

가곡면 면산층 내 Ti-Fe 산화광물의 산상 및 조성변화

유병용¹ · 임진아¹ · 고영진² · 박영록² · 신동복^{1,3,*}

¹공주대학교 지질환경과학과

²한국광해광업공단

³공주대학교 황해지질환경연구소

Occurrence and compositional variation of Ti-Fe oxide minerals in the Myeonsan Formation, Gagokmyeon, South Korea

Byeongyong Yu¹ · Jinah Lim¹ · Youngjin Ko² · Younglok Park² · Dongbok Shin^{1,3,*}

¹Department of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea

²Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp., Wonju 26464, Republic of Korea

³Yellow Sea Institute of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea

요약

조선누층군 최하부에 해당하는 면산층은 Ti-Fe 산화광물인 금홍석이나 티탄철석이 수반되어 발달한 퇴적층이다. 본 연구는 가곡면 풍곡리에 위치한 면산층을 중심으로 하부의 홍제사화강암 접촉부와 상부의 묘봉층을 대상으로 현미경관찰, X선 회절분석, 전자현미분석, 휴대용 X선 형광분석 및 대자율 측정을 통해 Ti-Fe 산화광물의 산상 및 구성비, 광물 및 지화학조성 변화를 해석하였다. 면산층은 주로 암회색 내지 회색을 띠며 사질부분과 이질부분이 교호하는 특징을 보인다. Ti-Fe 산화광물은 주로 석영입자와 더불어 산출되며, 독립된 결정층을 이루는 금홍석은 흔히 외곽부에 티탄철석과 적철석이 발달하여 산출된다. 또한 적철석 내 티탄철석이 용리조직을 형성하기도 한다. 면산층을 하부, 중부 및 상부로 구분할 때 금홍석 및 적철석 함량은 하부에서 각각 평균 3.4%와 4.0%이며 상부로 가면서 평균 1.9%와 3.2%로 감소한다. 티탄철석은 하부에서 상대적으로 높고(평균 1.6%) 상부로 가면서 반복적인 변화양상을 보인다. 금홍석의 TiO₂ 함량은 면산층 하부에서 상부로 가면서 감소하며, 티탄철석의 TiO₂ 함량도 금홍석과 마찬가지로 하부(평균 53.09 wt.%)에서 상부(평균 50.41 wt.%)로 가면서 감소하는 경향을 나타낸다. 휴대용 X선 형광분석결과 홍제사화강암 접촉부에서의 Ti 함량은 최대 4.5 wt.% 이르고, 면산층 상부는 2.2 wt.%, 그리고 묘봉층에서는 0.8 wt.%로 감소한다. 이러한 면산층 Ti-Fe 산화광물의 조직, 함량 그리고 Ti 조성변화는 하부에서 상부로 가면서 광물군과 티타늄 함량이 순차적으로 변화하는 고철질 화성암체로부터 기인되었음을 시사한다.

주요어: 면산층, 금홍석, 티탄철석, Ti 함량, 근원암

ABSTRACT: The Myeonsan Formation represents the lowest strata of the Joseon Supergroup and comprises sedimentary rocks that contain various Ti-Fe oxide minerals such as rutile and ilmenite. Distributions of the Ti-oxide minerals and their petrography and geochemistry of the Myeonsan Formation are examined using microscope, X-ray diffraction, electron probe microanalysis, portable X-ray fluorescence analysis, and magnetic susceptibility. Our study focused on the Ti-bearing rocks in the Gagok area of the Myeonsan Formation, which are in contact with the Precambrian Hongjesa granite at the bottom and the Myobong Formation at the uppermost part. The Myeonsan Formation has dark gray or gray colors and shows alternating sandy- and muddy-rich layer. Ti-Fe oxide minerals commonly occur with quartz. Rutile mainly exists as an independent grain surrounded by ilmenite and hematite on the rim. Ilmenite commonly occurs with hematite by forming exsolution intergrowth. In the Myeonsan Formation, the contents of rutile and hematite are 3.4% and 4.0% at the lower part and decrease to 1.9% and 3.2%, respectively, toward the upper part. Ilmenite in the lower part has a relatively higher TiO₂ contents (approximately

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

1.6%) compared to the upper part, which exhibits repetitive variations. Similarly, rutile shows a decreasing trend of TiO₂ content from the lower to the upper part. In-situ analysis using portable X-ray fluorescence indicates that the Ti contents in the rocks reaches a maximum of around 4.5 wt.% near the contact between the Hongjesa granite, but decreases to approximately 2.2 wt.% in the upper part of the Myeonsan Formation and to about 0.8 wt.% in the Myobong Formation. The mineral texture and compositional distribution of the Myeonsan Formation suggest that the Ti-bearing minerals were derived from mafic igneous rocks, which exhibited a successive compositional variation from bottom to top.

Key words: Myeonsan Formation, rutile, ilmenite, Ti content, source rock

1. 서론

최근 첨단산업이 발달함에 따라 핵심소재원료물질에 대한 관심이 증대되고 있다. 이 중 티타늄(Ti)은 동일 부피의 강철보다 가볍고 단단한 특징이 있어 이를 이용한 티타늄합금은 다양한 산업분야에서 그 활용성이 늘어나고 있다(Jeon *et al.*, 2018; Park *et al.*, 2022). 하지만 국내에서 사용되는 티타늄의 대부분은 수입에 의존하고 있어 국내 광체탐사를 통해 자원을 확보하게 될 경우 많은 경제적 이점을 기대해 볼 수 있다(Jeon *et al.*, 2018). 티타늄은 지각에서 9번째로 풍부한 원소로 금홍석(TiO₂)과 티탄철석(FeTiO₃)이 주요 함티탄 광물이다(Force, 1991; Meinhold, 2010). 이들 대부분은 화성암에서 산출되거나 퇴적암에 퇴적물 형태로 산출된다(Force, 1991). 국내 대표적인 티타늄광상은 연천, 소연평도, 보름도에 위치하며 이들은 선캠브리아기 변성암류 지층에 발달하는 화성기원의 특징을 보인다. 또한 이들은 자철석과 함께 수반되어 산출되는 것으로 보고되어 있다(Kim *et al.*, 1994; Lee *et al.*, 2022).

반면, 면산층은 퇴적광상의 한 형태인 고-사광상(Paleo-placer deposit)에 해당한다(Kim, 1991; Kim and Lee, 2006; Parnell *et al.*, 2014). Park *et al.* (2022)는 면산층, 대기층, 화절층, 동점층, 두무골층, 그리고 막골층에 대한 현미경 관찰 결과 면산층이 다른 층들에 비해 많은 양의 불투명광물을 함유하고, 휴대용 X-선 형광분석 결과 평균 티타늄 함량이 4.35%로 변이가 심하지만 다른 층들과 달리 높은 함량을 갖는다고 보고하였다.

이처럼 최근 들어 첨단소재 원료의 필요성으로 면산층 내 티타늄에 대한 관심이 증가하면서 자원확보를 위한 구체적인 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 삼척시 가곡면 풍곡리 일대에 분포하는 면산층을 홍제사화강암 접촉부에서부터 이와 정합적 관계를

보이는 하부 묘봉층에 이르기까지 Ti-Fe 산화광물의 산출특성 및 지화학적 연구결과를 통하여 이들의 성인적 특징을 고찰하고자 한다.

2. 지질

한반도 중동부에 위치하는 태백산분지는 선캠브리아기 편마암으로 구성된 영남육괴를 기반암으로 하여 상부에 고생대 캄브로-오르도비스기에 퇴적된 조선누층군과 석탄기-트라이아스기 초기에 퇴적된 평안누층군으로 구성된다(Chough, 2013). 연구지역인 장성지구는 가곡면 풍곡리 일대로 선캠브리아기 홍제사화강암을 기반암으로 하여 상부에 부정합으로 조선누층군의 면산층, 묘봉층 및 화절층이 분포한다(Choi *et al.*, 2004). 그리고 이를 후기에 백악기 화강암체가 관입하여 나타난다(그림 1).

홍제사화강암은 선캠브리아기 변성퇴적암류로 구성된 울리층군을 관입하여 나타나며, 중심부에서 주변으로 갈수록 흑운모화강암에서 복운모화강암으로 변하는 특징을 나타낸다(Kim and Cho, 1994). 그리고 지역에 따라 괴상의 화강암, 호상편마암, 그리고 거정질 미그마타이트가 산출된다(Kim and Cho, 1994). 저어콘을 이용한 U-Pb 연대측정 결과 2013⁺³⁰/₋₂₄ Ma로 확인되었다(Lee *et al.*, 2010).

면산층은 태백산분지의 최하부층으로 장산층과 대비되어 나타나는 것으로 해석되었다(Cheong, 1969; Cheong *et al.*, 1973; Kim and Cheong, 1987). 이 층은 홍제사화강암을 부정합으로 덮고 있으며 약 100 m 두께의 암회색 사암 및 실트암으로 구성된다(Cheong *et al.*, 1973). 면산층의 기저부는 역암이 우세하게 나타나며 역들은 주로 화강암질 편마암 또는 규암으로 구성된다(Kim, 1991). 기저부에서 상부로 올라갈수록 어두운 색의 사층리가 발달하는 세립 내지 중립질 사암이 관찰되며 점진적으로 실트암 내지 이암상

으로 발달하는 특징을 보인다(Kim, 1991). 그리고 면산층에서 주로 나타나는 Ti-Fe 산화광물은 선캠브리아기 철과 티타늄이 풍부한 화성암, 변성암 또는 퇴적암에서 기원된 것으로 보이며, 천해환경에서 퇴적된 것으로 여겨졌고(Kim, 1991), Woo *et al.* (2006)는 면산층이 조류의 영향을 우세하게 받는 조건대 환경에서 형성된 것으로 해석하였다.

묘봉층은 면산층과 마찬가지로 북동방향의 주향으로 분포하며 면산층 위에 정합으로 놓여있다. 이 층은 주로 암회색 점판암으로 구성되며, 일부 렌즈상 사층리 사암상이나 생물교란 사암 등 주로 세립질 사암 또는 실트암으로 이루어진다(Oh, 2020). 연구지역 남부와 서부에 넓게 분포하는 백악기 관입암체는 주로 암상이나 암맥 형태로 나타나고 화강암, 화강반암, 염기성 암맥 등이 복합적으로 산출된다(그림 1). 특히 화강암체는 반상조각이 발달하는데, 석영 및 알칼리장석이 반정으로 산출되고 기질은 주로 세립질 석영 및 정장석으로 구성된다(Seo *et al.*, 2020). 조사지역 북서쪽에는 가곡 연-아연광상이 위치하고 있으며 조사지역 일부에도 열수작용에 따른 황화광물의 정출과 변질대의 발달이 확인된다(그림 1).

3. 연구방법

가곡광산 진입로에서 벗어나 산사면에 위치한 홍

제사화강암 접촉부의 면산층, 진입로를 따라 분포하는 면산층, 그리고 상위의 묘봉층에 대해 순차적으로 암상관찰 및 시료를 채취하였다(그림 1). 면산층은 하부에서 상부로 가면서 변화특성을 파악하기 위해 산성암맥이 관입한 하단부를 시점으로 3~5 m 간격으로 시료를 채취하였으며, 거리 기준으로 하부(2~34 m), 중부(37~71 m), 그리고 상부(74~108 m)로 면산층을 구분하여 비교하였다(그림 1). 시료번호는 하단부로부터의 거리를 반영하여 표기하였다(예, GG-37: 면산층 하단부로부터 37 m 지점).

또한 탐사지표로 대자를 값을 확인하기 위해 대자율측정기(ZH instruments, SM-30)를 이용하여 채취한 시료의 암석단면을 측정하였고, 박편시료에 대한 편광현미경 및 후방산란전자이미지(BSE: Back scattered electron image) 분석을 통한 암석기재 및 분말시료에 대한 X선회절분석을 수행하였다. XRD(X-ray diffraction) 분석은 공주대학교 공동실험실습관의 Rigaku사 MiniFlex600 (600 W, 4 kV, 15 mA)을 이용하여 3~90° 구간에 분당 10° 간격으로 수행하였다. 전자현미분석(EPMA: Electron Probe Microanalysis)은 산화광물을 대상으로 부산대학교 공동실험실습관에서 Jeol JXA-8530F를 이용하여 실시하였으며, 분석조건은 15 KeV, 20 nA, 빔의 직경은 1~3 μm이다. 그리고 휴대용 X선 형광분석은 사질성분대와 이질성분대를 구분하여 수행하였다. 사질성분

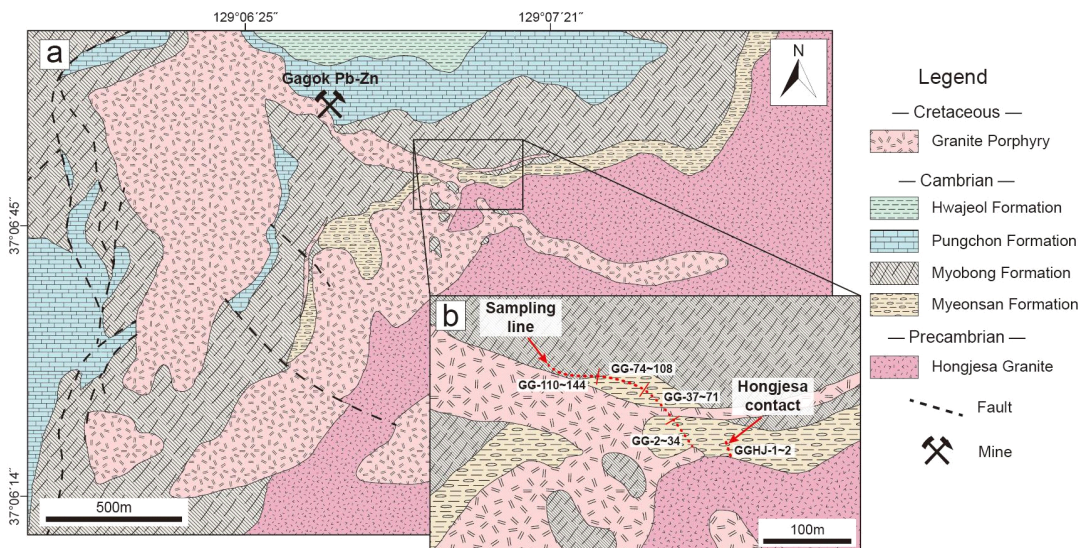


Fig. 1. Geologic map and the sample location.

대는 회색 내지 암회색을 띠고 육안으로 입자가 관찰되는 반면, 이질성분대는 흑색 내지 암녹색을 띠고 육안으로 입자가 보이지 않는 특징으로 구분하였다. 분석에 사용된 장비는 Olympus사 DELTA Professional XRF DPO-6000으로 광원은 40 kV miniature X-ray tube를 통해 조사되었으며, 검출기는 Silicon Drift Detector를 사용하였다.

4. 분석결과

4.1 암석기재학

연구지역 홍제사화강암 접촉부는 급경사를 이루며 면산층과 불규칙한 경계를 이루고 있다(그림 2a). 암상은 주로 암회색을 띠고 사질과 이질부분이 구분

되며 층리가 발달한다(그림 2g). 현미경관찰 결과 세립의 석영이 산재하며 녹니석, 견운모가 관찰되고 상대적으로 괴상을 이루는 이질부분에서의 엽리구분은 미약한 편이다(그림 3a).

연구지역 중심부를 차지하는 면산층은 주로 암회색 내지 회색을 띠며(그림 2c, 2d) 세립 내지 중립질 사암이 우세하고 하단부분과 중간부분에 산성암맥이 관입하여 나타난다(그림 2b). 암석단면 관찰 시 사질부분과 이질부분이 교호하는 특징이 잘 나타나고 경계가 비교적 뚜렷하다(그림 2h). 일부 층리면 을 따라 황철석이 산출되기도 하며, 부분적으로 역질 암편을 포함하기도 한다(그림 2i, 2j). 현미경관찰 시 구성광물로 석영, 백운모, 장석, 견운모, 녹니석, 방해석 등이 관찰되고 일부 알칼리장석이 관찰된다(그



Fig. 2. Photographs of representative outcrops and rock slabs. (a) Myeonsan Formation at the contact with the Hongjesa granite, (b) Myeonsan Formation intruded by felsic dyke, (c-d) Gray to dark gray Myeonsan Formation dominated by fine to medium grained sandstone, (e) Contact between Myeonsan and Myobong Formations, (f) Reddish brown massive Myobong Formation, (g) Sandy and muddy layers in the Myeonsan Formation at the contact with the Hongjesa granite, (h) Sharp contact between sandy and muddy layer in the Myeonsan Formation, (i) Pyrite along the layer of the Myeonsan Formation, (j) Gravelly sandstone in the Myeonsan Formation, (k) Microfolding with displacement in the Myobong Formation.

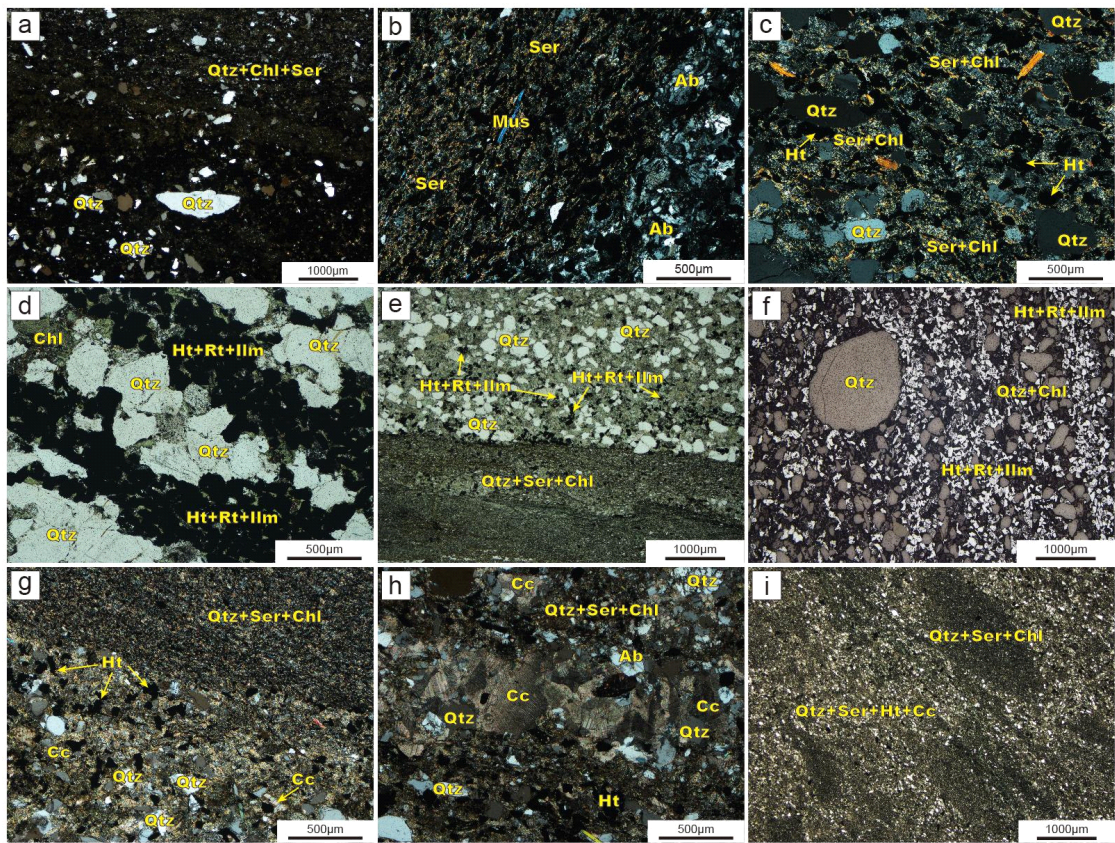


Fig. 3. Microphotographs of thin sections. (a) Hongjesa granite contact, (b-f) Myeonsan Formation, (g-i) Myobong Formation. Abbreviations: Ab = albite, Cc = calcite, Chl = chlorite, Ht = hematite, ilm = ilmenite, Mus = muscovite, Qtz = quartz, Rt = rutile, Ser = sericite.

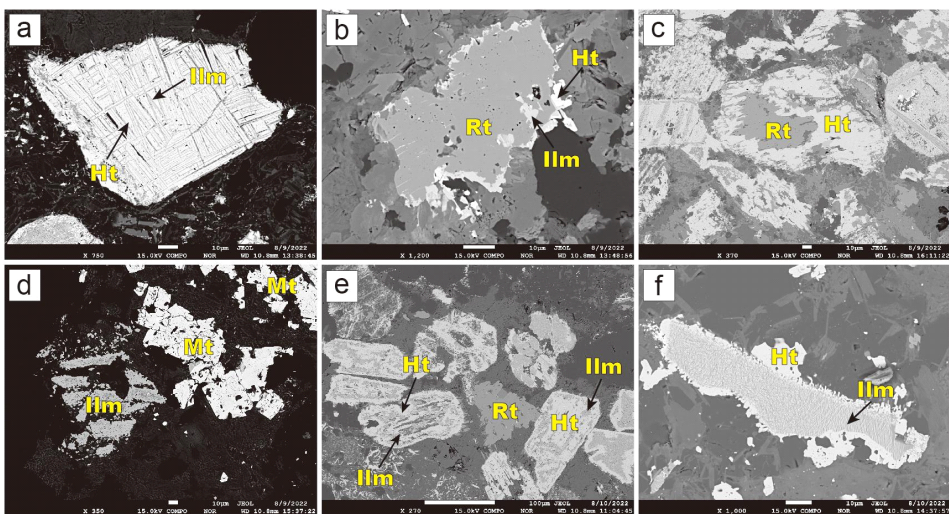


Fig. 4. Back scattered electron images of Ti-Fe oxide minerals. (a-e) Myeonsan Formation, (f) Myobong Formation. Refer to Figure 3 for abbreviations.

림 3b-3f). 금속광물로는 금홍석, 티탄철석, 적철석, 그리고 자철석이 산출된다(그림 3d-3f, 4a-4e). 대부분 층리가 잘 발달하고 석영 입자의 원마도는 불량한 편에 속하지만 층리구조가 뚜렷하지 않은 부분에서는 상대적으로 양호한 원마도를 나타내기도 한다(그림 3f). 그리고 사질과 이질부분은 비교적 뚜렷한 경계를 이룬다(그림 3e). 층리구조가 발달한 부분에서 금속광물은 광물들 사이에 분산된 형태로 산출되거나 석영-녹니석-견운모와 호층을 이루며 산출된다(그림 3d-3f). BSE 이미지 관찰결과 티탄철석은 적철석 내 용리조직으로 주로 산출된다(그림 4a), 금홍석은 외곽부에서 티탄철석이나 적철석에 의해 둘러싸여 교대된 것처럼 나타난다(그림 4b, 4c). 자철석은 금홍석과 유사하게 독립된 결정으로 산출된다(그림 4d).

모봉층은 면산층과 정합적인 관계를 이루나 정확한 경계를 식별하는데 어려움이 있다(그림 2e). 조사지역 하부에서는 암회색 판상을 이루다가 점차 적갈색의 괴상암체가 우세하게 발달하는 경향이 있고(그림 2e, 2f), 상부에서는 세일 혹은 천매암질 암석으로 변하는 양상을 나타낸다. 또한 부분적으로 열수변질의 영향으로 황화광물이 관찰된다. 암석단면 관찰 시 전반적으로 어두운색을 띠고 암회색의 층리가 관찰되며 소규모 습곡과 같이 변형작용을 받아 층리가 절단되기도 한다(그림 2k). 현미경관찰 결과 석영, 방해석 및 적철석이 상호 불규칙한 분포를 보이며 분대를 이루거나 세립질의 석영, 견운모 및 녹니석이 층리를 형성하거나 렌즈형태로 뭉쳐 산출되기도 한다(그림 3g-3i). 금속광물은 적철석이 주를 이루며 미량의 티탄철석이 수반되며 면산층보다 크

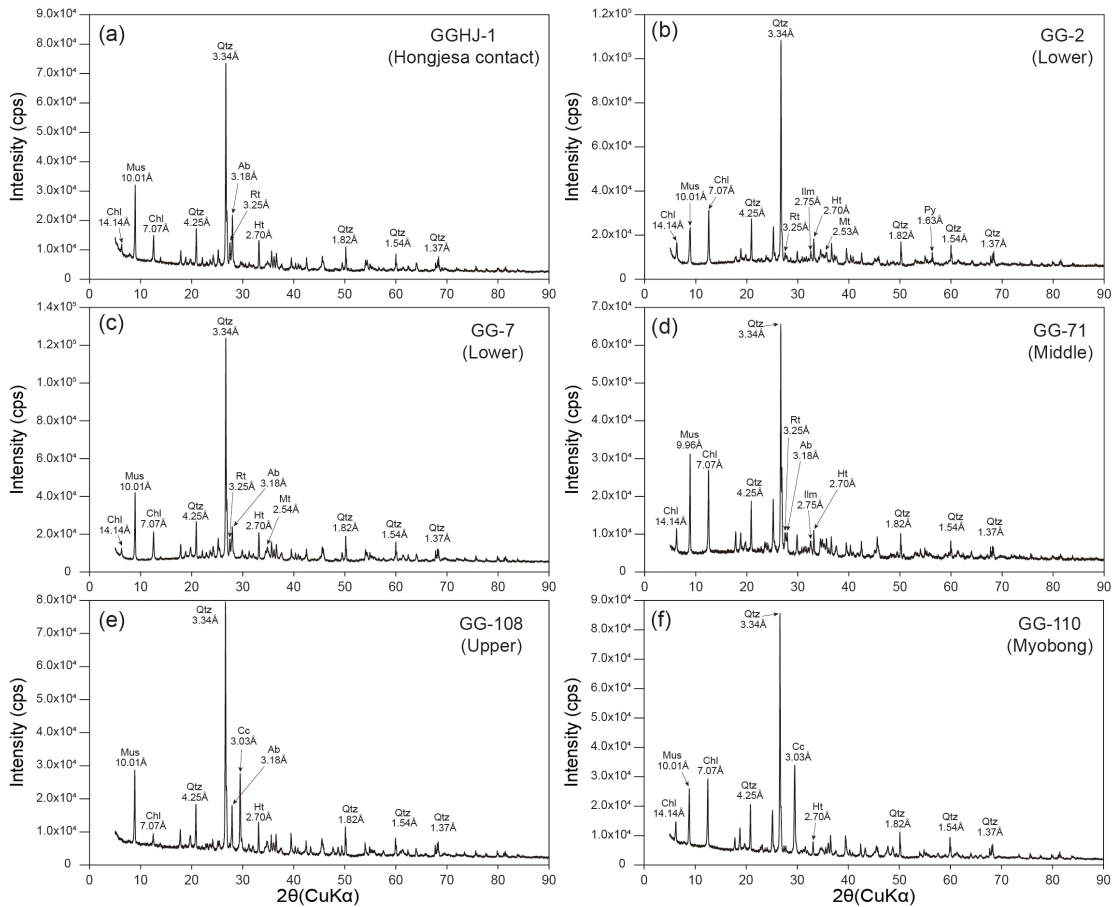


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of powered samples. (a) Hongjesa granite contact (b-e) Myeonsan Formation, (f) Myobong Formation. Abbreviation: Py = pyrite. Refer to Figure 3 for others.

기나 양이 현저히 적게 산출된다. BSE 이미지 관찰 결과 용리조직을 수반하는 티탄철석 결정 가장자리를 따라 적철석이 발달하기도 한다(그림 4f).

4.2 X-선 회절분석

X선 회절분석은 면산층 24개, 묘봉층 5개, 그리고 홍제사화강암 접촉부 2개 시료를 대상으로 실시하였으며 분석 결과 현미경에서 관찰된 석영, 알칼리장석, 백운모, 견운모, 녹니석, 그리고 방해석이 나타나며(그림 5), 금속광물은 주로 금홍석이나 적철석이 관찰되며 부수적으로 티탄철석, 자철석 및 황철석이 수반된다(그림 5, 6).

홍제사화강암 접촉부의 금홍석 평균 함량은 1.9%이며, 면산층에서는 하부 3.4%, 중부 3.2%, 그리고

상부 1.9% 순으로 점차 감소한다(표 1). 묘봉층에서는 1.0%로 가장 적다. 티탄철석의 경우 홍제사화강암 접촉부에서는 평균 1.9%이며, 면산층 하부에서 1.6%, 중부 1.1%, 상부 1.2%이고, 묘봉층은 검출한계 미만으로 나타난다. 적철석 평균 함량은 홍제사화강암 접촉부에서 5.0%로 가장 높고, 면산층 하부 4.0%, 중부 1.4%, 상부 3.2%, 그리고 묘봉층 1.8%로 나타난다. 자철석은 대부분 1% 미만으로 산출되고 묘봉층에서는 거의 검출되지 않는다.

4.3 전자현미분석

연구지역에서 산출되는 금홍석, 티탄철석, 적철석, 그리고 자철석에 대한 전자현미분석결과는 표 2~표 5에 제시하였다. 홍제사화강암 접촉부 금홍석의 TiO₂

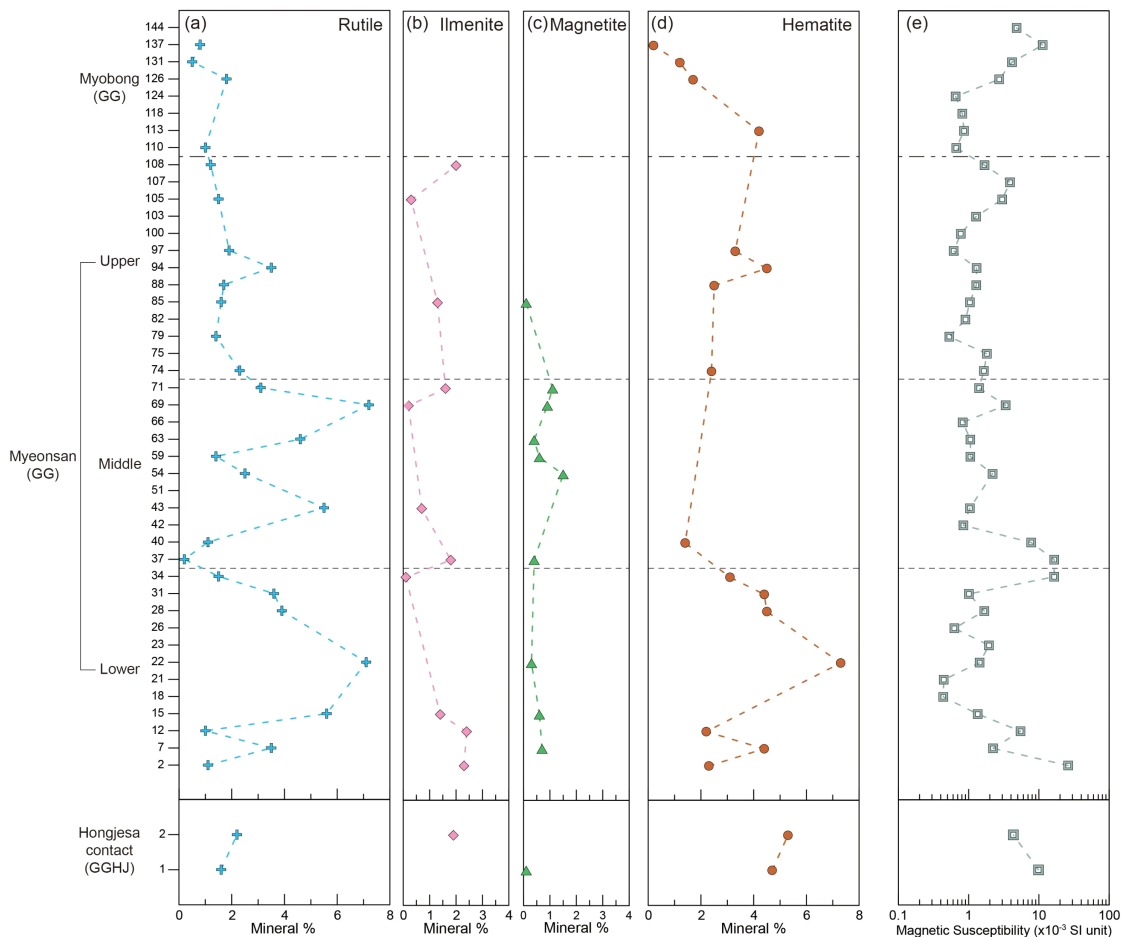


Fig. 6. Variation of Ti-Fe oxide mineral contents of (a) rutile, (b) ilmenite, (c) magnetite, and (d) hematite obtained by XRD analysis and of (e) magnetic susceptibility.

평균 함량은 98.74 wt.%를 갖고(표 2), 면산층에서는 하부 99.22 wt.%, 중부 98.37 wt.%, 그리고 상부 98.70 wt.%로 점차 감소한다(그림 7, 8). 티탄철석의 TiO_2 함량은 FeO보다 높게 나타나는데(그림 7), 면산층 하부에서는 51.68~54.57 wt.% (avg. 53.09 wt.%), 중부 50.19~52.73 wt.% (avg. 51.84 wt.%),

그리고 상부 49.16~51.56 wt.% (avg. 50.41 wt.%) 순으로 감소하는 경향이 뚜렷하다(그림 8).

적철석의 TiO_2 함량은 홍제사화강암 접촉부에서 0.55~5.19 wt.% (avg. 2.54 wt.%)로서 가장 낮게 나타나고(그림 7, 8), 면산층에서 하부 2.04~5.37 wt.% (avg. 3.48 wt.%), 중부 2.50~8.42 wt.% (avg. 4.83

Table 1. Statistics of quantitative XRD analyses of the samples (%).

Location	Hongjesa contact		Myeonsan						Myobong	
			lower		middle		upper			
	range	average	range	average	range	average	range	average	range	average
Quartz	48.0-59.5	53.8	23.8-76.8	51.4	47.3-91.3	66.4	34.0-70.5	50.2	47.7-64.3	54.4
Muscovite	9.6-24.4	17.0	4.4-35.7	19.1	8.5-33.2	18.3	1.5-36.2	20.4	17.1-47.6	27.0
Chlorite	5.1-13.7	9.4	3.2-14.6	8.1	0.7-20.9	8.3	0.9-16.0	11.2	9.0-14.1	11.1
Microcline	7.5	7.5	0.7-6.6	3.0	2.5-11.6	6.5	-	-	0.5-14.9	7.7
Albite	16.2	16.2	3.2-36.0	15.6	0.1-23.3	8.6	4.5-27.8	15.3	-	-
Calcite	-	-	2.4-3.7	3.1	0.4	0.4	0.1-9.7	4.1	19.6	19.6
Rutile	1.6-2.2	1.9	1.0-7.1	3.4	0.2-7.2	3.2	1.2-3.5	1.9	0.5-1.8	1.0
Ilmenite	1.9	1.9	0.1-2.4	1.6	0.2-1.8	1.1	0.3-2.0	1.2	-	-
Magnetite	0.1	0.1	0.3-0.7	0.5	0.4-1.5	0.8	0.1	0.1	-	-
Hematite	4.7-5.3	5.0	2.2-7.3	4.0	1.4	1.4	2.4-4.5	3.2	0.2-4.2	1.8
Pyrite	0.2	0.2	1.8-2.5	2.2	2.2	2.2	-	-	0.8-1.3	1.1

- = below detection limit.

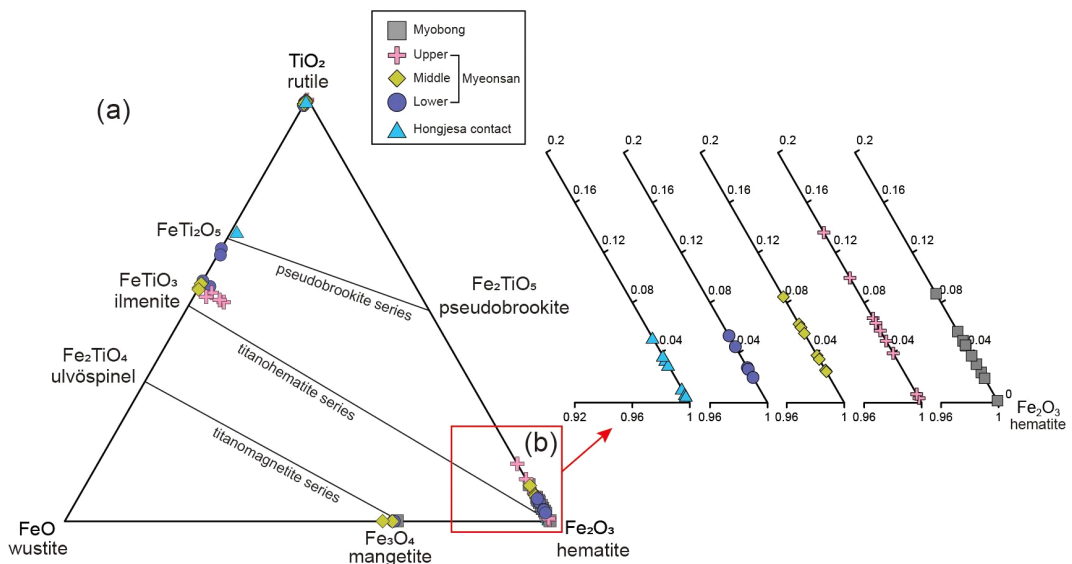


Fig. 7. Phases in the TiO_2 -FeO- Fe_2O_3 system for Ti-Fe oxide minerals, showing the major solid solution series magnetite-ulvöspinel, hematite-ilmenite, and ferropseudobrookite-pseudobrookite (after Buddington and Lindsley, 1964).

Table 2. Representative electron microprobe analyses of rutile (wt.%).

Location	Hongjesa contact		Myeonsan							
			lower		middle			upper		
Sample no.	GGHJ-1		GG-15	GG-22	GG-37	GG-43	GG-69	GG-74	GG-88	GG-105
Point no.	97	100	11	18	22	33	44	56	59	72
SiO ₂	0.17	0.12	0.06	0.08	0.07	0.02	0.44	0.19	0.40	0.05
TiO ₂	98.95	98.54	98.90	99.34	98.35	99.63	97.07	99.22	97.69	98.46
Al ₂ O ₃	0.10	0.02	0.06	0.12	0.00	0.10	0.13	0.10	0.11	0.01
FeO*	0.70	0.62	0.67	0.65	0.57	0.74	1.29	0.77	0.83	0.60
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00
MgO	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01
CaO	0.02	0.06	0.16	0.11	0.03	0.04	0.15	0.06	0.16	0.06
K ₂ O	0.03	0.02	0.02	0.06	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.18
V ₂ O ₃	0.78	0.87	0.85	0.85	0.97	0.90	0.92	0.79	0.80	0.76
Total	100.74	100.25	100.75	101.20	100.03	101.45	100.01	101.16	100.12	100.14
Number of ions on the basis of 2 oxygen										
Si	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.006	0.003	0.005	0.001
Ti	0.989	0.991	0.989	0.990	0.992	0.990	0.981	0.988	0.983	0.989
Al	0.002	0.000	0.001	0.002	0.000	0.002	0.002	0.001	0.002	0.000
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.007	0.006	0.007	0.006	0.006	0.007	0.013	0.008	0.008	0.006
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.003	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005
V	0.004	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004
Total	1.005	1.005	1.007	1.006	1.005	1.006	1.010	1.006	1.008	1.006

FeO* = total Fe.

wt.%), 그리고 상부 0.36~13.68 wt.% (avg. 5.85 wt.%)로 상부로 가면서 점차 증가하는 경향을 보인다(그림 7, 8). 묘봉층에서는 0.15~8.11 wt.% (avg. 3.91 wt.%)로 다시 감소한다(그림 7, 8). 자철석내 TiO₂ 함량은 매우 낮아 면산층에서는 0.04 wt.% 이하를 나타내고, 묘봉층에서는 0.12 wt.%를 갖는다(표 5).

4.4 휴대용 X-선 형광분석

휴대용 X선 형광분석에 의한 Ti와 Fe 함량을 표 6에 제시하였다. 홍제사화강암 접촉부 Ti 값은 각각

4.5, 4.4 wt.%이고, Fe는 각각 14.5, 16.9 wt.%로 비교적 높게 나타난다(그림 9). 면산층의 Ti 평균 함량은 2.8 wt.%이며, 이 가운데 사질성분대는 0.5~9.3 wt.% (avg. 3.3 wt.%) 그리고 이질성분대는 0.3~7.1 wt.% (avg. 2.0 wt.%)로 전자가 높다(그림 9). 면산층 하부의 Ti 함량은 0.6~5.9 wt.% (avg. 2.7 wt.%), 중부 0.7~6.6 wt.% (avg. 3.5 wt.%), 그리고 상부 0.8~5.3 wt.% (avg. 2.2 wt.%)로 중부에서 가장 높은 값을 보여준다(그림 9). Fe 함량은 면산층 하부에서 6.8~20.3 wt.% (avg. 13.0 wt.%), 중부 4.8~23.0 wt.% (avg. 13.9 wt.%), 그리고 상부에서 7.9~20.0 wt.% (avg.

12.2 wt.%)로 Ti와 유사하게 중부에서 높게 나타난다(그림 9). 묘봉층의 Ti와 Fe 함량은 각각 0.6~1.3 wt.% (avg. 0.8 wt.%)과 8.6~14.7 wt.% (avg. 10.6 wt.%)로 가장 낮은 값을 보여준다(그림 9).

4.5 대자율

시료별 대자율 측정값은 표 6과 그림 6e에 제시하였다. 면산층은 하부와 중부에서 최대 26.05 mSI에 이르는 일부 불규칙하게 높은 값을 제외하면 대부분 2 mSI 이하의 값을 보인다. 묘봉층도 면산층과 비슷한 양상을 나타내는 반면, 홍제사화강암 접촉부는 9.85 mSI와 4.33 mSI로서 비교적 높은 값을 갖는다.

5. 토 의

5.1 Ti-Fe 산화광물 산출특성

홍제사화강암 접촉부를 포함한 면산층 내 산화광

물은 금홍석, 티탄철석, 그리고 적철석이 주를 이루고 소량의 자철석이 수반된다(그림 4, 5). 면산층 내 산화광물의 함량비를 알아본 결과 금홍석과 적철석은 하부에서 상부로 갈수록 전체적으로 감소하는 경향을 보인다(그림 6a, 6d). 특히 면산층 상부에서 금홍석은 하부와 중부에 비해서 현저히 감소한 것을 확인할 수 있다(그림 6a). 티탄철석은 면산층 하부, 중부, 그리고 상부에서 반복적인 변화양상을 보이며, 하부에서 약간 높은 편이나 전체적으로 2% 이하의 낮은 함량을 갖는다(그림 6b). 적철석은 면산층 하부에서 가장 높게 나타난 후 점차 감소하고 면산층과 묘봉층 경계로 가면서 약간 증가하는 경향을 보이지만 이후 다시 감소한다(그림 6d). 홍제사화강암 접촉부의 금홍석, 티탄철석 및 적철석 함량은 면산층 최하부와 대체로 비슷한 경향을 나타낸다(그림 6a, 6b, 6d).

대자율 값은 면산층 하부 및 중부 일부와 홍제사

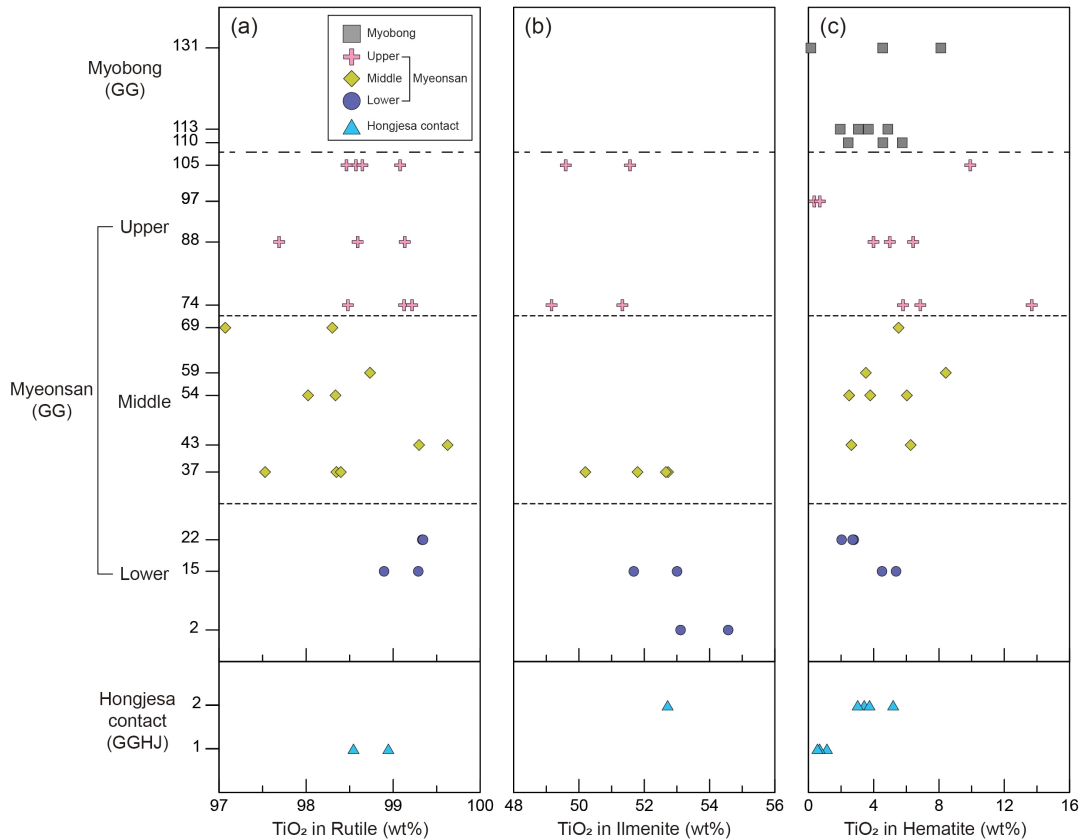


Fig. 8. Variation of TiO₂ contents obtained by EPMA for (a) rutile, (b) ilmenite, and (c) hematite.

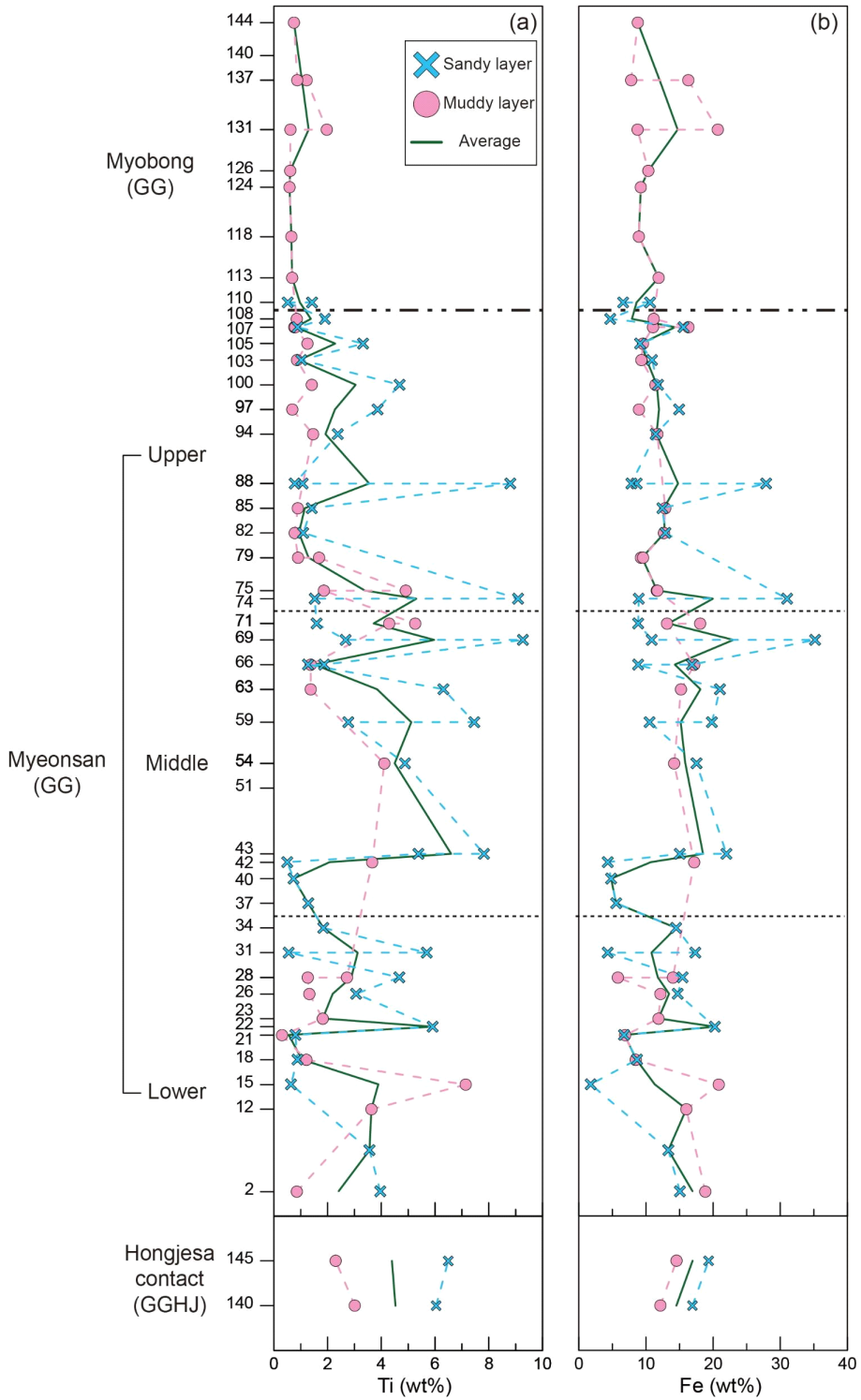


Fig. 9. Variation of (a) Ti and (b) Fe concentrations obtained by portable X-ray fluorescence for samples. Data for sandy layer, muddy layer and their average values are plotted together.

Table 3. Electron microprobe analyses of ilmenite (wt.%).

Location	Hongjesa contact	Myeonsan											
		lower				middle				upper			
Sample no.	GGHJ-2	GG-2		GG-15		GG-37				GG-74		GG-105	
Point no.	103	1	2	7	12	21	23	25	28	55	57	70	73
SiO ₂	0.06	0.18	0.01	0.02	0.05	0.23	0.05	0.14	1.40	0.02	0.06	0.10	0.21
TiO ₂	52.72	54.57	53.11	51.68	53.00	51.79	52.73	52.66	50.19	51.33	49.16	49.59	51.56
Al ₂ O ₃	0.04	0.01	0.00	0.10	0.12	0.22	0.05	0.06	1.23	0.04	0.02	0.18	0.00
FeO*	24.09	30.03	31.13	41.14	40.16	41.93	40.90	41.06	41.31	43.24	44.99	44.55	45.26
MnO	23.61	16.32	16.78	6.99	5.71	4.69	5.09	5.28	4.27	5.48	4.88	3.61	3.49
MgO	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	0.08	0.00	0.00	0.75	0.07	0.06	0.07	0.05
CaO	0.21	0.00	0.00	0.04	0.19	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.97	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.05
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.02	0.07	0.01
V ₂ O ₃	0.40	0.40	0.44	0.46	0.45	0.43	0.43	0.42	0.42	0.49	0.39	0.39	0.38
Total	101.14	101.51	101.52	100.45	99.72	99.37	99.24	99.68	99.58	100.76	99.59	99.54	101.02
Number of ions on the basis of 6 oxygen													
Si	0.003	0.009	0.000	0.001	0.003	0.012	0.003	0.007	0.072	0.001	0.003	0.005	0.011
Ti	2.010	2.070	2.031	2.009	2.068	2.040	2.072	2.062	1.951	1.986	1.916	1.922	1.996
Al	0.002	0.001	0.000	0.006	0.007	0.013	0.003	0.004	0.075	0.003	0.001	0.011	0.000
Fe ³⁺	0.035	0.000	0.019	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.125	0.265	0.221	0.101
Fe ²⁺	0.889	1.140	1.175	1.531	1.568	1.653	1.608	1.609	1.601	1.567	1.528	1.539	1.667
Mn	1.001	0.688	0.714	0.302	0.248	0.206	0.223	0.230	0.184	0.236	0.212	0.155	0.150
Mg	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.033	0.003	0.003	0.003	0.002
Ca	0.016	0.000	0.000	0.003	0.014	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.074	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.003
Cr	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.002	0.007	0.001
V	0.008	0.008	0.009	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.010	0.008	0.008	0.008
Total	3.964	3.916	3.951	3.943	3.920	3.937	3.917	3.924	3.932	3.938	3.938	3.946	3.939

FeO* = total Fe.

화강암 접촉부에서 상대적으로 높은 값을 나타내지만 대부분 비슷한 범위를 보인다(그림 6e). 일반적으로 대자율 값은 강자성광물에 해당하는 자철석의 영향을 강하게 받으며 함량과 입자크기에 따라 값이 변화한다(Lindsley *et al.*, 1966; Hunt *et al.*, 1995; Hong, 2004). 연구지역 자철석은 일부 시료에서 약 200 μm 정도의 크기로 산출되어(그림 4d) 높은 대자율 값을 갖지만(e.g., GG-37; 그림 6e), 이를 제외하면 대체로 수 μm 크기의 작은 입자로 분포하거나 산화되어 대자율 값과의 상관관계가 미약하게 나타나는 것으로 여겨진다(그림 6c). 반면, 금홍석과 대

자율 값은 대체로 상반된 경향을 보인다(그림 6a, 6e).

일반적으로 사암은 약 1.5% 이하의 금속광물을 포함하며(Shawe, 1968), 대자율 값은 최대 20.9 mSI 이내에서 넓은 범위를 보인다(Hunt *et al.*, 1995). 면산층 사암의 금속광물 함량비는 평균 5.2%로서 비교적 많은 양을 함유하고 있으며, 대자율은 일부 이상값(e.g., 26.05 mSI)을 제외하면 평균 1.75 mSI로 대부분 일반적인 사암 범위에 해당한다. 한편 연구지역 묘봉층에서는 대자율 값이 증가하는데 이는 열수변질에 따른 황화광물의 산출과 관련된 것으로, 상대적으로 높은 대자율 값을 갖는 자류철석(최대

Table 4. Representative electron microprobe analyses of hematite (wt.%).

Location	Hongjesa contact		Myeonsan									Myobong		
	GGHJ-1	GGHJ-2	lower		middle			upper						
Sample no.	GGHJ-1	GGHJ-2	GG-15	GG-22	GG-54	GG-59	GG-69	GG-74	GG-88	GG-97	GG-113	GG-131		
Point no.	99	104	9	16	39	43	45	48	60	64	90	92	94	
SiO ₂	0.06	0.12	0.03	0.29	0.08	0.10	0.16	0.27	0.05	0.06	1.37	0.07	0.09	
TiO ₂	0.55	5.19	5.37	2.04	2.50	8.42	5.53	13.68	6.42	0.36	3.68	8.11	0.15	
Al ₂ O ₃	0.18	0.04	0.11	0.00	0.00	0.08	0.00	0.33	0.01	0.13	0.83	1.79	0.07	
FeO*	89.71	85.26	85.28	88.79	87.98	81.88	84.68	78.13	84.81	90.09	84.98	76.52	88.38	
MnO	0.06	0.38	0.00	0.01	0.00	0.20	0.07	0.00	0.00	0.10	0.03	0.64	0.00	
MgO	0.04	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.08	0.19	0.04	0.12	0.09	3.98	0.02	
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	
K ₂ O	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	0.04	
Cr ₂ O ₃	0.04	0.01	0.01	0.04	0.08	0.05	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	
V ₂ O ₃	0.53	0.38	0.48	0.20	0.37	0.87	0.31	0.32	0.64	0.07	0.09	0.11	0.06	
Total	91.17	91.38	91.32	91.37	91.02	91.61	90.82	92.92	91.98	90.94	91.28	91.22	89.77	
Number of ions on the basis of 3 oxygen														
Si	0.001	0.003	0.001	0.007	0.002	0.002	0.004	0.007	0.001	0.002	0.034	0.002	0.002	
Ti	0.010	0.097	0.100	0.038	0.047	0.156	0.103	0.247	0.119	0.007	0.068	0.152	0.003	
Al	0.005	0.001	0.003	0.000	0.000	0.002	0.000	0.009	0.000	0.004	0.024	0.053	0.002	
Fe ³⁺	1.970	1.856	1.856	1.936	1.927	1.772	1.852	1.647	1.832	1.981	1.836	1.675	1.965	
Fe ²⁺	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	
Mn	0.001	0.008	0.000	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	0.013	0.000	
Mg	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.004	0.001	0.003	0.002	0.084	0.001	
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.035	
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.001	
Cr	0.002	0.001	0.001	0.002	0.004	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	
V	0.005	0.004	0.005	0.002	0.004	0.009	0.003	0.003	0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	
Total	1.997	1.969	1.966	1.985	1.984	1.948	1.965	1.917	1.960	1.999	1.971	1.980	2.010	

FeO* = total Fe.

1,400 mSI)의 영향인 것으로 해석된다(그림 6e; Hunt *et al.*, 1995).

Park *et al.* (2022)은 휴대용 X-선 형광분석기를 이용한 면산층에 대한 연구에서 Ti 함량이 넓은 범위(0.51~21.36%, avg. 4.3%)를 갖고, 사질성분대와 이질성분대에 따른 값의 편차가 크며 사질성분대가 더 큰 값을 갖는다고 보고하였다. 본 연구에서도 사질성분대와 이질성분대의 Ti 함량 범위는 상호 유사하나 평균 조성(사질 3.3 wt.%, 이질 2.0 wt.%)에서는 전자가 높게 나타난다(그림 9). 이러한 점은 현미

경 관찰 결과 연구지역 Ti-Fe 광물이 석영입자와 더불어 산출되는 것과 관련이 있어 보인다(그림 3d-3f). Kim and Lee (2006)에 의하면 면산층 상위의 묘봉층으로 가면서 사질성분의 양이 줄어들고 이질성분이 증가하는데 이는 연구지역 묘봉층이 면산층에 비해 Ti-Fe 광물산출이 현저히 감소한 점을 설명해 준다(그림 6; 표 7).

5.2 Ti-Fe 산화광물의 광물화학적 특징

금홍석은 대부분 TiO₂로 구성되어 96 wt.% 이상

Table 5. Electron microprobe analyses of magnetite (wt.%).

Location	Myeonsan				Myobong
	lower		middle		
Sample no.	GG-2		GG-37		GG-131
Point no.	3	4	26	27	93
SiO ₂	0.64	0.34	0.67	1.69	0.08
TiO ₂	0.01	0.04	0.01	0.04	0.12
Al ₂ O ₃	0.42	0.10	0.10	0.85	0.06
FeO*	94.25	94.02	91.96	91.19	92.43
MnO	0.12	0.05	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.01	0.00	0.06	0.00
CaO	0.02	0.00	0.00	0.12	0.00
K ₂ O	0.04	0.02	0.02	0.12	0.01
Cr ₂ O ₃	0.11	0.03	0.02	0.02	0.05
V ₂ O ₃	0.09	0.23	0.14	0.15	0.07
Total	95.68	94.83	92.91	94.24	92.81
Number of ions on the basis of 4 oxygen					
Si	0.023	0.013	0.026	0.063	0.003
Ti	0.000	0.001	0.000	0.001	0.003
Al	0.018	0.004	0.004	0.038	0.003
Fe ³⁺	1.997	2.027	2.009	1.897	2.052
Fe ²⁺	0.910	0.913	0.922	0.952	0.898
Mn	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
Ca	0.001	0.000	0.000	0.007	0.000
K	0.001	0.001	0.001	0.005	0.000
Cr	0.008	0.002	0.001	0.001	0.004
V	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001
Total	2.964	2.966	2.966	2.969	2.964

FeO* = total Fe.

의 값을 갖는데(Reyneke and Wallmach, 2007) 연구지역에서는 최소 97 wt.% 이상의 함량을 보여준다(그림 7, 8). 이처럼 TiO₂는 금홍석을 구성하는 주 성분으로서 큰 변화를 나타내지 않지만 면산층 하부에서 상부로 가면서 미약하게 감소하는 경향을 보인다(그림 8a). 이상적인 티탄철석은 FeO와 TiO₂ 비가 1:1로 구성되며 일반적으로 50~54 wt.%의 TiO₂ 함량을 갖는다(Reyneke and Wallmach, 2007). 연구지역 내 티탄철석 또한 TiO₂ 함량이 FeO보다 높게 나타난다(그림 7). 티탄철석은 풍화를 받을수록 Fe가 제거되어 Ti 함량이 증가하는 것으로 알려져

있다(Reyneke and Wallmach, 2007). 연구지역 티탄철석 또한 결정면이 뚜렷하지 않고 파쇄된 조직이 발달하는 것으로 보아(그림 4d) 풍화 및 속성작용의 영향으로 TiO₂ 함량이 상대적으로 높게 나타나는 것으로 보인다.

한편, 수도부르크사이트(pseudobrookite)는 고온의 산화환경에서 형성되는 Ti-Fe 산화광물로 급격한 냉각을 겪은 화산암에서 주로 산출된다(Haggerty and Lindsley, 1970; Deer, 2011). 일부 면산층 하부와 홍제사화강암 접촉부의 티탄철석은 수도부르크사이트 영역에 치우쳐 도시되는 것으로 보아(그림 7), 이들이

Table 6. Portable XRF analyses and magnetic susceptibilities of the samples.

Location	Sample no.	Portable XRF		MS	Location	Sample no.	portable XRF		MS
		Ti (wt.%)	Fe (wt.%)	(mSI unit)			Ti (wt.%)	Fe (wt.%)	(mSI unit)
Hongjesa contact (GGHJ)	1	4.5	14.5	9.85	Myeonsan (GG) upper	74	5.3	20.0	1.65
	2	4.4	16.9	4.33		75	3.4	11.7	1.82
lower	2	2.4	16.9	26.05		79	1.3	9.4	0.53
	7	3.6	13.3	2.22		82	0.9	12.8	0.90
	12	3.6	16.0	5.49		85	1.2	12.7	1.04
	15	3.9	11.3	1.35		88	3.5	14.8	1.29
	18	1.0	8.6	0.43		94	1.9	11.6	1.30
	21	0.6	6.8	0.44		97	2.3	12.0	0.61
	22	5.9	20.3	1.44		100	3.0	11.6	0.77
	23	1.8	11.9	1.95		103	0.9	10.1	1.28
	26	2.2	13.4	0.63		105	2.3	9.3	3.00
	28	2.9	11.8	1.67		107	0.8	14.3	3.89
Myeonsan (GG)	31	3.1	10.8	1.01		108	1.4	7.9	1.68
	34	1.8	14.5	16.45		110	1.0	8.6	0.67
	37	1.3	5.6	16.50	113	0.7	11.9	0.86	
	40	0.7	4.8	7.77	118	0.7	8.9	0.81	
	42	2.1	10.7	0.84	Myobong (GG)	124	0.6	9.2	0.65
	43	6.6	18.5	1.04		126	0.6	10.4	2.72
	54	4.5	15.9	2.19		131	1.3	14.7	4.13
	59	5.1	15.2	1.06		137	1.0	12.0	11.32
	63	3.8	18.1	1.06		144	0.7	8.8	4.81
	66	1.5	14.3	0.82					
	69	6.0	23.0	3.36					
71	3.7	13.3	1.41						

고온의 산화환경의 화성활동과 관련되어 생성된 후 풍화작용에 의해 운반되었을 것으로 추정된다.

적철석은 Fe₂O₃ 외에도 TiO₂, MnO 및 MgO를 포함하는데(Deer, 2011), 최대 11.5 wt.%의 높은 TiO₂ 함량을 보이기도 하나(Dougan, 1974), 대체로 0.10~1.8 wt.% 정도의 함량을 갖는 것으로 알려져 있다(Deer, 2011). 면산층 내 적철석은 일반적인 경우보다 높은 TiO₂ 값(0.36~13.68 wt.%)을 나타내며(표 4; 그림 7b), 묘봉층 내 적철석도 최대 8.11 wt.%를 가지며, 면산층과 비슷한 조성범위를 보여준다(그림 7b). 한편, 흥제사화강암 접촉부에서는 순수한 적철석 조성에 좀 더 가깝게 도시된다(그림 7b). Basta (1953)은 합성실험을 통하여 800°C 온도에서 최대

5 wt.%의 TiO₂가 적철석 내 포함되며, Hwang *et al.* (2008)은 석류석 감람암(garnet peridotite)의 감람석으로부터 생성된 적철석이 고온고압(5.3~6.6 GPa, 853~957°C)하에서 최대 9.2 wt.% TiO₂ 함량을 갖는다고 보고하였다. 이러한 사실은 적철석내 비교적 높은 TiO₂ 함량이 고온의 생성환경과 관련되었음을 시사하는 것으로 연구지역 적철석의 생성환경을 지시하는 것으로 추정된다.

5.3 광화작용특성

면산층 시료에 대한 주사전자현미경 관찰결과 석영과 금속광물이 서로 뚜렷한 경계를 보이며 산출되는 것으로 알려져 왔다(Oh, 2020; Lee *et al.*, 2021).

Table 7. Summary of mineralogical and geochemical characteristics.

Location	Mineralogy	TiO ₂ content (wt.%)				Ti content (pXRF) (wt.%)	Magnetic susceptibility (mSI unit)	
		rutile	ilmenite	hematite	magnetite			
Hongjesa contact	Qtz, Mus, Ab, Chl, Mic	98.54-98.95 (98.74)	52.72	0.55-5.19 (2.54)	-	4.4-4.5 (4.5)	4.33-9.85 (7.09)	
Myeonsan	Lower	Qtz, Mus, Ab, Chl, Cc, Mic	98.90-99.34 (99.22)	51.68-54.57 (53.09)	2.04-5.37 (3.48)	0.01-0.04 (0.02)	0.6-5.9 (2.7)	0.43-26.05 (4.93)
	Middle	Qtz, Mus, Ab, Chl, Mic, Cc	97.07-99.63 (98.37)	50.19-52.73 (51.84)	2.50-8.42 (4.83)	0.01-0.04 (0.02)	0.7-6.6 (3.5)	0.82-16.50 (3.60)
	Upper	Qtz, Mus, Ab, Chl, Cc	97.69-99.22 (98.70)	49.16-51.56 (50.41)	0.36-13.68 (5.85)	-	0.8-5.3 (2.2)	0.53-3.89 (1.52)
Myobong	Qtz, Mus, Cc, Chl, Mic	-	-	0.15-8.11 (3.91)	0.12	0.6-1.3 (0.8)	0.65-11.32 (3.25)	

- = not analysed. Abbreviation: Mic = microcline. Refer to Figure 3 for others.

Minerals in the column of Mineralogy are arranged in the order of abundances. Data in parentheses represent average values.

본 연구에서 현미경관찰 시 금속광물은 주로 층리방향을 따라 분포하거나, 석영 입자 사이 공간을 채우며 산출된다(그림 3d, 3f). 또한 견운모와 녹니석이 석영 및 금속광물 사이를 채우는 교질물 형태로 나타나는데(그림 3c), 퇴적 및 속성작용에 따른 결과로 여겨지며 뚜렷한 열수작용의 흔적은 관찰되지 않는다.

면산층의 퇴적시기는 전기캠브리아기로 보고되었으며, 해양기원 체화석이 따로 발견되지 않았지만 흔적화석의 산출로 시기를 추정하였다(Kim, 1991). Parnell *et al.* (2014)은 선캠브리아시대부터 오랜 기간 지표에 노출되어 풍화작용을 받아 평탄화된 지형으로부터 유래된 다량의 금속성분을 포함한 퇴적물이 캠브리아기 해양분지로 운반되어 퇴적된 사례가 나타난다고 보고하였으며, 태백산분지로 유입된 선캠브리아기 퇴적물은 후기신원생대부터 전기캠브리아기동안 일어난 화성 및 변성활동에 의해 급격한 용기와 침식을 겪은 대륙화산호 또는 조산운동대에서 기원되는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2013). 이러한 특성을 근거로 연구지역 면산층은 풍화작용을 받은 선캠브리아기 기반암으로부터 유래된 금속광물을 포함한 퇴적물이 퇴적분지로 유입되어 형성된 퇴적광상으로, 고사광상(paleoplacer deposit)으로 간주된다(Kim, 1991; Kim and Lee, 2006; Parnell *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2016).

사광상(placer deposit)은 결정질 암석이 풍화를

받아 형성된 쇄설성 물질이 해안가로 운반되어 발달하고(Lalomov *et al.*, 2015), 이는 주로 티타늄 뿐 아니라 지르코늄(Zr) 등 다양한 희유금속(rare metal)을 함유하여 발달한다(Hamilton, 1995). 러시아 북쪽 북극해 연안에는 금, 주석, 저어콘-티타늄, 그리고 희유금속을 포함한 다양한 사광상이 분포하고 있으며 퇴적물이 공급된 거리에 따라 근지성 및 원지성으로 구분하였다(Bochneva *et al.*, 2021). 이 가운데 근지성 사광상의 경우 급경사(scarp) 또는 지구(graben) 지형에서 나타나며 근원암의 흔적을 발견할 수 있는 근원지와 가까운 곳에서 형성되고, 금, 백금족, 주석, 그리고 희유원소 광상이 발달한다. 반면, 원지성 사광상은 근원암으로부터 먼 거리로 이동하여 퇴적된 것으로 근원지 특성에 대한 파악이 어려우며, 주로 하천, 삼각주, 그리고 해안가에서 나타나고, 다이아몬드, 티타늄-저어콘, 그리고 금광상이 발달한다(Bochneva *et al.*, 2021). 우크라이나에 위치한 크라스노쿠츠크(Krasnokutsk) 광상의 경우 희유금속-티타늄 사광상으로 파라테티스분지(Paratethys basin)의 침식단계에서 유래된 퇴적물이 해안선을 따라 공급된 것으로 쇄설성 물질이 원거리로 이동하여 형성된 원지성 사광상에 해당한다(Ganzha *et al.*, 2019). 연구지역 면산층은 다른 지층들과 달리 많은 양의 Ti-Fe 산화광물을 함유하고 있고(Kim, 1991; Park *et al.*, 2022), 원암의 기원이 불분명한 상태이며, 공급된 퇴적물이 천해환경 또는 조간대환경과 같은 해

안가로 이동하여 퇴적된 것으로 보아(Kim, 1991; Woo *et al.*, 2006) 원지성 사광상에 해당하는 것으로 보인다.

일반적으로 금홍석은 화성암, 고변성 변성암류, 쇠설성 퇴적물, 그리고 사광상에서 산출된다(Stanaway, 2005; Meinhold, 2010). 티탄철석은 대체로 화성암 그리고 변성암에서 부수적으로 산출되며, 반려암, 노라이트(norite) 그리고 회장암과 같은 고철질 화성암과 관련하여 큰 규모로 발달한다(Zhou *et al.*, 2013; Charlier *et al.*, 2015). 중국 남서부에 위치한 어메이산 고철질 화성암체(Emeishan large igneous province)는 높은 Ti 함량과 낮은 Ti 함량을 함유한 화성암이 분포하며 많은 Fe-Ti 광상이 발달하고 있다(Xiao *et al.*, 2004; Pang *et al.*, 2010; Shellnutt, 2014). Xiao *et al.* (2004)는 어메이산 고철질 화성암체 서부에 위치한 현무암 대지(flood basalt)의 상부가 하부보다 더 분화하였으며 전암분석결과 상부 현무암의 TiO₂ 함량은 약 3 wt.% 이상, 하부는 2 wt.% 이하로 상부가 더 높다고 보고하였다. Kim and Lee (2006)에 의하면 면산층의 Ti-Fe 산화광물을 공급한 기원지와 관련하여 경기육괴 북동부에 위치한 라파키비(rapakivi) 화강암에 대한 가능성을 제시한 바 있다. 이 라파키비 화강암은 1839±10 Ma의 연대를 보이며(Zhai *et al.*, 2005), 반려암, 회장암 등 고철질 화성암과 관련된 비조산성 마그마활동(anorogenic magmatism)에서 나타나는 것으로 알려져 있다(Haapala and Rämö, 1990; Rämö and Haapala, 1995). 이처럼 고철질 화성암체는 많은 양의 Ti-Fe 산화광물을 공급할 수 있는 근원암이 될 수 있으며, 또한 마그마활동으로 산출되는 Ti-Fe 산화광물에는 용리조직이 잘 발달된 특징이 있다(Shellnutt *et al.*, 2011; Tan *et al.*, 2016).

본 연구에서 면산층 내 Ti-Fe 산화광물 함량과 Ti 조성이 하부에서 상부로 갈수록 감소하는 양상을 보이는데(그림 6, 8; 표 7), 이는 공급지에서 원암의 조성이 연속적으로 변화하였음을 시사한다. 면산층 Ti-Fe 산화광물을 공급한 근원암은 고온의 고철질 화성암으로 분화 초기 Ti 함량이 결핍되어 정출되고, 분화가 진행되며 Ti 함량이 증가한 것으로 보인다. 이후 Ti이 풍부한 근원암의 상부에서부터 순차적으로 풍화를 받아 운반된 퇴적물이 면산층을 형성한 것으로 여겨진다. 또한 연구지역 면산층에서 용리조직이 발달한 Ti-Fe 산화광물이 산출되는 것은(그림 4), 이들

이 고철질 화성암체에서 유래되었음을 뒷받침한다.

6. 결론

가곡면 면산층은 주로 암회색을 띠고 사질과 이질부분이 교호하여 발달하며 층리면을 따라 Ti-Fe 산화광물인 금홍석과 티탄철석이 석영과 함께 산출된다. 티탄철석은 주로 적철석과 함께 산출되며 용리조직을 보인다. 면산층의 금속광물 함량비는 평균 5.2%로 일반적인 사암보다 높으며, 사질성분대와 이질성분대의 Ti 함량범위는 유사하나 평균 조성은 사질성분(3.3 wt.%)에서 높게 나타난다. 연구지역 면산층 내 금홍석 함량은 하부(3.4%)에서 상부(1.9%)로 갈수록 감소하는 경향을 나타내며 티탄철석은 하부(1.6%)에서 상대적으로 높고 상부로 가면서 반복적인 변화양상을 보인다. 금홍석과 티탄철석 내 TiO₂ 함량도 하부에서 상부로 가면서 감소하는 경향이 뚜렷하다. 또한 홍제사화강암 접촉부에서의 Ti 함량은 최대 4.5 wt.%에 이르고, 면산층 상부와 묘봉층으로 가면서 점차 감소한다. 이러한 면산층 Ti-Fe 산화광물의 조직, 함량, 그리고 Ti 조성변화는 하부에서 상부로 가면서 광물군과 티타늄 함량이 순차적으로 변화하는 고철질 화성암체의 풍화에 기인되었음을 시사한다.

감사의 글

이 논문은 한국광해광업공단 ‘일반광업육성지원 정밀조사사업(2022)’과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1008260). 논문에 대해 유익한 비평을 주신 편집위원과 심사위원들께 감사드린다.

REFERENCES

- Basta, E.Z., 1953, Mineralogical aspects of the system FeO-Fe₂O₃-TiO₂. Ph.D. thesis, University of Bristol, Bristol, UK., 228 p.
- Bochneva, A., Lalomov, A. and LeBarge, W., 2021, Placer mineral deposits of Russian arctic zone: genetic prerequisites of formation and prospect of development of mineral resources. *Ore Geology Reviews*, 138, 104349.

- Buddington, A.F. and Lindsley, D.H., 1964, Iron-titanium oxide minerals and synthetic equivalents. *Journal of Petrology*, 5, 310-357.
- Charlier, B., Namur, O., Bolle, O., Latypov, R. and Duchesne, J.C., 2015, Fe-Ti-V-P ore deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites and related rocks. *Earth-Science Reviews*, 141, 56-81.
- Cheong, C.H., 1969, Stratigraphy and paleontology of the Samcheog coalfield, Gangweondo, Korea (I). *Journal of Geological Society of Korea*, 5, 13-56.
- Cheong, C.H., Lee, D.S., Um, S.H. and Chang, K.H., 1973, Investigation of geological classification of Korea. Ministry of Science and Technology, R-73-51, 68 p (in Korean with English abstract).
- Choi, D.K., Chough, S.K., Kwon, Y.K., Lee, S.B., Woo, J., Kang, I., Lee, H.S., Lee, S.M., Sohn, J.W., Shinn, Y.J. and Lee, D.J., 2004, Taebaek Group (Cambrian-Ordovician) in the Seokgaegae section, Taebaeksan basin: a refined lower Paleozoic stratigraphy in Korea. *Geosciences Journal*, 8, 125-151.
- Chough, S.K., 2013, *Geology and Sedimentology of the Korean Peninsula*. Elsevier, Amsterdam, 363 p.
- Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J., 2011, *Rock-forming minerals, Vol. 5A, Non-silicates: oxides, hydroxides and sulphides*. Geological Society of London, U.K., 920 p.
- Dougan, T.W., 1974, Cordierite gneisses and associated lithologies of the Guri area, northwest Guayana shield, Venezuela. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 46, 169-188.
- Force, E.R., 1991, Geology of titanium mineral deposits. *Geological Society of America Special Paper*, 259, 1-120.
- Ganzha, E.A., Lalomov, A.V., Chefranova, A.V., Grigor'eva, A.V. and Magazina, L.O., 2019, Lithostructural geological-genetic model and mineral composition of the Krasnokutsk rare metal-titanium placer deposit (Ukraine). *Lithology and Mineral Resources*, 54, 465-479.
- Haapala, I. and Rämö, O.T., 1990, Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites of Finland. *Geological Society of America Special Paper*, 246, 275-286.
- Haggerty, S.E. and Lindsley, D.H., 1970, Stability of the pseudobrookite (Fe₂TiO₅)-ferropseudobrookite (FeTi₂O₅) series. *Carnegie Institute. Washington Year Book*, 68, 247-249.
- Hamilton, N.T.M., 1995, Controls on the global distribution of coastal titanium-zirconium placers. *International Geology Review*, 37, 755-779.
- Hong, S.S., 2004, Magnetic susceptibility and petrochemical compositions of Mesozoic granites in Korea. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 13, 16-33 (in Korean with English abstract).
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M. and Banerjee, S.K., 1995, Magnetic properties of rocks and minerals. In: Ahrens, T.J. (eds.), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 3, 189-204.
- Hwang, S.L., Yui, T.F., Chu, H.T., Shen, P., Iizuka, Y., Yang, H.Y., Yang, J. and Xu, Z., 2008, Hematite and magnetite precipitates in olivine from the Sulu peridotite: a result of dehydrogenation-oxidation reaction of mantle olivine?. *American Mineralogist*, 93, 1051-1060.
- Jeon, H.S., Baek, S.H., Kim, S.M. and Go, B.H., 2018, Status of reserves and development technology of rare earth metals in Korea. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55, 67-82 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.S., Hwang, M.K., Ree, J.H. and Yi, K., 2013, Tectonic linkage between the Korean peninsula and mainland Asia in the Cambrian: insights from U-Pb dating of detrital zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 368, 204-218.
- Kim, J. and Cho, M., 1994, Petrogenesis of the Precambrian Hongjesa granite. *Journal of Petrological Society of Korea*, 3, 76-93.
- Kim, J.Y., 1991, Stratigraphy of the Myeonsan Formation in Samcheoggun, Kangwondo and Ponghwagun, Kyongsangbukdo. *Journal of the Geological Society of Korea*, 27, 225-245.
- Kim, J.Y. and Cheong, C.H., 1987, The Precambrian-Cambrian boundary in the east of the Dongjeom fault, Gangweon-do, Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 23, 145-158.
- Kim, K.H., Lee, H.J. and Chon, H.T., 1994, Ore genesis of the Yeonchon titaniferous iron ore deposits, South Korea. *Economic and Environmental Geology*, 27, 117-130 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. and Lee, Y.I., 2006, Early evolution of the Duwibong unit of the lower Paleozoic Joseon Supergroup, Korea: a new view. *Geosciences Journal*, 10, 391-402.
- Lalomov, A.V., Paltonov, M.V., Tugarova, M.A., Bochneva, A.A. and Chefranova, A.V., 2015, Rare metal-titanium placer metal potential of Cambrian-Ordovician sandstones in the northwestern Russian plate. *Lithology and Mineral Resources*, 50, 501-511.
- Lee, H.S., Park, K.H., Song, Y.S., Kim, N.H. and Orihashi, Y., 2010, LA-ICP-MS U-Pb zircon age of the Hongjesa granite in the northeast Yeongnam massif. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 103-108 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., Oh, M.K. and Choi, T., 2021, Recognition of the "Great Unconformity" in the eastern Sino-Korean block: insights from the Teabaek Group, Korea. *Precambrian Research*, 364, 106363.
- Lee, J.H., Yang, S.J., White, N.C., Shin, D. and Kim, E.J.,

- 2022, Whole-rock geochemistry and mineral compositions of gabbroic rocks and the associated Fe-Ti-(V) oxide deposit in the Gonamsan intrusion, South Korea. *Ore Geology Reviews*, 148, 105054.
- Lee, Y.I., Choi, T.J. and Lim, H.S., 2016, Depositional age and petrological characteristics of the Jangsan Formation in the Taebaeksan basin, Korea-revisited. *Journal of the Geological Society of Korea*, 52, 67-77 (in Korean with English abstract).
- Lindsley, D.H., Andreasen, G.E. and Balsley, J.R., 1966, Magnetic properties of rocks and minerals. In: Clark, S.P. (eds.), *Handbook of Physical Constants* (Revised edition), Geological Society of America Memoir, 97, 543-552.
- Meinhold, G., 2010, Rutile and its applications in earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 102, 1-28.
- Oh, M.K., 2020, Sedimentology of the hydrothermally altered Myobong Formation (lower Cambrian), Taebaek, Korea. M.S. thesis, Chungnam National University, Daejeon, 67 p (in Korean with English abstract).
- Pang, K.N., Zhou, M.F., Qi, L., Shellnutt, G., Wang, C.Y. and Zhao, D., 2010, Flood basalt-related Fe-Ti oxide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China. *Lithos*, 119, 123-136.
- Park, C., Yu, J., Oh, M.K., Lee, G. and Lee, G., 2022, Detection of titanium bearing Myeonsan Formation in the Joseon Supergroup based on spectral analysis and machine learning techniques. *Economic and Environmental Geology*, 55, 197-207 (in Korean with English abstract).
- Parnell, J., Mark, D.F., Frei, R., Fallick, A.E. and Ellam, R.M., 2014, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of exceptional concentration of metals by weathering of Precambrian rocks at the Precambrian-Cambrian boundary. *Precambrian Research*, 246, 54-63.
- Rämö, O.T. and Haapala, I., 1995, One hundred years of rapakivi granite. *Mineralogy and Petrology*, 52, 129-185.
- Reyneke, L. and Wallmach, T., 2007, Characterization of Fe-Ti-oxide species occurring in the Ranobe heavy mineral deposit, Madagascar. In *The 6th International Heavy Mineral Conference: Back to Basics*. The South African Institute of Mining and Metallurgy, South Africa, 151-158.
- Seo, J., Choi, S.G., Koo, M., Oh, C.W., Ryu, I.C. and Lee, G., 2020, A study of igneous rocks related to Zn-Pb mineralization in the Shinyemi and Gagok deposits of the Taebaeksan basin, South Korea. *Resource Geology*, 70, 215-232.
- Shawe, D.R., 1968, Petrography of sedimentary rocks in the Slick Rock district, San Miguel and Dolores Counties, Colorado. U.S. Government Printing Office, B1-B34.
- Shellnutt, J.G., 2014, The Emeishan large igneous province: a synthesis. *Geoscience Frontiers*, 5, 369-394.
- Shellnutt, J.G., Wang, K.L., Zellmer, G.F., Iizuka, Y., Jahn, B.M., Pang, K.N., Qi, L. and Zhou, M.F., 2011, Three Fe-Ti oxide ore-bearing gabbro-granitoid complexes in the Panxi region of the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *American Journal of Science*, 311, 773-812.
- Stanaway, K.J., 2005, Four world titanium mining provinces. *Heavy Minerals Conference Proceedings*, Jacksonville, Florida, 47-59.
- Tan, W., Liu, P., He, H., Wang, C.Y. and Liang, X., 2016, Mineralogy and origin of exsolution in Ti-rich magnetite from different magmatic Fe-Ti oxide-bearing intrusions. *The Canadian Mineralogist*, 54, 539-553.
- Woo, J., Shinn, Y.J., Kwon, Y.K. and Chough, S.K., 2006, The Jangsan and Myeonsan Formations (early Cambrian) of the Taebaek Group, mid-east Korea: depositional processes and environments. *Geosciences Journal*, 10, 35-57.
- Xiao, L., Xu, Y.G., Mei, H.J., Zheng, Y.F., He, B. and Pirajno, F., 2004, Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plum-lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228, 525-546.
- Zhai, M., Ni, Z., Oh, C.W., Guo, J. and Choi, S.G., 2005, SHRIMP zircon age of a Proterozoic rapakivi granite batholith in the Gyeonggi massif (South Korea) and its geological implications. *Geological Magazine*, 142, 23-30.
- Zhou, M.F., Chen, W.T., Wang, C.Y., Prevec, S.A., Liu, P.P. and Howarth, G.H., 2013, Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type Fe-Ti-V oxide deposits, SW China. *Geoscience Frontiers*, 4, 481-502.

Received : February 20, 2023

Revised : March 16, 2023

Accepted : March 17, 2023