the Korean Peninsula, the Yangyang, Hongcheon, and Pocheon iron deposits have been considered as metasediment origin deposits formed during Precambrian. However, recently, Yangyang iron deposit was confirmed as an iron oxide-apatite (IOA)-type deposit formed at 216-212 Ma by hydrothermal fluid injection with brecciation along the ductile shear zone after the intrusion of syenite in post-collisional tectonic setting during Triassic (about 233-226 Ma). And, the Hongcheon Fe-REEs deposit and the Chuncheon Yonghwa Fe-Nb deposit were reported as igneous origin related to carbonatite. The mineralization ages of Hongcheon carbonatite and Yonghwa phoscorite-carbonatite complex were reported as 233-227 Ma and 195-193 Ma, respectively. The Pocheon iron deposit was interpreted as a skarn-type deposit of Ca, Mg, and Na-Ca types, which were developed by hydrothermal metasomatism of limestone and dolomite. Iron ore mostly occurred within Na-Ca and Mg skarns, and was locally overlapped with the copper mineralization during retrograde skarn stage. During the last stage of deformation around the mine, strike fault movement occurred, and the Myeongseongsan granite (about 112 Ma) injected along the fault causing iron mineralization. In the late Paleozoic/early Mesozoic Hongseong to Yangyang collision belt of the Gyeonggi Massif, Triassic (ca. 230 Ma) mangerite/syenite formed from the magma generated from the mantle/lower crust during post-collisional stage. Subsequently, a unique mineralization fluid which contained a large amount of Fe-P components along with alkali components, induced IOA-type mineralization along with Na-Ca-K alterations. The Yangyang iron mineralization and Hongcheon-Yonghwa carbonatite mineralization are the first identified Triassic mineralizations in the Korean Peninsula and were related to mantle-

\* Corresponding author: +82-2-3290-3170, E-mail: [still4@korea.ac.kr](mailto:still4@korea.ac.kr)

origin alkaline magma which can be induced in a typical post-collisional stage igneous activity after continental collision.

**Key words:** iron mineralization, IOA, phoscorite-carbonatite, skarn, Yangyang

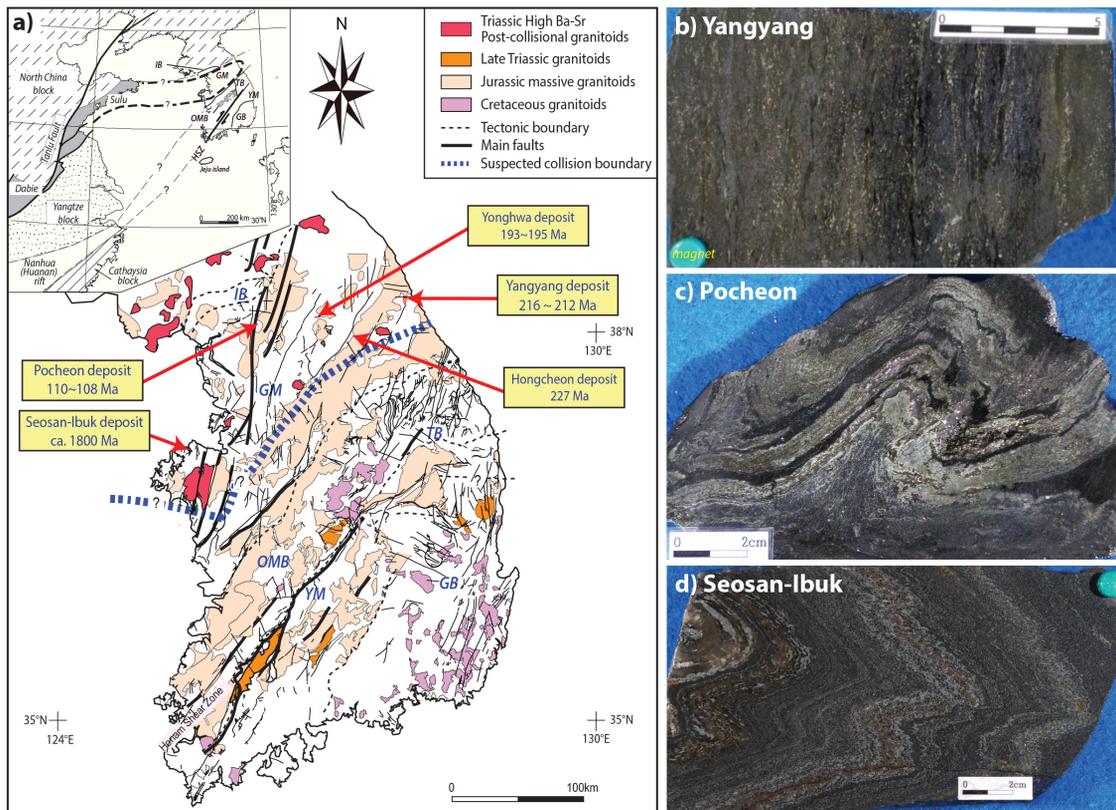
(*Jieun Seo, Seon-Gyu Choi and Young Jae Lee, Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea; Etsuo Uchida, Department of Resources and Environmental Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan*)

## 1. 서론

한반도의 대표적인 철광상으로 양양, 포천, 연천, 홍천, 신예미 광산이 있으며(그림 1), 양양과 포천 철광상은 선캠브리아이언의 변성퇴적광상으로(So, 1978; Kim, 1977; Lee, 1987, 1979), 홍천 철광상은 초기 퇴적기원 광상으로(Lee and Lee, 1989), 연천 철광상은 선캠브리아이언의 정마그마 광상으로(Chang *et al.*, 1987; Kim *et al.*, 1994), 신예미는 백악기 스카른광

상으로 보고된 바 있다(Yang, 1991; Seo *et al.*, 2007). 특히, 선캠브리아이언 철광상의 생성메커니즘은 대부분 퇴적기원 광상으로 해석되었으나, 최근 양양, 홍천과 포천지역은 절대연령측정 및 광물학적/지화학적 결과를 통해 각 광상 광화작용의 메커니즘과 생성시기가 새롭게 해석되었다(Seo *et al.*, 2015, 2016).

한국에서 철광화작용은 전반적으로 화성활동과 상당히 밀접한 관계를 보이고 있어, 광화작용을 이해



**Fig. 1.** (a) The locations and mineralization ages of the Fe deposits in the northern Gyeonggi Massif, (b) magnetite of the Yangyang IOA (iron oxide-apatite) deposit, (c) magnetite of the Pocheon skarn deposit, (d) magnetite of the Seosan-Ibuk BIF (banded iron formation) deposit. The mineralization ages of the Yangyang, Pocheon, Yonghwa, Seosan-Ibuk and Hongcheon deposits are from Seo *et al.* (2015, 2016), Kim *et al.* (2014, 2016, 2018).

하기에 앞서 화성활동의 특성을 이해할 필요가 있다. 특히, 한반도 중생대 화성활동은 각 지질시대에 따라 이러한 조구조적 진화 양상을 반영하고 있다. 트라이아스기에는 후-충돌대형 화성활동(Seo *et al.*, 2010), 쥐라기에는 조산대형 화성활동, 그리고 후기 백악기에는 후-조산대형 화성활동이 유도되었다(Kim, 1971a, 1971b; Maruyama *et al.*, 1994; Choi *et al.*, 2005a, 2005b; Uchida *et al.*, 2012). 이러한 화강암체는 지화학적/광물학적 특성뿐만 아니라 정치심도의 상당한 영향을 받고 있으며(Cho and Kwon, 1994), 지질시대에 따라 서로 다른 지열수계로 발전하게 되었다(Choi *et al.*, 2005b; Choi and Pak, 2007). 또한, 각각의 지열수계는 마그마의 정치심도에 따라 온도-압력의 지질조건에서 유체 이동성이 좌우되었으며, 이러한 광화유체의 진화과정은 조성 특성에 따라 특정 금속의 침전 환경에서 근본적인 차별성이 유도됨으로써 상이한 금속종이 수반되는 광상유형으로 배태되었다. 1960년대 한반도 광화작용은 주로 선캠브리아 이언과 백악기 두 시기에 집중되는 것으로 보고되었으며(Gallagher, 1963), 그 후 1970년대 연대분석을 통해 중생대 쥐라기와 백악기 광화작용이 다수 보고되었다(Kim, 1971a, 1971b; Shibata *et al.*, 1983; Shimazaki *et al.*, 1987; So *et al.*, 1987; Park *et al.*, 1988a, 1988b).

한편, 기존연구에서 중생대 트라이아스 시기에는 광화작용이 없는 것으로 간주되었으며, 주요 철광상은 대부분 선캠브리아이언의 퇴적기원 광상으로 간주되었다. 중생대 금속광화작용은 대부분 쥐라기 중기부터 신생대 초기에 걸쳐 집중된 경향성을 보이며(Kim, 1971a, 1971b; So and Shelton 1983; Park *et al.*, 1988a; 1988b; Oh, 1999; Choi *et al.*, 2005a), 중생대부터 신생대 초기까지 주요 광상유형은 마그마성 열수기원의 열극충진형 맥상 광상과 스카른형/열수교대형 광상이 대부분을 점유하고 있으나, 화성기원의 카보네타이트 광상이 최근 보고되었다(Kim *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2016). 이러한 경기육괴를 중심으로 트라이아스기 후-충돌대형 화성활동과 연계된 희유 금속광상의 부존 가능성이 이러한 연구결과들을 통해 검토되고 있다.

## 2. 트라이아스기/전기 쥐라기 후-충돌대형 광상

트라이아스기 화강암체는 주로 옥천변성대, 영남

육괴 및 경상분지의 일부 지역을 중심으로 분포하며, 약 2.3-3.9 kbar의 비교적 심부 환경(mozozone)에서 정치되었다(Hong and Cho, 2003). 최근 트라이아스기 화성암체가 경기육괴를 중심으로 다수 보고되었으며, 이러한 산상은 주로 대륙충돌 이후 얇아진 지각을 통해 맨틀물질이 유입되어 발생된 알칼리계열 지화학적 특징을 보인다(Choi *et al.*, 2009; Williams *et al.*, 2009; Seo *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2011). 그리고 이러한 후-충돌대형 마그마 활동과 관련된 금속광화작용은 경기육괴의 북부지역을 중심으로 양양, 홍천 및 춘천 지역에서 처음 확인되었다(Seo *et al.*, 2015, 2016).

광상 유형은 철산화물-인회석형(Iron Oxide-Apatite; IOA) 광상인 양양 철광상과 카보네타이트 Fe-REEs-Nb 광상인 홍천 및 용화 광상이다(Kim *et al.*, 2001, 2005; Park and Lee, 2003). 광화연대는 양양 철광화작용이 216-212 Ma (Seo *et al.*, 2015), 홍천 카보네타이트가 233-227 Ma (Kim *et al.*, 2016), 용화 포스코라이트-카보네타이트가 195-193 Ma (Seo *et al.*, 2016)로 각각 보고되었으며, 이는 트라이아스기 북중국 판과 남중국 판의 충돌 이후에 발생하는 맨틀기원 물질이 유입된 화성활동으로 과알칼리(ultrapotassic) 계열 후-충돌대형 마그마활동에서 유도된 금속광화작용을 시사하고 있다.

### 2.1 양양 IOA유형 철광상

양양 철광상은 강원도 양양군 장승리에 위치하며, 1967년~1994년 동안 누적 철 생산량이 약 800만톤(약 55 wt.% Fe)으로 국내 최대 규모 철광상으로 알려져 있다(표 1; Choi *et al.*, 2004). 지질은 선캠브리아이언의 편마암류와 변성퇴적암류가 넓게 분포하며, 후기에 이들을 관입한 섬강암류, 흑운모 화강암, 반화강암 및 페그마타이트 등으로 구성된다(그림 2).

양양 지역은 약 20개 철광체가 북측 방향에서 남측 방향으로 탐동, 도목, 양양, 수항, 양논, 논화 광체로 배열되어 있으며(그림 2), 광체는 괴상, 층상, 호상, 렌즈상으로 산출된다. 철광체의 규모는 폭 10-130 m, 연장 60-600 m, 심도 20-240 m이다. 광체는 전반적으로 각섬암, 각섬석-흑운모 편암류 및 변성 사암의 엽리에 평행하게 산출되며(Lee, 1979), 후기 변형작용과 쥐라기 및 백악기 화강암류의 관입으로 교란되어 있다. 특히, 섬강암은 변성퇴적암류와 철광체

**Table 1.** Summary of Mesozoic iron deposits in the Korean Peninsula.

	Deposits	Yangyang	Yonghwa	Hongcheon	Pocheon
	Comodity Characteristics	Fe, P	Fe, REEs, Nb	Fe, REEs	Fe, Cu
Old concept	host rocks	amphibolite (metasediments)	no data	metasediments	amphibolite (metasediments)
	ore-forming process	metamorphism of iron-rich sediment, alkali metasomatism, orthomagmatism, contact metasomatism/skarnification	no data	metasedimentation carbonatite	metamorphism of iron-rich sediment, amphibole-related sedimentation, contact metasomatism/skarnification
	mineralization age	Precambrian	no data	Precambrian	Precambrian
	references	<i>Kim et al., 1958; Lee and Kim, 1968; Lee, 1968; So et al., 1975; So, 1978; Kim, 1977; Lee, 1987; Lee and Stout, 1989; James et al., 2005</i>	no data	<i>Lee and Lee, 1989; Kim et al., 2001; Lee et al., 2002; Park and Lee, 2003; Kim et al., 2005</i>	<i>Kanda, 1969; Kim, 1977; So, 1977; Lee, 1979</i>
New concept	host rocks	deformed syenite	banded gneiss	biotite gneiss	carbonate rocks (dolomite>>calcite)
	ore-forming process (deposit type)	Hydrothermal replacement (IOA) <sup>1)</sup>	Orthomagmatism phosphorite-carbonatite <sup>2)</sup> (magmatic stage)	Magmatic-hydrothermal carbonatite <sup>2,3)</sup> (hydrothermal stage)	skarnification <sup>4)</sup> (Mg, Ca, Na skarns)
	mineralization age	Triassic <sup>1)</sup> 216-212 Ma	early Jurassic <sup>2)</sup> 195-193 Ma	Triassic <sup>3)</sup> 233-227 Ma	Cretaceous <sup>4)</sup> 110-108 Ma

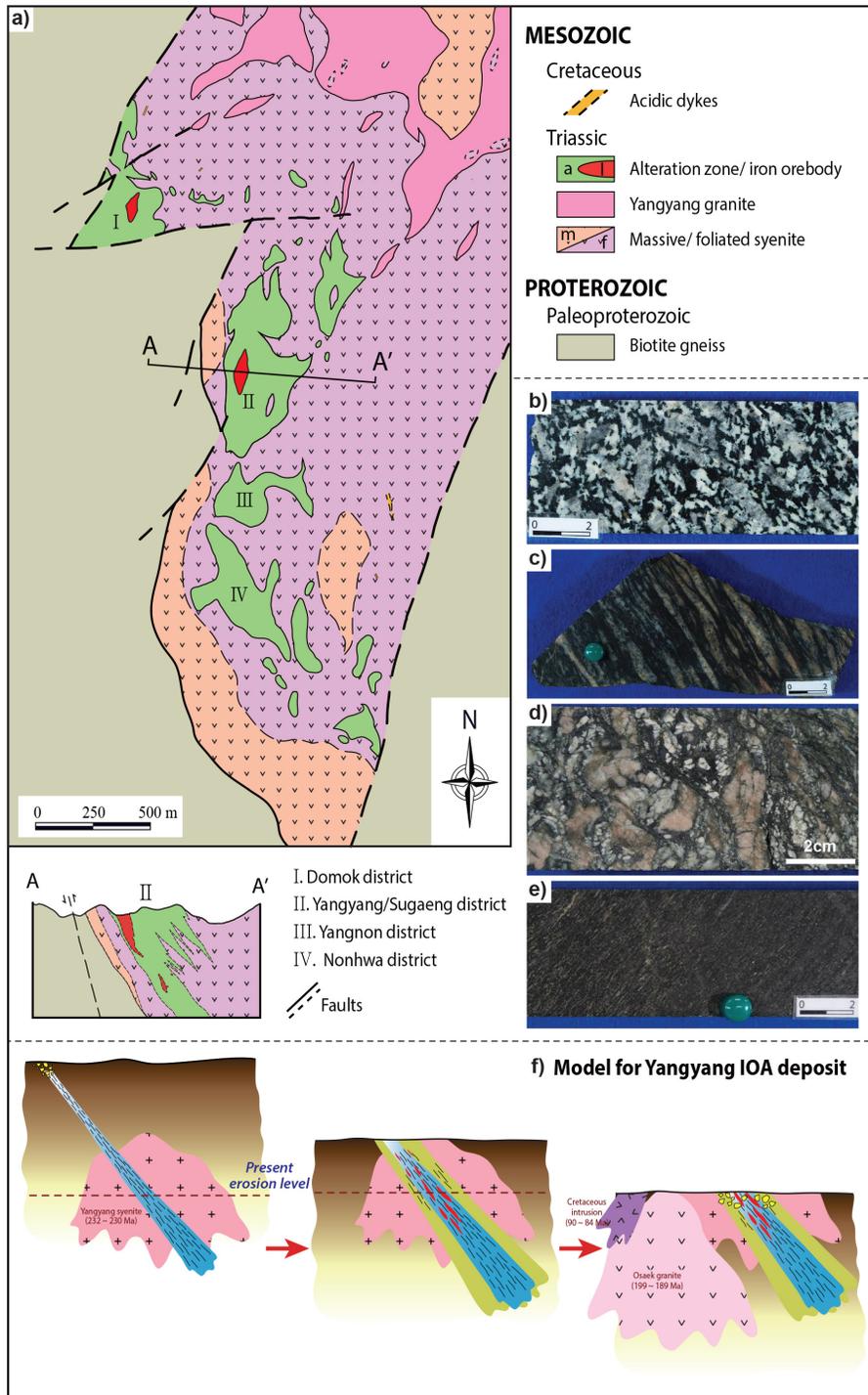
<sup>1)</sup>Seo et al., 2015; <sup>2)</sup>Seo et al., 2016; <sup>3)</sup>Kim et al., 2016; <sup>4)</sup>Go et al., 2014; Kim et al., 2014

간 성인적 연계성에서 서로 상이한 해석이 보고되고 있다. 양양 철광상에 대하여 기존에 언급된 성인은 접촉교대 광상(James et al., 2005), 함자철석 마그마가 변성퇴적암류를 관입한 정마그마 광상(Lee, 1968), 함철퇴적물이 변성작용으로 부화된 변성퇴적 광상(So et al., 1975; So, 1978), 함철퇴적물 각섬암질암(amphibolitic rocks)의 알카리교대작용에 의한 변성퇴적 광상(Kim, 1977, 1979; Lee, 1987; Lee and Stout, 1989)으로 화성, 퇴적, 변성작용과 같이 복합적으로 유도된 지질작용이 다양하게 언급되었다. 특히 섬장암류와 철광체는 각섬암의 알칼리 변성교대작용에 의한 변성분화작용의 산물로 해석되었다(Lee, 1979, 1987). 이는 호상철광상(BIF, banded iron formation)과 유사한 퇴적층으로 간주하여 함철퇴적물로부터 변성교대작용에 의하여 철과 알칼리 성분이 고체 상태에서 분리 농축되는 화강암화작용과 같은 이론적 배경에 기초하고 있으나, 이는 암상 차이에 따른 경계부에서 국지적으로 인지되는 변성교대 현상으로 대규모 광체를 형성할 수 없는 근본적인 문제가 있다(Choi et al., 2011). 변성퇴적암류의 외각부

를 따라 분포하며, 변형정도에 따라 반정질 엽리상, 반정질 괴상, 섬장암은 엽리상, 괴상 섬장암으로 각각 구분하였다(Lee, 1968). 광석광물은 주로 자철석과 함께 극소량의 황철석, 자류철석, 섬아연석, 황동석이 수반되며, 맥석광물은 각섬석, 흑운모, 녹니석, 알칼리장석, 사장석, 단사휘석, 인회석, 스피넬, 녹립석, 형석, 석영, 견운모, 백운모 등이다.

선캠브리아이언 퇴적기원의 철광상으로 간주되었던 양양광상은 철광상을 규제하는 모암인 변성퇴적암류, 각섬암류 및 외각부에 분포하는 섬장암체의 암상간의 암석학적 연계성과 구조적 변형과정/변질작용을 통하여 원암이 재정립되었으며(그림 2), 절대연령측정 및 광물학적/지화학적 결과를 통하여 생성연대 및 성인이 재검토되었다. 기존에 언급된 변성퇴적암류(주로 이질암, 석영-미사장석 변성사암, 층상 변성사암, 규암으로 기재), 각섬석-흑운모 편암, 각섬암은 대부분 근원암인 섬장암이 연성/취성 구조운동과 열수작용에 의한 변형/변질 산물이다(그림 2; Seo et al., 2015).

양양 광상에 대한 최근 발표된 성인은 철산화물-



**Fig. 2.** (a) Geological map and cross-section of the Yangyang iron ore deposit, (b) massive syenite, (c) mylonitic syenite in a shear zone, which formed by strong ductile deformation and resembles metasedimentary rocks or gneiss, (d) cataclastic syenite resulted by brittle deformation, (e) layer of magnetite-pyrite ore showing altered minerals such as biotite, (f) genetic model of the Yangyang IOA deposit (Seo *et al.*, 2015), the orebodies resulted from a series of alterations caused by the injection of hydrothermal fluid along the shear zone.

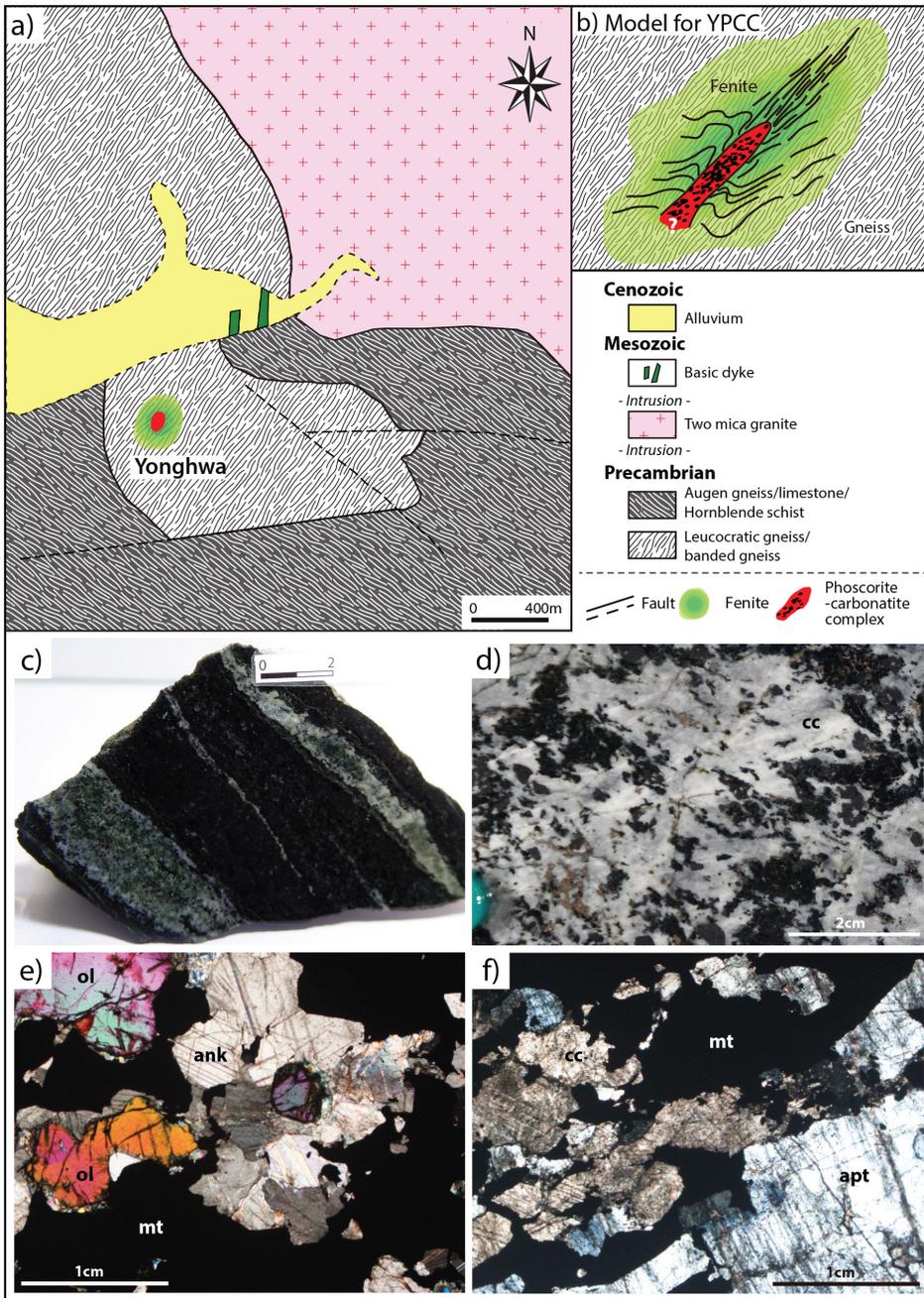
인회석형 광상 모델로써 심부 화성활동과 연계된 대규모의 Na, K, Ca 성분이 유입된 열수작용으로부터 유도된 철광화작용이다. 양양 지역 섭장암과 반려암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대분석 결과에 의하면 화성활동 시기는 약 233-226 Ma로 후-충돌대형 마그마활동 등 지시하고 있으며, 철광화작용과 성인적으로 밀접한 산출상태를 보이는 스피노와 인회석의 LA-ICP/MS 연대측정 결과는 각각 216 Ma, 212 Ma로 트라이아스기 광화시기를 지시하고 있다(Seo *et al.*, 2015). 결론적으로, 양양 철광상은 트라이아스기 섭장암 관입 이후 형성된 남-북 방향의 연성전단대를 따라 재차 파쇄작용이 발생하였고, 이와 같은 약선대를 따라 광화유체가 유입되어 트라이아스기 철-인회석 광화작용이 유도되었다(그림 2). 양양 광상의 철광화작용은 국내에서 처음으로 확인된 트라이아스기 광화작용으로 조구적 측면에서 대륙충돌 이후 유도되는 심부 알칼리 화성활동과 밀접하게 연계되어 있어 향후 경기육괴 북부를 중심으로 다양한 금속광상의 부존 가능성을 시사하고 있다. 특히, 한반도에서 고생대 말기/중생대 초기 경기육괴의 대륙충돌대인 홍성 지역으로부터 양양 지역까지 충돌 이후 순차적으로 유도된 일련의 화성활동은 트라이아스기 초기(약 230 Ma) 맨저라이트/섭장암과 같은 맨틀/하부지각 물질로부터 발생된 마그마 기원으로 추정된다(Yi *et al.*, 2016). 또한, 후차적으로 발생된 열수시스템은 알칼리 성분과 함께 Fe-P-F 성분이 다량 함유된 독특한 광화유체로써 Na-Ca-K 변질작용(조장석, 각섬암류 및 운모류)과 함께 IOA형 광화작용을 유도한 것으로 추정된다(그림 2).

## 2.2 홍천-용화 포스코라이트-카보네타이트 유형 철광상

강원도 홍천군 두촌면에 위치한 홍천 철광상 역시 초기에는 퇴적기원의 광상으로 보고되었으나(Lee and Lee, 1989), 최근 홍천 Fe-REEs 광상(Kim *et al.*, 2001, 2005; Lee *et al.*, 2002; Park and Lee, 2003)과 춘천시 사북면의 용화 Fe-Nb 광상(Seo *et al.*, 2016)은 지화학적/광물학적 자료를 통하여 카보네타이트 탄산염암체로 기재되었다(표 1). 홍천과 용화 광상의 지질은 공통적으로 경기편마암복합암체에 속하는 선캠브리아이언 흑운모 호상편마암과 흑운모-각섬석 편마암, 석류석 우백질 편마암 및 일부 석류석 흑운모 편암을 기반암으로 하여 소규모 함석류석 변

성염기성 암맥이 분포하며, 이를 관입한 쥐라기 화강암류와 백악기 반암으로 구성되어 있다. 홍천 광상은 암맥상으로 산출되며, 북부광체와 남부광체가 남북 방향으로 2 km 대상으로 분포하고 있다(Kim *et al.*, 2001, 2016). 한편, 용화 광상은 압쇄상 호상편마암 내의 구조대를 따라 포스코라이트-카보네타이트(phoscorite-carbonatite) 복합암체가 파이프상으로 관입하였으며, 부분적으로 주변 모암의 균열을 따라 분기된 망상 탄산염 세맥이 다수 산출된다(그림 3). 주로 자철석-감람석-탄산염광물-인회석으로 구성되어 있으며, 특징적으로 Nb형 콜롬바이트와 함REEs 광물이 함께 소량 수반된다(그림 3; Seo *et al.*, 2016). 반면에 홍천 철광상은 카보네타이트 암맥으로 주구성 광물인 탄산염광물-자철석과 함께 소량의 모나자이트-인회석-Nb형 콜롬바이트로 구성되지만, 포스코라이트의 주구성광물인 감람석-투휘석의 존재가 확인되지 않는다(그림 3). 즉, 경기육괴의 용화 광상은 암석학적/광물학적 분류 기준(Le Maitre, 2002)에 따라 포스코라이트-카보네타이트 유형에 해당되지만, 홍천 카보네타이트 암체는 광물학적 기준에서 차별성을 보이며, 카보네타이트로 간주된다. 또한, 지화학적 특성에 따라 성인적 진화과정을 비교하면, 용화 광상은 카보네타이트 마그마의 분화 초기 산물로 해석되는 반면(Seo *et al.*, 2016), 홍천 광상은 분화가 진행된 후기 열수 진화 산물로 추정된다(그림 4; Kim *et al.*, 2016). 홍천 카보네타이트는 SHRIMP 연대에서 233-227 Ma (Kim *et al.*, 2016), 용화 포스코라이트-카보네타이트는 K-Ar 연령에서 195-193 Ma (Seo *et al.*, 2016)로 각각 보고되었으며, 이러한 생성연대는 트라이아스기 북중국(Sino-Korea) 판과 남중국(Yangtze) 판의 충돌 이후에 발생하는 전형적인 후-충돌대형 화성활동인 맨틀기원의 알칼리계열 마그마 유입과 관련된 Fe-REEs-Nb 성분이 부화된 광화작용을 시사하고 있다.

경상분지의 울산광상도 카보네타이트 광상으로 언급된 바 있으나(Yang and Hwang, 1999; Yang *et al.*, 2001, 2003), 현재까지 국내에서 확인된 카보네타이트 암체는 경기육괴 용화와 홍천 광상이다. 울산 광상이 카보네타이트로 보고된 이유는 탄소-산소 안정동위원소 분석 결과가 천해퇴적기원 석회암부터 화성기원까지 다양하게 해석되었기 때문이다. 이러한 문제는 분석 시료에 대한 선택적 분석에 기인한



**Fig. 3.** (a) Geological map and location of the Yonghwa iron ore deposit, (b) schematic diagram of intrusive pipe type model for the Yonghwa phoscorite-carbonatite complex, (c) photographs of representative polished hand specimens of phoscorite from the Yonghwa area, which shows dark green color, (d) photographs of representative polished hand specimens of carbonatite from the Yonghwa area, which shows color ranging from grey to light greyish white, (e) phoscorites mainly consisting of olivine, apatite, magnetite, phlogopite, dolomite, and clinohumite with accessory pyrrhotite, monazite, uraninite, baddeleyite, Nb-oxides such as columbite and pyrochlore, (f) carbonatites mainly composed of calcite and various other carbonate minerals (e.g., dolomite, ankerite, siderite, magnesite, strontianite), magnetite, apatite, minor mica, olivine and accessory graphite, ilmenite, pyrrhotite, and pyrite. Abbreviations: ank-ankerite; apt-apatite; cc-calcite; ol-olivine; mt-magnetite.

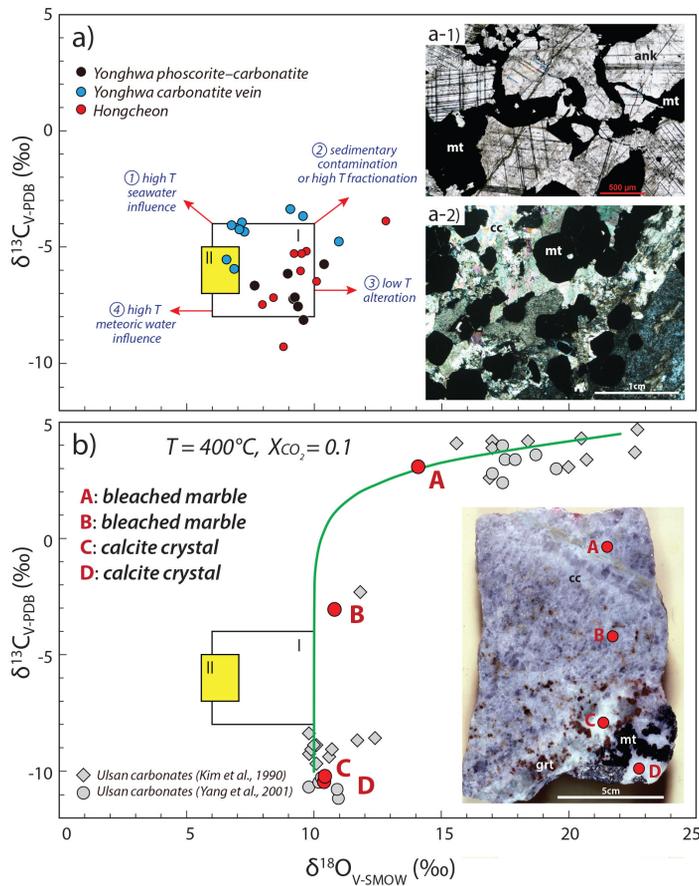
오류로, 한 시편에서 탄소-산소 안정동위원소를 분석한 결과 점이적으로 변화하는 값을 얻었는데 이는 열수에 의해 탄산염암이 교대되어 맨틀 값으로 이동된 것으로, 울산 철광상은 석회암을 교대한 전형적인 스카른 광상이다(그림 4; Kim *et al.*, 1990; Choi *et al.*, 2003; Seo *et al.*, 2019).

### 3. 후기 백악기 후조산대형 철광상

#### 3.1 포천 철광상

포천 철광상은 경기도 포천군 영북면 금곡동에 위

치하며, 지질은 선캠브리아이언 연천계의 편마암류(화강 편마암, 반상변정 편마암(감악산 섬장암류), 안구상 편마암, 호상 편마암)와 변성 퇴적암류(흑운모-각섬석 편암, 각섬암, 석회암, 백운암, 석회규산염암, 규암)의 기반암과 이들을 관입한 트라이아스기 섬록암, 쥐라기 포천 화강암, 복운모 화강암, 함석류 석 화강암 및 백악기 명성산 화강암 등으로 구성된다(그림 5). 광상 주변의 구조운동은 광역변성작용과 관련된 압축변형작용, 감악산 섬장암에 발달한 전단대를 따라 나타나는 연성전단작용( $226 \pm 1.2$  Ma)과 이후 압축변형작용이 중첩되었다(그림 6). 또한,



**Fig. 4.** (a) Carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) vs. oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) isotopic values of the carbonate minerals from the Yonghwa and Hongcheon deposits (Seo *et al.*, 2016); a-1) the magnetite filling between early forming calcite crystal in Yonghwa carbonatite, a-2) magnetite which have euhedral shape and has been crystallized earlier than carbonate minerals in Hongcheon carbonatite, (b) carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) vs. oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) isotopic values of the carbonate minerals from the Ulsan deposit, which formed at  $400^\circ\text{C}$ ,  $X_{\text{CO}_2}=0.1$  conditions in skarn front around iron ore body (Choi *et al.*, 2003). The continuous change of the C-O isotope value in single sample, indicate a hydrothermal effect rather than mantle origin. I = primary igneous carbonatite field (Taylor *et al.*, 1967), II = Primary mantle carbonate (Keller and Hoefs, 1995). Abbreviation: grt= garnet.

최후기 주향이동 단층의 구조운동이 유도되었으며, 이 단층대를 따라 관입한 명성산 화강암(약 112 Ma)이 철광화작용을 야기시켰다(Kim *et al.*, 2014). 철광체는 변성퇴적암류(주향 N-S, 경사 60-70° W)를 모암으로 하여 변성퇴적암류의 엽리와 조화적인 방향(55-75° W)으로 경사진 렌즈/포켓상 광체로 배태된다. 광체의 연장/폭은 약 100-300 m/4-25 m의 규모로 심도 380 m까지 독립된 6개 광체가 발달되었으며, 철 품위는 31-53 wt.%이다. 철광석은 간혹 자철석/투각섬석 박층(1 mm)으로 구성된 소습곡 잔류구조가 관찰된다(Go *et al.*, 2014). 광석광물은 주로 자철석과 마그헤마이트(maghemite)로 소량의 황동석과 경철석이 수반되며, 맥석광물로는 석영, 투각섬석, 활석, 사문석, 투회석, 녹렴석, 녹니석, 방해석, 백운모, 견운모, 각섬석 및 석류석 등이다.

포천 철광상의 기존에 언급된 성인은 화강반암에 의한 탄산염암의 교대작용에 의하여 형성된 접촉교대 광상(표 1; Kanda, 1969; Kim *et al.*, 2014), 광체의 모암인 각섬암은 염기성 분출암으로 층상형 화산기원 광상(volcanic exhalation; So, 1977), 염기성 분

출암 기원의 각섬암이 후퇴변성작용 시 Fe와 Ca성분의 화학적 재분배작용으로 형성된 변성퇴적 광상(Kim, 1977; Lee, 1979)으로 해석되었다. 선캠브리아이인 퇴적기원의 철광상으로 간주되었던 포천 철광상 성인은 절대연령 측정 및 광물학적/지화학적 결과를 통하여 생성연대 및 성인이 재검토되었다.

포천 철광상은 모암인 석회암과 백운암의 다양한 탄산염암이 열수에 의해 교대된 전형적인 스카른 광상이며, Ca계열, Mg계열 및 Na-Ca계열의 다양하고 독특한 스카른이 발달하였다(그림 5; Go *et al.*, 2014). 철광화작용은 주로 Na-Ca계열과 Mg계열 스카른대를 따라 배태되고 있으며, 후퇴 스카른 단계에 국부적으로 동 광화작용이 중첩된다. Na-Ca계열 스카른은 추회석(acmite)-조강석-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. 포천 황동위원소비( $\delta^{34}\text{S}$ )는 황화광물(황동석-황철석 혼합물)

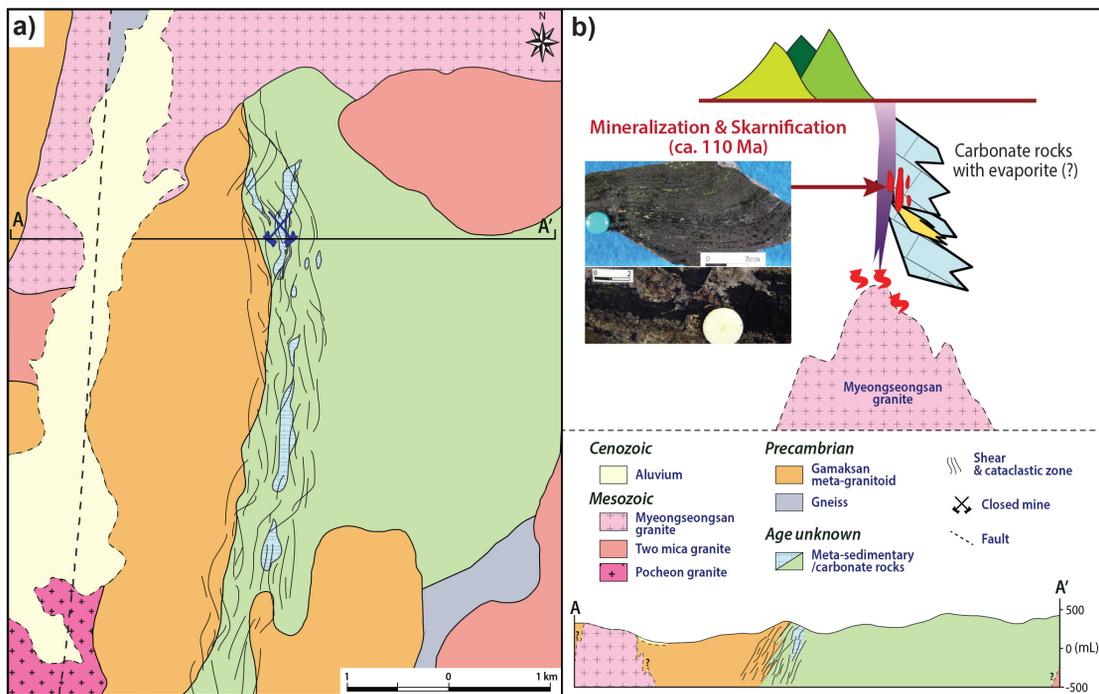


Fig. 5. (a) Geological map and cross-section of the Pocheon iron ore deposit, (b) skarnification photo and model for iron ore-forming process in Pocheon deposit.

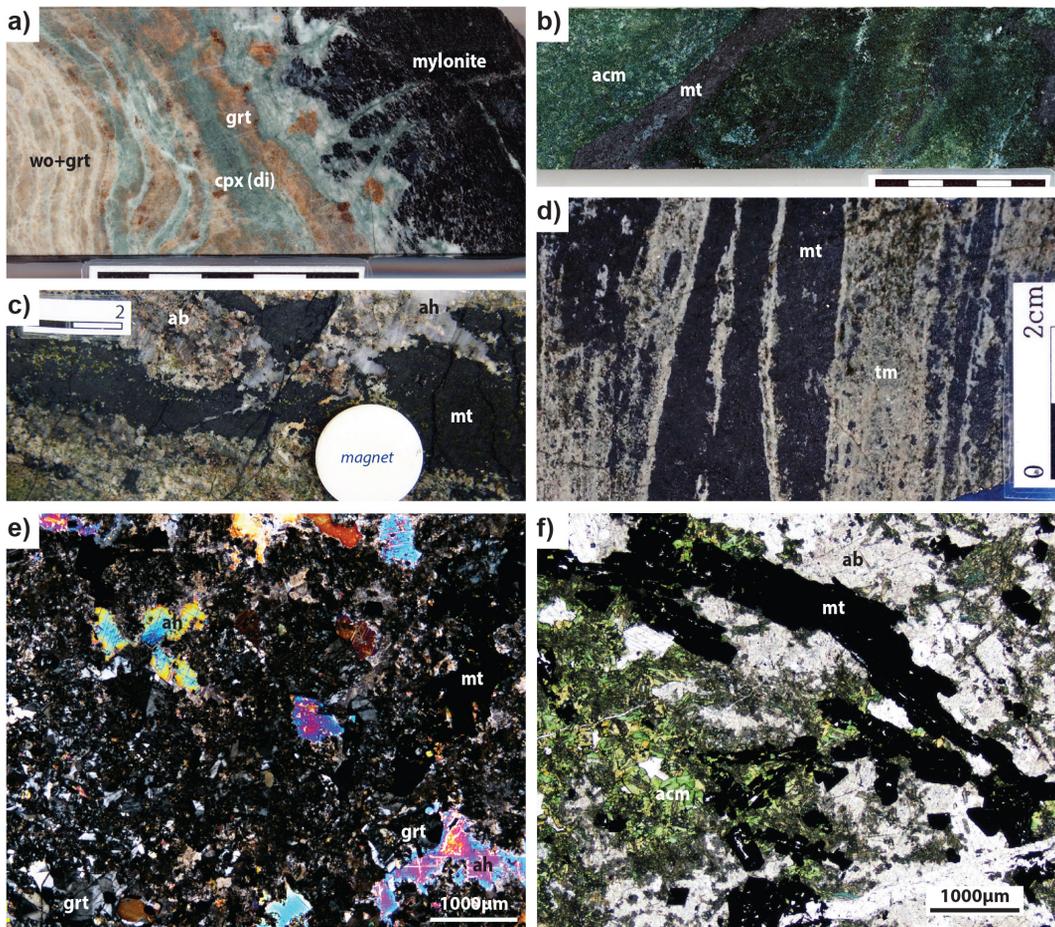
에서 14.8%과 경석고에서 33.0%로 모두 매우 높은 수치를 보이며, 이러한 황동위원소비는 근원물질이 주변 탄산염암에 함유된 증발암의 황산염광물로부터 추출 유입되었을 가능성을 시사하고 있다. 포천 광상 주변의 전단대는 파쇄대가 중첩되어 발달하여 있으며, 백악기 화강암으로부터 공급된 고온성, 고염농도의 광화유체가 이러한 약선대를 따라 유입되었고 강력한 산화 환경에서 약 500-400°C의 온도범위의 근지성 스카른화작용과 함께 철광화작용이 유도되었다(그림 6). 한편, 포천 스카른내 금운모의 Ar-Ar 및 K-Ar 연대측정에서 110.3-108.3 Ma로 보고되었으며(Kim *et al.*, 2014), 이는 공간적으로 인접한 명성산 화강암의 정지시기(112 Ma)와 일치하고

있어 명성산 화강암이 관계화성암으로 간주된다.

#### 4. 토 의

1960년대 한반도 광화작용은 주로 선캠브리아이언과 백악기 두 시기에 집중되는 것으로 보고되고 간주된 후, 실제 광화시기가 선캠브리아이언의 철광상으로 밝혀진 광상은 서산-이북의 호상철광상(BIF)과 연천 지역의 Fe-Ti(-V)광상이 대표적 광상이다.

서산-이북 철광상은 충청남도 서산군 이북면에 분포하며, 선캠브리아이언의 변성퇴적암류 및 화강편마암을 기반암으로 이를 관입한 백악기 화성암류로 구성된다. 철광석은 주로 산화철의 형태인 적철석과



**Fig. 6.** Photomicroscopies of typical specimen of Pocheon iron deposit. (a) Ca skarn, (b) Na skarn, (c) Na-Ca skarn, (d) Mg skarn, (e) the mineral assemblage of albite, anhydrite, and garnet in Na-Ca skarn, (f) the mineral assemblage of albite, acmite, and magnetite in Na skarn. Abbreviations: ab-albite, acm-acmite, ah-anhydrite, cpx-clinopyroxene, di-diopside, tm-tremolite, wo-wollastonite.

석영이 교호하는 호층으로 산출된다. 서산지역 철함유 층은 높은  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 와  $\text{SiO}_2$ 의 함량 및 양의  $\text{Eu}(+)$  이상을 보이며 열수변질을 경험하였는데, 이는 다른 선캠브리아이언의 호상철광상과 유사한 지화학적 특징에 해당한다(Kim *et al.*, 2018). 쇠설성 저어콘의 SHRIMP U-Pb연대는 약 2.5 Ga 및 1.9-1.75 Ga이며, 화강 편마암 관입 연대(약 1.7-1.65 Ga)와 함께 고려하여 보면 철층은 선캠브리아이언 고원생대 퇴적된 것으로 해석된다(Kim *et al.*, 2018).

연천 함티타늄철광상도 선캠브리아시기의 퇴적기원 철광상으로 일부 보고된 바 있으나(The Geological Society of Korea, 1990), 대부분 알칼리 반려암질암 마그마로부터 분화된 정마그마 광상으로 보고되었다(Chang *et al.*, 1987; Kim *et al.*, 1994). 연천 철광상은 선캠브리아이언 변성퇴적암류인 연천층군을 관입한 반려암질암 내에 발달하는 철광상으로 티타늄과 바나듐의 함량이 높은 함티타늄자철석 광상이다. 경기도 연천군 관인면 삼울리에 위치한 연천 철광상의 지질은 선캠브리아 변성암류를 기반암으로 하여 변성퇴적암류, 흑운모 편마암, 흑운모-각섬석 편암, 대리암, 운모편암을 후기의 관입한 반려암질암, 흑운모 화강암, 석영반암과 염기성 암맥 등으로 구성되며, 철광상은 반려암질암에 배태되어 있다. 신원생대에 관입한 Fe, Ti, V이 풍부한 염기성마그마에서 기원하여 반려암질 마그마와 넬슨나이트질 마그마로 불혼화 분리를 경험하게 된다. 분리된 반려암질 마그마는 우흑질반려암에서 석영문조암으로 분화되고, 동시에 넬슨나이트질 마그마는 정출되는 광물의 밀도 차이에 의해 괴상의 Fe-Ti 광석과 인회석을 다량 함유한 Fe-Ti-P 광석으로 각각 고화되었다(Seo *et al.*, 2014).

낮은 탄소-산소 안정동위원소 값에 기인하여 화성기원의 카보네타이트로 보고된 바 있는 울산 철광상은 석회암의 재용융으로 재해석된 바 있으나(Yang *et al.*, 2001, 2003) 이는 상당히 높은 F 활동도가 요구되지만(Lentz, 1999), 울산 철광상에서는 어떠한 함F 광물도 확인된 바가 없다. 또한, 퇴적기원 탄산염암이 열수작용에 의해 변질된 것임을 한 시편에서 탄소-산소 안정동위원소의 점이적인 변화를 통해 확인할 수 있었다(그림 4).

앞서 언급했듯이 한반도 중생대 화성활동은 각 지질시대에 따라 다른 조구조적 진화 양상을 보인다(트라이아스기에는 후-충돌대형(post-collisional type)

화성활동, 쥐라기에는 조산대형(orogenic type) 화성활동, 후기 백악기에는 후-조산대형(post-orogenic type) 화성활동). 이는 지화학적/광물학적 특성뿐만 아니라 정치심도의 상당한 차이를 보이고 있으며, 지질시대에 따라 각기 지열수계로 발전하였으며, 이와 같이 상이한 조구조환경과 더불어 다양한 광상이 형성될 수 있었다.

한반도 고생대 말기/중생대 초기 경기육괴의 대륙충돌대인 홍성 지역으로부터 양양 지역까지 충돌 이후 순차적으로 유도된 일련의 화성활동은 트라이아스기 초기(약 230 Ma) 맨저라이트/섬장암과 같은 맨틀/하부지각 물질로부터 발생된 마그마 기원으로 추정되며(Seo *et al.*, 2010; Yi *et al.*, 2016), 후차적으로 발생된 열수시스템은 알칼리 성분과 함께 Fe-P-F 성분이 다량 함유된 독특한 광화유체로써 Na-Ca-K 변질작용(조장석, 각섬암류 및 운모류)과 함께 IOA형 광화작용을 유도한 것으로 추정된다. 특히, 양양 광상의 철광화작용은 국내에서 처음으로 확인된 트라이아스기 광화작용으로 조구조적 측면에서 대륙충돌 이후 유도되는 심부 알칼리 화성활동과 밀접하게 연계되어 있으며, 홍천-용화 카보네타이트의 생성연대 역시 트라이아스기 북중국(Sino-Korea) 판과 남중국(Yangtze) 판의 충돌 이후에 발생하는 전형적인 후-충돌대형 화성활동인 맨틀 기원의 알칼리계열 마그마 유입과 관련된 Fe-REEs-Nb 광화작용을 시사하고 있다.

## 5. 결론

선캠브리아이언 퇴적기원의 철광상으로 간주되었던 양양 철광상은 광상을 규제하는 모암인 변성퇴적암류, 각섬암류 및 외각부에 분포하는 섬장암체의 암상별 암석학적 연계성과 구조적 변형과정/변질작용에 의해 원암이 재검토되었는데, 기존에 언급된 변성퇴적암류, 각섬석-흑운모 편암, 각섬암은 연성/취성 구조운동과 열수작용에 의한 변형/변질 산물로 근원암은 대부분 섬장암으로부터 유래되었다. 양양 섬장암과 반려암의 SHRIMP U-Pb 저어콘 연대 결과에 의하면 화성활동 시기는 약 233-226 Ma로써 후-충돌대형 마그마활동을 지시하고 있으며, 철광화작용과 성인적으로 밀접한 산출상태를 보이는 스피린과 인회석의 LA-ICP-MS 연대가 각각 216 Ma 및

212 Ma로서 트라이아스기 광화시기를 지시하고 있다. 결론적으로 양양 철광상은 트라이아스기 섭각암 관입 이후 형성된 남-북 방향의 연성전단대를 따라 재차 파쇄작용과 함께 유입된 광화유체에 의해 형성된 철산화물-인회석형 광상(IOA-type)으로써 심부 화성활동과 연계된 대규모의 Na, K, Ca 성분을 유입시킨 열수작용에 의해 철광화작용이 유도되었다.

홍천 철광상도 초기에는 퇴적기원의 광상으로 보고되었으나, 최근 연구 결과는 홍천과 춘천 용화 광상이 지화학적/광물학적 자료를 통하여 각각 카보네타이트와 관련된 화성기원 광상으로 규명되었다. 특징적으로 용화 광상은 감람석과 같은 규산염광물-탄산염광물-인산염광물이 수반되는 포스코라이트-카보네타이트 복합체로 산출되는 반면에 홍천 광상은 포스코라이트 없이 주로 탄산염광물이 우세한 카보네타이트로 산출된다. 이러한 지화학적 산출 특성을 통하여 볼 때 용화 광상은 카보네타이트 마그마의 분화 초기 산물이며, 홍천 광상은 분화가 진행된 후기 진화 산물로 추정된다. 또한, 광화연대로 홍천 카보네타이트로부터 233-227 Ma SHRIMP 모나자이트 연령과 용화 포스코라이트-카보네타이트에서는 195-193 Ma K-Ar 금운모 연령이 각각 보고되었으나, 연대측정의 한계를 고려해 보면 용화 및 홍천 카보네타이트 관련 철광상은 모두 트라이아스기 한반도 대륙충돌(ca. 230 Ma) 후 화성활동과 관련된 광상으로 추정된다.

포천 철광상은 선크브리아이언 변성퇴적광상 및 접촉교대광상으로 해석되었으나, 탄산염암을 모암으로 Ca계열, Mg계열 및 Na-Ca계열 스카른이 발달한 전형적인 스카른형 광상이다. 철광화작용은 주로 Na-Ca계열 및 Mg계열 스카른대를 따라 배태되고 있으며, 후퇴 스카른 단계에 국부적으로 동 광화작용이 중첩된다. 포천 철광화작용과 관련된 열수작용은 국내 타 스카른 광상과 비교하여 Na성분이 부화된 광화유체의 특징을 지시하며 경석고의 높은 산출 빈도는 강한 산화환경을 지시하고 있다. 포천 스카른 광상에 대한 Ar-Ar 및 K-Ar 금운모 연대측정을 통해 110.3-108.3 Ma를 얻었으며, 이는 공간적으로 인접한 명성산 화강암의 정치시기(112 Ma)와 일치하고 있어 단층대를 따라 관입한 명성산 화강암(약 112 Ma)이 철광화작용을 유도한 관계화성암에 해당된다.

## 감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2019R1I1A1A01063546).

## REFERENCES

- Chang, H.W., Yum, B.W. and Park, N.Y., 1987, Petrochemical study on the alkaline gabbroic host rocks of titaniferous magnetite deposits in Gonamsan, Yeoncheon-Gun, South Korea. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 20, 85-95 (in Korean with English abstract).
- Cho, D.R. and Kwon, S.T., 1994, Hornblende geobarometry of the Mesozoic granitoids in South Korea and the evolution of the crustal thickness. *Journal of the Geological Society of Korea*, 30, 41-61 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-G., Kim, S.T. and Lee, J.G., 2003, Stable isotope systematics of Ulsan Fe-W skarn deposit, Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 78-79, 601-606.
- Choi, S.-G., Koo, M.-H., Kang, H.-S. and Ahn, Y.H., 2011, Major molybdenum mineralization and igneous activity, south Korea. *Economic and Environmental Geology*, 44, 109-122 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.-G., Kwon, S.-T., Lee, J.-H., So, C.S. and Pak, S.J., 2005a, Origin of Mesozoic gold deposits in South Korea. *Island Arc*, 14, 102-114.
- Choi, S.-G. and Pak, S.J., 2007, The origin and evolution of the Mesozoic ore-forming fluids in South Korea: Their genetic implications. *Economic and Environmental Geology*, 40, 517-535 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.G., Pak, S.J., Lee, P.K. and Kim, C.S., 2004, An Overview of Geoenvironmental Implications of Mineral Deposits in Korea. *Economic and Environmental Geology* 37, 1-19 (in Korean with English abstract).
- Choi, S.G., Rajesh, V.J., Seo, J., Park, J.W., Oh, C.W., Pak, S.J. and Kim, S.W., 2009, Petrology, geochronology and tectonic implications of Mesozoic high Ba-Sr granites in the Haemi area, Hongseong Belt, South Korea. *Island Arc*, 18, 266-281.
- Choi, S.-G., Ryu, I.-C., Pak, S.J., Wee, S.M., Kim, C.S. and Park, M.E., 2005b, Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geology Reviews*, 26, 115-135.
- Gallagher, 1963, *Mineral Resources of Korea* 3(A, B) 124, 118.
- Go, J.S., Choi, S.-G., Kim, C.S., Kim, J.W. and Seo, J., 2014, Skarn evolution and Fe-(Cu) mineralization at the Pocheon deposit, Korea. *Economic and Environmental Geology*, 47, 335-349 (in Korean with English abstract).
- Hong, S.S. and Cho, D.R., 2003, Late mesozoic-Cenozoic

- tectonic evolution of Korea (3). KIGAM, KR-03-01, 455-526.
- James, L.P., Park, M.E. and Burt, D.M., 2005, World Skarn Deposits: Skarns of Asia outside of China and Japan. Economic Geology 100 Anniversary Volume. Soc. of Economic Geologist, LITTLETON, Appendix, 74, 1-6.
- Kanda, Y., 1969, Geology and ore deposit of Pocheon iron mine, Korea. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 2, 53-67 (in Korean with English abstract).
- Keller, J. and Hoefs, J., 1995, Stable isotope characteristic of recent natrocarbonatites from Oldoinyo Lengai. In: Bell, K., Keller, J. (Eds.), Carbonatite Volcanism: Oldoinyo Lengai and the Petrogenesis of Natrocarbonatites. Springer, Berlin, 113-123.
- Kim, C.S., Go, J.S., Choi, S.-G. and Kim, S.-T., 2014, Geology, mineralization, and age of the Pocheon Fe (-Cu) skarn deposit, Korea. Economic and Environmental Geology, 47, 317-333 (in Korean with English abstract).
- Kim, C.S., Jang, Y., Samuel, V.O., Kwon, S., Park, J.W., Yi, K. and Choi, S.G., 2018, Petrogenesis, detrital zircon SHRIMP U-Pb geochronology, and tectonic implications of the Upper Paleoproterozoic Seosan iron formation, western Gyeonggi Massif, Korea. Journal of Asian Earth Sciences, 157, 78-91.
- Kim, H.S., 1977, Mineralogy and petrology of the Precambrian iron deposits, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 13, 191-211.
- Kim, K.H., Lee, H.J. and Chon, H.T., 1994, Ore genesis of the Yonchon titaniferous iron ore deposits, South Korea. Economic and Environmental Geology, 27, 117-130 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Park, J.K., Yang, J.M. and Yoshida, N., 1990, Petrogenesis of the carbonate and serpentinite rocks from the Ulsan iron mine. Journal of the Geological Society of Korea, 26, 407-417 (in Korean with English abstract).
- Kim, N., Cheong, C.S., Yi, K., Jeong, Y.J. and Koh, S.M., 2016, Post-collisional carbonatite-hosted rare earth element mineralization in the Hongcheon area, central Gyeonggi massif, Korea: Ion microprobe monazite U-Th-Pb geochronology and Nd-Sr isotope geochemistry. Ore Geology Reviews, 79, 78-87.
- Kim, O.J., 1971a, Study on the intrusion epochs of younger granite and their bearing orogenesis in South Korea. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 4, 1-10 (in Korean with English abstract).
- Kim, O.J., 1971b, Metallogenic epochs and provinces of south Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 7, 37-59.
- Kim, O.J., Yun, H.I. and Park, N.Y., 1958, Report of geological survey of Yangyang Mining District. Natl. Inst. Geol. Miner., 2, 47-74.
- 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. 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, S.W., Kwon, S., Koh, H.J., Yi, K., Jeong, Y.J. and Santosh, M., 2011, Geotectonic framework of Permo-Triassic magmatism within the Korean Peninsula. Gondwana Research, 20, 865-889.
- Le Maitre, R.W., 2002, Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. 2nd editions Cambridge University Press, 236 p.
- Lee, C.H. and Lee, S.H., 1989, Petrologic studies on the genesis of the Hongcheon iron deposits, Korea. Journal of Geological Society of Korea, 25, 239-258 (in Korean with English abstract).
- Lee, E.D., 1968, Geology and exploration of mineral deposits in Yangyang mine. Min. Geol., 5, 45-54.
- Lee, H.Y., Park, J.K. and Hwang, D.H., 2002, Petrography of Hongcheon Fe-REE Deposits. The Journal of the Petrological Society of Korea, 11, 90-102.
- Lee, S.H., 1979, Ore Petrological Studies on the Genesis of the Metamorphic Iron Deposits in Southern Korea - with special reference to the Yangyang, Pocheon and Chungju Iron Deposits - Part I: Geology and Petrology. Journal of the Geological Society of Korea, 15, 210-229.
- Lee, S.H., 1987, Comparison of phase relationships of the host rocks and magnetite ore deposits in the Yangyang iron deposits, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 23, 242-256.
- Lee, S.H. and Stout, J.H., 1989, Phase equilibria of coexisting minerals from amphibolites and syenitic rocks in the Yangyang magnetite deposit, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 25, 365-380.
- Lee, S.M. and Kim, H.S., 1968, Petrogenesis and the syenite in the Yangyang mine district, Kangwon Province, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 4, 199-214.
- Lentz, D., 1999, Carbonatite genesis: a reexamination of the role of intrusion-related pneumatolytic skarn processes in limestone melting. Geology, 27, 335-338.
- Maruyama, S., Liou, J.G. and Zhang, R., 1994, Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure (UHP) and high-pressure (HP) metamorphic belts from central China. Island Arc, 3, 112-121.
- Oh, M.S., 1999, Mineralization in Korea. In: Cheong, C.H. (Ed.), Geology of Korea. Sigma Press, Seoul, 523-605.
- Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S., 1988a, K-Ar ages of mineral deposits in the Taebaeg Mountain district. Jour. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 21, 57-67.

- Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S., 1988b, K-Ar ages of mineral deposits in the Gyeonggi massif. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 21, 349-358 (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).
- Seo, J., Choi, S.-G., Kim, C.S., Park, J.W., Yoo, I.K. and Kim, N.H., 2007, The skarnification and Fe-Mo mineralization at lower part of Western Shinyemi Ore Body in Taebaek area. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 20, 35-46 (in Korean with English abstract).
- Seo, J., Choi, S.-G., Kim, D.W., Park, J.W. and Oh, C.W., 2015, A new genetic model for the Triassic Yangyang iron-oxide-apatite deposit, South Korea: Constraints from in situ U-Pb and trace element analyses of accessory minerals. *Ore Geology Reviews*, 70, 110-135.
- Seo, J., Choi, S.G., Kim, J.W. and Park, J.W., 2014, Genesis of nelsonitic magmas of the Yeoncheon Fe-Ti (-P) ore deposit in the Gyeonggi massif, South Korea. *International Conference on Continental Dynamics, China*, p. 81-83.
- Seo, J., Choi, S.-G., Kim, J.W., Park, J.W. and Ryu, I.-C., 2019, Unique sodic-calcic skarn hosted by ultramafic rocks and albitite at the Ulsan skarn deposit, Gyeongsang Basin, South Korea. *Ore Geology Reviews*, 105, 537-550.
- Seo, J., Choi, S.-G. and Oh, C.W., 2010, Petrology, geochemistry, and geochronology of the Post-collisional Triassic mangerite and syenite in the Gwangcheon area, Hongseong Belt, South Korea. *Gondwana Research*, 18, 479-496.
- Seo, J., Choi, S.-G., Park, J.W., Whattam, S., Kim, D.W., Ryu, I.-C. and Oh, C.W., 2016, Geochemical and mineralogical characteristics of the Yonghwa phosphorite-carbonatite complex, South Korea, and genetic implications. *Lithos*, 262, 609-619.
- Shibata, K., Park, N.Y., Uchiumi, S. and Ishihara, S., 1983, K-Ar ages of the Jecheon granitic complex and related molybdenite deposits, South Korea. *Mining Geology*, 33, 193-197.
- Shimazaki, H., Shibata, K., Uchiumi, S., Lee, M.S. and Kaneda, H., 1987, K-Ar ages of some W-Mo deposits and their bearing on metallogeny of South Korea. *Mining Geology*, 37, 395-401.
- 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. (eds.) *Time- and Strata-Bound Ore Deposits*, 406-418.
- So, C.S., 1978, Geochemistry and origin of amphibolite and magnetite from the Yangyang iron deposit in the Gyeonggi metamorphic complex, Republic of Korea. *Mineralium Deposita*, 13, 105-117.
- So, C.S., Chi, S.J. and Shelton, K.L., 1987, Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver bearing vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Nonsan area. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 158, 47-65.
- So, C.S., Kim, S.-M. and Son, D.-S., 1975, Origin of the magnetite-bearing amphibolites from the Yangyang iron mine, Korea: New geochemical data and interpretation. *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*, 8, 175-182.
- So, C.S. and Shelton, K.L., 1983, A sulfur isotopic and fluid inclusion study of the Cu-W-bearing tourmaline breccia pipe, Ilkwang mine, Republic of Korea. *Economic Geology*, 78, 326-332.
- Taylor, H.P.Jr., Frechenm, J. and Degens, E.T., 1967, Oxygen and carbon isotope studied of carbonatites from the Laacher See district, west Germany and the Alno district, Sweden. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 31, 407-430.
- The Geological Society of Korea, 1990, *Geology of Korea*. p. 802.
- Uchida, E., Choi, S.-G., Baba, D. and Wakisaka, Y., 2012, Petrogenesis and solidification depth of the Jurassic Daebo and Cretaceous Bulguksa granitic rocks in south Korea. *Resource Geology*, 62, 281-295.
- Williams, I.S., Cho, D.L. and Kim, S.W., 2009, Geochronology, and geochemical and Nd-Sr isotopic characteristics, of Triassic plutonic rocks in the Gyeonggi Massif, south Korea: constraints on Triassic post-collisional magmatism. *Lithos*, 107, 239-256.
- Yang, D.Y., 1991, Mineralogy, petrology and geochemistry of the magnesian skarn-type magnetite deposits at the Shinyemi mine, Republic of Korea. Ph.D. Thesis, Waseda Univ., Tokyo, Japan 323 p.
- Yang, K. and Hwang, J.-Y., 1999, Hydrothermal Fluids in the Ulsan Carbonate Rocks. *Journal of the Korean earth science society*, 20, 242-249.
- Yang, K., Hwang, J.-Y. and Ock, S., 2001, The genesis of the Ulsan carbonate rocks: A possibility of carbonatite?. *The Journal of the Petrological Society of Korea*, 10, 1-12.
- Yang, K., Hwang, J.-Y. and Yun, S.-H., 2003, Petrogenesis of the Ulsan carbonate rocks from the south-eastern Kyongsang Basin, South Korea. *Island Arc*, 12, 411-422.
- Yi, S.-B., Oh, C.W., Lee, S.-Y., Choi, S.-G., Kim, T. and Yi, K., 2016, Triassic mafic and intermediate magmatism associated with continental collision between the North and South China Cratons in the Korean Peninsula. *Lithos*, 246-247, 149-164.

---

Received : July 22, 2021

Revised : August 30, 2021

Accepted : August 31, 2021