Research Paper

Genetic Environment of the Pailou Magnesite Deposit in Dashiqiao Belt, China, and Its Comparison with the Daeheung Deposit in North Korea

Heonkyung Im¹, Dongbok Shin^{1,2,*}, Bong-chul Yoo³

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

²Yellow Sea Institute of Geoenvironmental Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

*Corresponding author : shin@kongju.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 21 December 2021

Received in revised form 23 December 2021

Manuscript accepted 23 December 2021

Available online 28 December 2021

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2021.54.6.767>

Research Highlights

- Magnesite ores from the Pailou deposits in the Dashiqiao belt formed by replacement of dolomite subjected to Mg-rich fluid
- Enrichment of magnesite ores through regional metamorphism and hydrothermal alteration to produce talc and chlorite
- Petrography, fluid inclusions, and chlorite geothermometer showing similar genetic environments to those of the Daeheung deposit in North Korea

ABSTRACT

World-class magnesite deposits are developed in the Dashiqiao mineralized district of the Jiao-Liao-Ji Belt in China. This belt extends to the northern side of the Korean Peninsula and hosts major magnesite deposits in the Dancheon region of North Korea. Magnesite ores from the Pailou deposits in the Dashiqiao district is classified into pure magnetite, chlorite-magnetite, chlorite-talc-magnetite, and dolomite groups depending on the constituent minerals. According to the result of petrographic study, magnesite was formed by the alteration of dolomite, and talc, chlorite, and apatite were produced as late-stage alteration minerals that replaced the magnesite. Fluid inclusions observed in magnesite are a liquid-type inclusion, with a homogenization temperature of 121–250 °C and a salinity of 1.7–22.4 wt% NaCl equiv. The chlorite geothermometer, indicating the temperature of hydrothermal alteration, is 137–293 °C, slightly higher than the homogenization temperature of fluid inclusions, and the pressure is calculated to be less than 3.2 kb. For magnesite mineralization in the study area, the initially formed-dolomite was subjected to replacement by Mg-rich fluid to form a magnesite ore body, and then it was enriched through regional metamorphism and hydrothermal alteration. It seems that altered minerals such as talc were crystallized by Si and Al-rich late-stage hydrothermal fluids. These results are similar to the genetic environments of the Daeheung deposit, a representative magnesite deposit in North Korea, and it is believed that the two deposits went through a similar geological and ore genetic process of magnesite mineralization.

Keywords : Pailou deposit, magnesite, fluid inclusion, chlorite geothermometer, Daeheung deposit

Citation: Im, H., Shin, D., Yoo, B.-c. (2021) Genetic Environment of the Pailou Magnesite Deposit in Dashiqiao Belt, China, and Its Comparison with the Daeheung Deposit in North Korea. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.54, p.767-785, doi:10.9719/EEG2021.54.6.767.

✂ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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.

pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2021 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

중국 다스차오벨트 펠로우 마그네사이트 광상의 생성환경 및 북한 대흥 광상과의 비교

임헌경¹ · 신동복^{1,2,*} · 유봉철³

¹공주대학교 지질환경과학과

²황해지질환경연구소

³한국지질자원연구원 자원탐사개발연구센터

*책임저자 : shin@kongju.ac.kr

요 약

중국 차오랴오지(Jiao-Liao-Ji) 벨트에 속한 다스차오(Dashiqiao) 광화대에는 세계적 규모의 마그네사이트 광상들이 발달하며, 한반도 북측으로 연장되어 북한 단천지역 주요 마그네사이트 광상도 이에 속한다. 중국 다스차오 광화대 펠로우(Pailou) 광상의 마그네사이트 광석은 구성광물에 따라 순수한 마그네사이트, 녹니석-마그네사이트, 녹니석-활석-마그네사이트, 그리고 돌로마이트 그룹으로 구분된다. 암석기재 연구결과 마그네사이트는 돌로마이트가 변질작용을 받아 형성되었음을 보여주며, 이를 다시 교대하는 후기 변질광물로 활석, 녹니석, 인회석 등이 산출된다. 마그네사이트내에 관찰되는 유체포유물은 액상포유물로서 균일화온도는 121~250 °C, 염농도는 1.7~22.4 wt% NaCl equiv.의 범위를 보여준다. 열수변질작용의 온도를 지시하는 녹니석 지온계는 137~293 °C로서 유체포유물의 균일화온도에 비해 약간 높으며, 이들의 생성압력은 3.2 kb 이하로 나타난다. 연구지역 마그네사이트 광화작용은 초기 형성된 돌로마이트가 Mg가 부화된 유체에 의한 교대작용을 받아 마그네사이트 광체를 형성하고, 이후 광역변성작용과 열수변질작용을 거치며 부화되었으며, Si 및 Al이 부화된 후기 열수에 의해 활석 등의 변질광물이 정출된 것으로 보인다. 이러한 결과는 북한의 대표적인 대흥 마그네사이트 광상의 정출환경과 유사하며 두 광상이 상호 유사한 지질광상학적 생성과정을 거치며 광화작용이 진행된 것으로 여겨진다.

주요어 : 중국 펠로우광상, 마그네사이트, 유체포유물, 녹니석 지온계, 북한 대흥광상

1. 서 론

최근 광물자원은 첨단산업의 발전과 함께 국내 산업 및 경제규모가 성장함에 따라 활용 분야가 증가하고 실생활에도 다양하게 활용됨에 따라 수요가 점차 증가한다. 반면, 광물자원의 가격은 지속적으로 상승하며 변동폭도 심하여 광물자원산업 전반에 영향을 미친다. 따라서, 국내 산업 및 경제성장을 도모하기 위해 안정적인 자원수급이 필요하며, 국내 자체적인 자급률을 상승시키고 다양한 방식의 수입구조를 확보하여야 한다. 국내 광물자원의 자급률은 2016년 이후 지속적인 하락세를 보이고 있으며, 2020년 금속광의 자급률은 1.1 %에 불과하고 대부분을 수입에 의존하는 상황이다(KIGAM, 2021). 최근 금, 은 등의 국내 생산량은 감소하였지만 아연, 철, 티타늄의 생산이 증가하여 금속광의 자급률은 2020년 소폭 상승한 것으로 보인다. 반면, 비금속광상의 자급률은 63 %로 금속광에 비해 높지만, 대부분 납석, 장석, 석회석, 규석, 그리고 고령토 등 제한된 광물자원만 국내에서 개발된다.

이 가운데 마그네사이트는 철강, 시멘트 및 내화산업 뿐 아니라 환경, 농업, 스포츠에도 사용되는 필수적인 자원이다. 특히, 우리나라는 고품위 마그네사이트를 활용한 내화물 제조기술, 친환경 마그네슘 신합금 개발, 부품화 기술개발 등 고부가가치 제품을 생산하는 국가로 마그네사이트는 중요한 자원이다. 그러나 마그네사이트는 거의 대부분 중국(81.71 %)과 일본(13.88 %)에서 수입되고 있어 안정적인 수급을 위해 수입국을 다양화할 필요가 있다. 한편, 북한에 부존된 광물자원은 유용 광종이 약 200여 종이며, 이 중 세계 10위권에 해당하는 마그네사이트는 전 세계 매장량의 18.3 %, 품위는 45 %에 해당한다(KIGAM, 2021).

이에 따라, 향후 통일 시대를 대비한 북한 마그네사이트 광체에 관한 연구가 필요한 상황이다. 그러나 북한 마그네사이트 광상에 대한 접근 및 시료 확보는 매우 제한적이기 때문에 지체구조과 지질광상학적 유사성이 높은 중국 마그네사이트 광상에 대한 연구를 통해 생성환경 및 광체의 특성에 대한 이해를 높일 필요가 있다. 이에

본 연구에서는 중국의 대표적인 마그네사이트 산지인 다스차오(Dashiqiao) 광화대내 펄로우(Pailou) 광상에 대한 광상학적 연구를 수행하여 이를 기존에 보고된 북한 단천지구 마그네사이트 광상과 비교 해석함으로써 상호 유사성을 확인하고 생성환경에 대한 이해를 높이고자 한다.

2. 지질 및 광상

2.1. 광역 지질

북중국의 선클램브리아기 기반암은 북중국횡단조산대(Trans-North China Orogen)에 의해 서쪽과 동쪽지괴로 구분되며, 연구지역이 속하는 자오랴오지벨트(Jiao-Liao-Ji Belt)는 동쪽지괴에 속한다(Fig. 1). 중국 동측에서 한반도 북측으로 연결되는 이 벨트는 룡강복합체(Longgang

Complex)와 낭림복합체(Nanglim Complex)의 충돌에 의해 형성된 것으로 녹색편암상의 변성도를 보여 낮은 온도-압력 조건의 광역변성작용을 받은 것으로 보인다(Li *et al.*, 2006; Tam *et al.*, 2012). 또한, 이 벨트에는 고원생대 라호에(Liaohé)층군이 발달하며, 시생대 안산(Anshan)층군과는 부정합으로 상부에 위치한다. 라호에층군은 하부로부터 랑지산(Langzishan)층, 리에류(Lieryu)층, 가오자유(Gaojiayu)층, 다스차오(Dashiqiao)층, 그리고 가이산(Gaixian)층으로 분류된다(Wan *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2008). 랑지산층은 244~1,278 m의 두께를 보이며, 흑연을 포함한 석회질 장식-석영 편암, 각섬암, 규선석을 포함한 운모 편암, 박층의 대리암, 그리고 역암을 협재한 규암으로 구성된다(Tang *et al.*, 2013). 상부의 리에류층은 편암과 백운암질 대리암으로 구성된다(Jiang *et al.*,

Fig. 1. Geologic map showing the distribution of the Liaohé Group in the Dashiqiao magnesite belt and the position of the Pailou magnesite deposit in northeastern China (after Tang *et al.*, 2013).

2004). 가오자유층은 371~557 m의 두께를 보이며, 석류석을 포함한 복운모 석영 편암, 흑운모 편암, 천매암, 그리고 백운암질 대리암으로 구성된다(Tang *et al.*, 2013). 다스차오층은 활석, 마그네사이트, 그리고 사문석광상이 발달하며, 탄산염암, 점판암, 천매암, 편암, 그리고 백운암질 대리암으로 구성된다(Chen *et al.*, 2003; Jiang *et al.*, 2004). 최상부층인 가이산층은 넓은 구역에 발달하며, 복운모 편암, 운모를 포함한 장식질 편암, 규암, 천매암, 그리고 점판암으로 구성된다(Tang *et al.*, 2013). 연구지역 편암의 연대측정 결과 라호에층군의 퇴적시기는 2.22~2.02 Ga이며 광역변성작용 시기는 1.86 Ga로 알려졌다(Luo *et al.*, 2004, Wan *et al.*, 2006). 이후 중생대 안산니안(Yanshanian) 조산운동 시기에 많은 화성암이 관입하였다(Hart *et al.*, 2002).

차오랴오지벨트의 서측에는 세계적 규모의 마그네사이트, 활석, 그리고 봉산염(Borate) 광산이 위치한다. 대표적인 마그네사이트 광상은 쑹슈이쉬(Shengshuish), 칭산화이(Qingshanhuai), 슈관(Shuiquan), 화지유(Huaziyu), 펠로우(Pailou), 진자바오(Jinjiabao), 샤팡셹(Xiafangsheng), 그리고 판자바오지(Fanjiabaozi) 광상이며, 모두 다스차오벨트에 위치한다(Fig. 1). 이 벨트의 확정 매장량은 29억 여 톤이며(The Ministry of Land and Resources of China, 2001), 중국의 마그네사이트 매장량의 80% 이상이고 전 세계 매장량의 30% 이상에 해당한다(Chen *et al.*, 2003).

2.2. 연구지역 지질 및 광상

연구지역인 펠로우 마그네사이트 광상은 다스차오시에 서 북동방향으로 약 25 km 떨어진 지역에 위치한다(Fig. 1). 이 일대 다스차오층은 남서쪽에 위치한 가이산층 하부에 발달하며(Fig. 1), 주로 백운암질 대리암으로 구성되어 있고, 국부적으로 석회암이 교호하여 산출된다(Zhang and Yang 1988; Liu *et al.*, 1997). 이 석회암은 층리가 미약하게 발달하고 단층 파쇄대 인접한 지역에서는 변형작용을 받아 기존 층리와 동일한 방향의 엽리면이 발달한다. 연구지역의 북쪽 지역에서는 상대적으로 유백색의 중립 내지 조립질의 괴상 마그네사이트가 산출된다. 일부 지역에서는 층상의 마그네사이트가 부분적으로 나타나며, 이 마그네사이트는 유백색의 마그네사이트가 우세한 부분과 각섬석 그룹의 광물이 산출된 부분이 교호하는 결정질(sperry) 조직이 발달한다. 중생대 안산니안 조산운동 시기에 관입한 화성암이 분포하며 이후 소규모의 중성 및 염기성 암맥이 관입하였다.

펠로우광상은 대부분 다스차오층에 포함된 수 십~수 백 m의 두께의 백운암질 대리암내의 마그네사이트 광체를 대상으로 남북 1.5 km 그리고 동서 3.5 km 규모로 노

Fig. 2. Aerial view (www.google.com/maps) of the Pailou magnesite deposit and sample locations.

천채광 방식으로 개발이 이뤄지고 있다(Fig. 2). 연구지역 하부층은 세립질 백운암이 산출되며, 재결정작용을 받아 조립질을 이루기도 하며 담회색을 띠며 층상으로 산출된다. 마그네사이트층이 수십 cm 내지 수 m의 폭으로 발달하며, 부분적으로 활석과 더불어 산출되기도 한다. 마그네사이트는 중립질에서 조립질이며 백운암질 대리암의 층리면과 나란하게 발달한다. 신선한 광체는 유백색을 띠나 풍화변질을 많이 받은 암석은 담황색을 띤다. 활석은 모암인 백운암질 대리암과의 접촉부에 주로 분포하는데 대부분 세립질이며 담회색 내지 담홍색을 띤다. 광상의 남서부지역은 담회색의 백운암질 대리암이 우세하며, 이를 중성 내지 염기성 암맥이 관입하고 있다. 또한, 열수변질작용으로 형성된 마그네사이트와 활석이 관찰된다. 광상의 중앙부는 유백색 괴상의 마그네사이트가 산출되며, 북동부지역은 중립 또는 조립질의 유백색 마그네사이트가 산출되고, 일부지역에서는 모암변질로 형성된 활석이 확인된다(Tang *et al.*, 2013).

3. 연구방법

펠로우광상에서의 광석 및 모암시료는 광산의 남서부 6개 지점(19PL-1~6), 중앙부 2개 지점(19PL-7, 8), 그리고 북동부 5개 지점(19PL-9~13) 등 13개 지점에서 총 22개 시료를 채취하였다(Fig. 2). 암석기재학적 연구는 채취된 시료를 암석절편 및 박편을 제작하여 육안 및 현미경관찰을 하고, 미세조직 확인을 위해 후방산란전자(Back Scattered Electron) 이미지 분석을 수행하였다. 구성광물

의 종류 및 조성을 확인하기 위해 경상대학교 공동실험실습관에 있는 JEOL JXA-8530F PLUS를 이용하여 전자현미분석(Electron Probe Micro Analysis)을 실시하였다. 분석원소는 Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Cr, F, Cl, P이며, 분석조건은 가속전압 15KeV, 전류 10 nA, 그리고 빔 직경은 10 μ m 이다.

유체포유물 연구를 위해 10개의 마그네사이트 시료를 대상으로 양면 연마박편을 제작하였고, 총 119개의 유체포유물을 대상으로 균일화온도(T_h) 및 용융온도(T_{mice})를 측정하였다. 분석은 공주대학교 광상학실험실의 THMS600 (Linkam) 장비를 이용하였으며 정확도를 높이기 위해 온도가 확인된 표준시료를 대상으로 보정작업을 하였으며 각 값의 오차범위는 ± 0.1 $^{\circ}$ C이다. 측정된 값을 이용하여 구한 염농도 및 생성압력은 Driesner and Heinrich(2007)가 제시한 SOWAT 프로그램을 활용하였다.

4. 암석기재학

4.1. 산출광물의 공생관계

팰로우광상에서 채취된 시료는 육안으로 백색, 회색,

그리고 분홍색 계열의 색상으로 구분된다. 대부분의 시료는 고품위 마그네사이트 광석이며, 일부 시료에서 돌로마이트가 우세하게 관찰된다. 이들 시료에 대한 육안 관찰 및 현미경관찰을 통해 구성광물에 따라 순수한 마그네사이트, 녹니석-마그네사이트, 녹니석-활석-마그네사이트, 그리고 돌로마이트 그룹으로 분류하였다(Table 1).

순수한 마그네사이트는 팰로우 마그네사이트 광상 전 지역에서 확인되며, 채취한 시료 중 남서부지역의 19PL-6, 6-2 시료, 중부지역의 19PL-7, 그리고 북동부지역의 19PL-10a, 13, 13-1, 13-3, 13-4 시료들이 이에 해당된다(Fig. 2). 순수한 마그네사이트 시료들은 백색, 회색, 그리고 분홍색으로 다양한 색을 띤다(Fig. 3a-c). 대부분 조립질(19PL-13, 13-1, 13-3, 13-4)이며, 잔류 돌로마이트 및 소량의 석영 및 인회석이 산출되며, 변질광물은 거의 관찰되지 않는다. 석영, 방해석 혹은 돌로마이트로 구성된 세맥들이 마그네사이트를 교대하며 산출된다(Fig. 4b-d, m). 석영맥은 마그네사이트 결정의 경계부를 따라 발달하며(Fig. 4a), 어두운 부분은 인회석이 함께 수반된다(Fig. 4a). 소량의 잔류 돌로마이트는 마그네사이트내에 산점상 또는 석영맥 주변에 분포한다(Fig. 4b, l). 전반적으

Table 1. Petrographic descriptions of magnesite ores and dolostones in the Pailou deposit

Rock type	Group	Sample No.	Minerals	Lithology
Magnesite	Pure Mgs	19PL-6	Mgs $\pm$ Qtz	White, coarse grained, Qtz vein
		19PL-6-2	Mgs $\pm$ Qtz $\pm$ Dol $\pm$ Apt	White and gray, coarse grained, Qtz+Apt vein
		19PL-7	Mgs+Qtz $\pm$ Dol	Pinkish white, coarse grained, Qtz vein
		19PL-10a	Mgs+Qtz $\pm$ Tlc $\pm$ Dol	Pinkish white, coarse grained, Qtz vein
		19PL-13	Mgs $\pm$ Cc	Pinkish, coarse grained, Cc vein
		19PL-13-1	Mgs, Qtz	Pinkish white, coarse grained, Qtz vein
		19PL-13-3	Mgs+Dol	Pinkish, coarse grained, Dol vein
		19PL-13-4	Mgs $\pm$ Dol	Pinkish, coarse grained, Dol vein
	Chl+Mgs	19PL-6-1	Mgs $\pm$ Qtz $\pm$ Chl $\pm$ Apt	White and gray, coarse grained, Qtz+Chl+Apt vein
		19PL-9	Mgs $\pm$ Chl $\pm$ Dol	Pinkish white, coarse grained, Chl+Dol vein
		19PL-11	Mgs $\pm$ Chl $\pm$ Tlc	White, coarse grained, Chl+Tlc vein
		19PL-13-2	Mgs $\pm$ Dol $\pm$ Chl $\pm$ Apt	Pinkish, coarse grained, Chl+Apt and Dol vein
	Chl+Tlc+Mgs	19PL-2-1	Mgs+Tlc+Chl $\pm$ Apt	Gray, coarse to medium grained, Chl+Tlc+Apt vein
		19PL-2-2	Mgs+Tlc+Chl $\pm$ Apt	Dark gray, coarse to medium grained, Chl+Tlc+Apt vein
		19PL-3-1	Mgs+Tlc+Chl	White, coarse to medium grained, Chl+Tlc vein
		19PL-3-2	Mgs+Tlc+Chl $\pm$ Apt	White, coarse to medium grained, Chl+Tlc+Apt vein
		19PL-8a	Mgs+Tlc+Chl $\pm$ Dol	Gray, coarse grained, Chl+Tlc vein
		19PL-10b	Mgs+Tlc+Chl $\pm$ Apt	Pinkish white, coarse grained, Chl+Tlc+Apt vein
Dolostone	Dol	19PL-1	Dol $\pm$ Qtz	White, fine grained, Dol vein
		19PL-4	Dol $\pm$ Chl	Dark gray, fine grained, Dol vein
		19PL-5	Dol+Qtz $\pm$ Apt	White, coarse to medium grained, Qtz vein
		19PL-12	Dol $\pm$ Apt	Dark gray, fine grained, Qtz vein

Refer to Figure 3 and 4 for abbreviations.

Fig. 3. Rock slab images of magnesite ores from the Pailou deposit. a-c) pure magnesite group, d-e) chlorite+magnesite group, f-g) chlorite+talc+magnesite group, h-i) dolomite group. Abbreviations: Qtz=quartz, Mgs=magnesite, Dol=dolomite, Chl=chlorite, Tlc=talc.

로 순수한 마그네사이트 그룹은 마그네사이트가 우세한 가운데 석영, 인회석, 돌로마이트 등이 미량 확인되며, 녹니석과 활석은 관찰되지 않는다.

녹니석-마그네사이트 그룹은 남서부(19PL-6-1)와 북동부(19PL-9, 11, 13-2) 시료에서 확인되며(Fig. 2), 회색, 백색, 그리고 분홍색을 띤다(Fig. 3d-e). 대부분 조립질이며, 부분적으로 결정질(sparry) 조직이 발달한다. 이 시료에서 어둡게 나타나는 부분은 석영 혹은 인회석과 더불어 녹니석이 함께 산출되며, 이들은 마그네사이트 결정 경계면을 따라 교대하며 분포한다(Fig. 4e, n). 이 밖에 돌로마이트가 미량 수반되나 활석은 산출되지 않는다(Fig. 4e-f, n).

녹니석-활석-마그네사이트 그룹은 펠로우광상의 남서부(19PL-2-1, 2-2, 3-1, 3-2), 중부(19PL-8a), 그리고 북동부(19PL-10b) 지역에서 모두 관찰된다(Fig. 2). 시료들은 육안으로 회색, 암회색 또는 연분홍색이 우세하게 나타나며, 전반적으로 불순물이 많은 부분에서 어둡게 나타나는 경향을 보인다(Fig. 3f). 활석이 우세한 부분은 상대적으로 경도가 작고 투명한 특징을 보이며, 마그네사이트가 우세한 부분은 불투명하며 상대적으로 경도가 높다(Fig. 3g). 현미경 관찰결과 마그네사이트가 우세하게 분포하며, 중립질 또는 조립질을 보이지만, 녹니석과 활석

은 세립질을 이루며 마그네사이트를 교대하며 산출된다(Fig. 4g-h). 전반적으로 녹니석보다는 활석이 우세하지만 활석이 단일 광물로 산출되는 양상을 보이지는 않는다.

돌로마이트 그룹은 19PL-1 시료를 제외하고 나머지(19PL-4, 5, 12)는 비교적 광상의 외곽부에 해당한다. 돌로마이트는 육안으로 백색시료(19PL-1, 5)와 짙은 회색시료(19PL-4, 12)로 구분된다(Fig. 3h-i). 현미경 관찰결과 19PL-1과 4 시료에는 모암인 돌로마이트를 후기에 절단하는 돌로마이트맥이 관찰되며, 이들 맥상의 돌로마이트는 밝은 색을 띤다(Fig. 3h-i, 4i-j). 모암에 해당하는 돌로마이트는 대부분 세립질이지만, 맥상 돌로마이트는 상대적으로 큰 결정을 보인다(Fig. 4i). 또한 후기 석영맥들이 모암인 돌로마이트를 절단하는 모습도 관찰된다(Fig. 3i). 이밖에 미량의 석영 및 인회석이 산점상으로 산출되거나, 돌로마이트를 교대하거나 절단하며 발달한다.

4.2. 산출광물의 반응관계

펠로우광상의 돌로마이트는 모암, 맥상, 그리고 산점상으로 산출되며, 이 가운데 산점상의 돌로마이트는 마그네사이트 광체 내에 포획된 형태로 발달하고 있어서 모암인 돌로마이트가 변질교대작용을 받아 마그네사이트가 형성되었음을 보여준다(Fig. 4b, l). 이러한 관계는 다음

Fig. 4. Microphotographs and BSE images of magnesite ores from the Pailou deposit. a-d, l-m) pure magnesite group, e-f, n) chlorite+magnesite group, g-h, k) chlorite+talc+magnesite group, i-j) dolomite group. Abbreviations: Apt=apatite, Cc=calcite. Refer to Figure 3 for others.

과 같은 변질작용에 의해 생성된 것으로 여겨진다.

맥상의 돌로마이트는 기존 모암의 돌로마이트(Fig. 4j)나 마그네사이트(Fig. 4d, k)를 절단하고 있어서 마그네사이트 생성 이후에 후기 돌로마이트가 정출되었음을 알

수 있다. 또한 마그네사이트 광석에서는 석영 또는 방해석으로 구성된 세맥이 마그네사이트를 교대하는 조직을 보이기도 한다(Fig. 4b, c, m).

마그네사이트 광석에는 녹니석, 활석, 인회석 등으로 구성된 맥이 관찰되며, 이들은 대부분 마그네사이트 결정 경계면을 따라 소규모로 산출되거나, 기존의 마그네사이트를 교대하여 발달한다(Fig. 4e, g, h, n). 대부분의

시료에서 녹니석과 활석이 함께 산출되지만, 일부에서는 녹니석만 관찰되는 경우도 있다. 이들 후기변질광물의 산출은 Si, Al 등을 함유한 규질의 열수유체의 유입에 의해 다음과 같은 반응에 의해 형성된 것으로 보인다.

인회석은 녹니석 또는 녹니석+활석으로 구성된 세맥 내에 산점상으로 발달하는데 열수유체의 유입에 따른 돌로마이트의 변질과정에서 빠져나온 Ca^{2+} 와 잔류 유체가 반응하여 생성된 것으로 보인다(Fig. 4n). 즉, 모암인 돌로마이트의 변질작용에 의해 마그네사이트가 정출되고, 이후 규질의 열수유체의 유입으로 마그네사이트를 교대하며 녹니석 및 활석이 산출되었으며, 돌로마이트의 Ca

와 잔류 유체에 의해 인회석이 정출된 것으로 보인다. 이 과정에서, 후기의 돌로마이트, 방해석, 그리고 석영맥들이 마그네사이트를 교대하며 발달하였다.

5. 광물화학

펠로우광상에서 산출되는 주요 탄산염 광물인 돌로마이트와 마그네사이트, 그리고 녹니석을 대상으로 전자현미분석을 실시하였다(Table 2-4). 모암, 맥상, 그리고 산점상으로 산출되는 돌로마이트에 대한 분석결과를 CaO-MgO-FeO와 SiO₂-CaO-MgO 삼각다이아그램에 도시한 결과 거의 순수한 조성에 해당하며, 상호간에 뚜렷한 차이를 보이지 않는다(Fig. 5a, b). CaO와 MgO 상호관계에서는 정의 상관관계를 보이며 변화한다(Fig. 5c). 그러나 CaO 함량이 모암과 잔류 돌로마이트에서 각각 28.91~30.86 wt.% (avg. 30.26 wt.%)과 29.44~30.94 wt.% (avg. 30.31 wt.%)인 반면, 맥상의 경우 28.90~30.35 wt.% (avg. 29.94

Fig. 5. Chemical compositions of magnesite and dolomite plotted on the (a) CaO-MgO-FeO and (b) SiO₂-CaO-MgO diagrams, and compositional variations between (c) MgO and CaO and (d) FeO and MnO for different types of dolomites comprising the magnesite ore.

Table 2. Electron microprobe analysis of dolomite in the Pailou deposit

Sample No.	Type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total
19PL-1	host	<DL	<DL	0.30	0.01	21.75	29.41	51.46
19PL-1	vein	<DL	0.02	0.59	0.12	21.21	28.90	50.84
19PL-1	host	<DL	<DL	0.31	0.05	21.13	29.57	51.06
19PL-3-1	residue	<DL	<DL	0.10	<DL	21.59	30.35	52.04
19PL-3-1	residue	<DL	<DL	0.11	<DL	22.01	30.50	52.62
19PL-3-1	residue	<DL	0.03	0.06	0.02	21.75	30.49	52.35
19PL-4	vein	<DL	<DL	0.33	0.05	21.92	30.14	52.44
19PL-4	host	<DL	0.01	0.63	0.03	21.50	30.78	52.94
19PL-4	host	<DL	<DL	0.10	0.04	22.02	30.66	52.82
19PL-4	vein	<DL	<DL	0.44	<DL	21.56	30.24	52.23
19PL-5	host	<DL	<DL	0.04	0.01	21.83	30.48	52.37
19PL-5	host	<DL	0.00	0.08	0.03	21.85	30.35	52.32
19PL-5	host	<DL	<DL	0.05	<DL	21.60	30.53	52.18
19PL-5	host	<DL	<DL	0.03	0.02	22.05	30.39	52.49
19PL-5	host	<DL	<DL	0.04	0.01	22.13	30.70	52.88
19PL-5	host	<DL	0.02	0.04	<DL	21.93	30.64	52.62
19PL-5	host	<DL	0.03	0.07	<DL	22.04	30.48	52.61
19PL-6-2	residue	<DL	<DL	0.12	0.05	21.76	30.23	52.16
19PL-6-2	residue	<DL	0.03	0.08	0.01	21.67	30.94	52.73
19PL-6-2	residue	<DL	<DL	0.07	0.02	21.85	29.95	51.89
19PL-7	residue	<DL	0.02	0.10	0.04	21.31	29.44	50.90
19PL-7	residue	<DL	0.07	0.11	0.06	21.38	29.87	51.48
19PL-7	residue	<DL	<DL	0.12	0.04	21.35	30.29	51.80
19PL-8a	residue	<DL	<DL	0.07	<DL	22.05	30.74	52.86
19PL-8a	residue	<DL	0.01	0.12	0.01	21.94	30.59	52.66
19PL-9	vein	<DL	0.02	0.07	<DL	21.85	29.85	51.78
19PL-9	vein	<DL	0.01	0.03	0.03	21.65	30.01	51.73
19PL-10a	vein	<DL	<DL	0.06	<DL	21.62	30.30	51.97
19PL-12	host	<DL	0.01	0.46	0.04	21.86	30.86	53.23
19PL-12	host	<DL	0.08	0.75	0.01	21.38	30.06	52.29
19PL-13-2	vein	<DL	0.02	0.03	<DL	21.21	30.20	51.45
19PL-13-2	vein	<DL	0.01	0.09	<DL	22.13	29.96	52.20
19PL-13-3	host	<DL	0.02	0.12	0.05	21.82	30.40	52.41
19PL-13-3	host	<DL	<DL	0.05	<DL	21.74	30.01	51.80
19PL-13-3	vein	<DL	0.02	0.15	0.04	21.58	29.80	51.59
19PL-13-3	vein	<DL	0.01	0.09	0.02	21.41	30.35	51.88
19PL-13-4	vein	<DL	0.03	0.06	<DL	21.60	29.90	51.59
19PL-13-4	vein	<DL	<DL	0.08	<DL	21.34	29.68	51.09

<DL: below detection limit.

wt.%)로서 상대적으로 낮게 나타난다(Fig. 5c). FeO 함량의 경우 대부분 0.2 wt.% 미만의 함량을 보이나 일부 모암과 맥상시료에서 0.3 wt.% 이상을 보이기도 한다(Fig. 5d). 마그네사이트도 거의 순수한 조성을 보이며 광물조합에

따른 차이도 거의 나타나지 않는다.

녹니석은 녹니석-마그네사이트 그리고 녹니석-활석-마그네사이트 그룹을 구성하며 이들에 대한 분석결과는 Table 4에 제시되어 있다. 녹니석-마그네사이트 그룹에서

Table 3. Electron microprobe analysis of magnesite in the Pailou deposit

Group	Sample No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total
Pure Mgs	19PL-6	0.03	<DL	0.27	0.03	47.09	0.02	47.45
	19PL-6	<DL	0.02	0.28	0.02	46.96	0.66	47.93
	19PL-6-2	0.02	0.03	0.35	0.07	45.77	0.67	46.89
	19PL-6-2	<DL	0.05	0.34	0.03	46.03	0.44	46.89
	19PL-6-2	<DL	<DL	0.33	0.04	45.78	0.75	46.90
	19PL-7	<DL	<DL	0.49	0.02	45.65	0.85	47.02
	19PL-10a	<DL	0.02	0.22	0.00	46.08	0.65	46.98
	19PL-10a	0.05	0.05	0.12	0.02	46.15	0.19	46.57
	19PL-10a	0.02	<DL	0.22	0.06	46.16	0.12	46.57
	19PL-10a	<DL	<DL	0.19	<DL	46.89	0.19	47.27
	19PL-13	0.04	<DL	0.63	0.04	45.86	0.36	46.92
	19PL-13	0.00	<DL	0.59	0.05	45.76	0.44	46.84
	19PL-13-1	<DL	0.01	0.34	0.01	47.54	0.28	48.18
	19PL-13-2	0.02	0.01	0.39	0.06	45.98	0.72	47.18
	19PL-13-2	0.03	<DL	0.38	0.02	45.80	0.68	46.91
	19PL-13-3	0.03	0.01	0.38	0.01	45.98	0.01	46.42
	19PL-13-3	<DL	<DL	0.05	<DL	46.92	0.16	47.12
	19PL-13-3	0.00	<DL	0.19	0.02	46.81	0.17	47.20
	19PL-13-3	<DL	0.02	0.21	0.01	46.41	0.78	47.44
	19PL-13-4	0.01	<DL	0.27	0.04	46.33	0.12	46.77
	19PL-13-4	<DL	0.00	0.41	0.01	46.17	0.53	47.12
Chl+Mgs	19PL-6-1	<DL	0.03	0.21	0.04	46.40	0.63	47.32
	19PL-9	<DL	<DL	0.08	0.01	46.93	0.33	47.35
	19PL-11	<DL	0.01	0.24	0.07	46.49	0.97	47.78
	19PL-11	<DL	<DL	0.23	0.06	47.19	0.33	47.80
Chl+Tlc+Mgs	19PL-2-1	<DL	<DL	0.33	<DL	46.12	0.68	47.13
	19PL-2-1	<DL	<DL	0.34	0.04	46.00	0.59	46.97
	19PL-2-1	0.04	<DL	0.34	0.03	46.37	0.06	46.83
	19PL-2-1	<DL	<DL	0.37	0.02	45.92	0.71	47.03
	19PL-2-2	0.03	0.00	0.19	<DL	46.18	0.17	46.56
	19PL-2-2	0.01	0.05	0.20	0.01	46.82	0.01	47.09
	19PL-3-1	0.01	<DL	0.27	<DL	47.32	0.31	47.91
	19PL-3-1	<DL	<DL	0.21	0.04	46.35	0.52	47.12
	19PL-3-2	0.01	<DL	0.20	0.05	46.61	0.66	47.53
	19PL-3-2	<DL	0.03	0.22	0.05	45.95	0.42	46.67
	19PL-8a	0.03	<DL	0.49	0.05	47.64	0.03	48.23
	19PL-10b	<DL	<DL	0.26	<DL	47.29	0.04	47.60
	19PL-10b	<DL	0.00	0.42	<DL	46.87	0.04	47.32
	19PL-10b	<DL	<DL	0.21	0.06	46.96	0.20	47.43
	19PL-10b	<DL	<DL	0.23	0.02	46.69	0.75	47.70
	19PL-10b	0.03	0.00	0.17	0.00	46.57	0.90	47.68

<DL: below detection limit.

의 SiO₂ 함량은 32.69-42.61 wt.% (avg. 36.40 wt.%)이고, 녹니석-활석-마그네사이트 그룹에서는 30.92-36.18 wt.%

(avg. 32.88 wt.%)으로서 후자가 다소 낮은 함량을 보인다. 이에 대응하는 녹니석 사면체구조의 Si 함량은 녹니

Table 4. Electron microprobe analysis of chlorite in the Pailou deposit

Groups		Chl+Mgs										Chl+Tlc+Mgs														
Sample No.	19PL-6-1					19PL-9					19PL-11					19PL-13-2	19PL-2-1					19PL-2-2				
Analysis No.	1	3	4	5	6	7	3	4	5	3	4	5	2	2	3	5	6	8	9	10	1	2	5	6		
SiO ₂	42.56	33.86	34.61	33.93	34.93	38.12	39.05	36.86	37.34	33.46	33.24	32.69	42.61	33.17	35.72	32.81	32.22	31.62	35.74	33.28	30.92	32.30	31.17	32.39		
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01		
Al ₂ O ₃	12.46	12.56	16.49	13.23	16.68	12.71	17.66	16.61	16.55	16.79	16.05	15.85	15.96	16.44	15.90	17.90	18.47	17.69	14.93	17.26	19.87	17.94	19.95	19.13		
FeO	0.13	0.17	0.09	0.16	0.11	0.21	0.24	0.15	0.16	0.16	0.14	0.14	0.32	0.15	0.18	0.11	0.19	0.23	0.15	0.18	0.16	0.13	0.16	0.24		
MnO	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02	0.02	0.01		
MgO	23.86	32.19	34.40	33.04	25.14	29.32	27.14	25.74	26.72	35.52	35.50	35.86	29.15	35.03	33.74	34.15	34.32	34.23	34.16	33.85	33.90	34.60	33.63	33.43		
CaO	0.03	0.32	0.09	0.13	0.08	0.47	0.10	0.11	0.25	0.03	0.02	0.01	0.26	0.01	0.03	0.01	0.03	0.04	0.01	0.03	0.04	0.05	0.02	0.02		
Na ₂ O	0.00	0.08	0.00	0.01	0.02	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.01	0.04	0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.02		
K ₂ O	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.05	0.13	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03		
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.04	0.01		
F	0.53	0.45	0.10	0.20	0.26	0.82	0.79	0.43	0.69	0.16	0.07	0.00	1.78	0.16	0.03	0.00	0.16	0.10	0.00	0.19	0.51	0.35	0.32	0.42		
Cl	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01		
Total	79.59	79.69	85.81	80.71	77.24	81.81	85.17	79.94	81.74	86.16	85.03	84.56	90.19	85.01	85.67	85.04	85.44	83.99	85.03	84.94	85.40	85.43	85.32	85.70		
Cations based on 28 oxygen																										
Si	7.14	7.05	6.77	6.45	6.71	7.09	7.31	5.96	6.07	6.35	5.98	6.10	5.87	6.26	6.65	6.19	6.05	6.05	6.71	6.27	5.80	6.06	5.85	6.04		
Al(IV)	0.86	0.95	1.23	1.55	1.29	0.91	0.69	2.04	1.93	1.65	2.02	1.90	2.13	1.74	1.35	1.81	1.95	1.95	1.29	1.73	2.20	1.94	2.15	1.96		
Al(VI)	2.90	1.99	1.74	2.08	1.81	3.09	2.21	2.04	2.19	2.11	2.23	2.45	2.23	1.92	2.15	2.17	2.15	2.05	2.02	2.11	2.21	2.04	2.29	2.26		
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		
Fe ³⁺	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.06	0.05	0.05	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04		
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		
Mg	7.61	9.28	9.59	9.56	9.75	7.61	8.38	9.76	9.51	9.33	9.48	9.05	9.43	9.85	9.37	9.60	9.60	9.77	9.57	9.51	9.47	9.67	9.42	9.29		
Ca	0.05	0.03	0.07	0.02	0.03	0.02	0.10	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00		
Na	0.00	0.00	0.06	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01		
K	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01		
F	0.83	0.32	0.57	0.11	0.24	0.34	0.99	0.27	0.23	0.60	0.19	0.27	0.46	0.19	0.04	0.00	0.19	0.12	0.00	0.23	0.61	0.42	0.38	0.49		
Cl	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01		
Fe/(Fe+Mg)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
T (°C)*	-	-	136.8	187.5	145.1	-	-	266.5	248.6	203.2	263.5	244.7	280.5	218.6	154.7	229.4	252.1	251.8	145.1	216.7	292.9	250.7	283.4	253.9		

Table 4. Continued

Groups		ChI+Tlc+Mgs																									
Sample No.		19PL-3-1							19PL-3-2							19PL-8a					19PL-10b						
Analysis No.		1	2	5	6	7	3	4	5	9	10	11	3	4	5	1	2	3	7	8	9	12	13				
SiO ₂		32.77	32.74	32.76	35.18	32.20	31.82	32.42	34.79	31.78	32.57	31.40	33.65	34.84	33.25	32.14	31.84	31.48	32.76	36.18	32.64	32.36	32.02				
TiO ₂		0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Al ₂ O ₃		17.34	17.78	16.95	15.74	18.53	18.41	18.60	17.37	19.10	19.68	19.65	16.59	16.33	18.66	19.08	19.81	20.66	18.97	14.67	20.76	20.00	19.28				
FeO		0.11	0.14	0.13	0.12	0.13	0.27	0.23	0.17	0.37	0.34	0.30	0.17	0.20	0.23	0.16	0.13	0.14	0.17	0.18	0.17	0.16	0.20				
MnO		0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02				
MgO		34.93	34.62	35.19	34.19	34.37	34.95	34.07	34.26	33.79	32.45	33.82	35.40	35.06	34.85	33.34	32.44	32.06	33.39	34.78	32.24	33.13	33.36				
CaO		0.05	0.01	0.02	0.01	0.02	0.07	0.03	0.04	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02				
Na ₂ O		0.09	0.06	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00				
K ₂ O		0.07	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.04	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.00				
Cr ₂ O ₃		0.00	0.03	0.04	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00	0.01	0.04	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00				
F		0.00	0.48	0.23	0.16	0.19	0.23	0.19	0.52	0.16	0.23	0.39	0.35	0.19	0.48	0.00	0.00	0.13	0.00	0.07	0.00	0.16	0.00				
Cl		0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00				
Total		85.43	85.91	85.32	85.43	85.51	85.79	85.59	87.20	85.33	85.38	85.65	86.22	86.70	87.56	84.85	84.33	84.54	85.40	85.93	85.85	85.88	84.91				
Cations based on 28 oxygen																											
Si		6.17	6.09	6.16	6.57	6.04	7.30	6.07	6.35	5.98	6.10	5.87	6.25	6.43	6.07	6.23	6.28	6.23	6.25	6.43	6.07	7.15	7.21				
Al(IV)		1.83	1.91	1.84	1.43	1.96	0.70	1.93	1.65	2.02	1.90	2.13	1.75	1.57	1.93	1.77	1.72	1.77	1.75	1.57	1.93	0.85	0.79				
Al(VI)		2.02	2.02	1.93	2.05	2.15	2.59	2.19	2.11	2.23	2.45	2.23	1.89	1.99	2.11	1.92	1.86	1.78	1.89	1.99	2.11	3.00	3.06				
Ti		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Cr		0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Fe ³⁺		0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.04	0.03	0.06	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02				
Fe ²⁺		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
Mn		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00				
Mg		9.80	9.61	9.87	9.52	9.61	7.45	9.51	9.33	9.48	9.05	9.43	9.80	9.64	9.48	9.86	10.00	10.18	9.80	9.64	9.48	7.41	7.50				
Ca		0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02				
Na		0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00				
K		0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.06	0.01				
F		0.00	0.57	0.27	0.19	0.23	1.93	0.23	0.60	0.19	0.27	0.46	0.42	0.23	0.56	0.19	0.08	0.00	0.42	0.23	0.56	0.91	0.53				
Cl		0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01				
Fe/(Fe+Mg)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00				
T (°C)*		233.3	245.1	234.1	168.0	253.7	-	248.6	203.2	263.5	244.7	280.5	220.3	191.4	248.7	222.8	215.0	223.8	220.3	191.4	248.7	-	-				

* data calculated by Cathelineau and Nieva (1995)

Fig. 6. Compositions of chlorites from the Pailou deposit plotted on the nomenclature diagram of chlorites (after Hey, 1954). Refer to Figure 3 for abbreviations.

석-마그네사이트 그룹에서는 5.87-7.31 그리고 녹니석-활석-마그네사이트 그룹에서는 5.80-7.30으로서 상호 유사하게 나타난다(Table 4). 한편, MgO 함량은 녹니석-마그네사이트 그룹에서 23.86-35.86 wt.% (avg. 30.27 wt.%) 그리고 녹니석-활석-마그네사이트 그룹에서 32.06-35.40 wt.% (avg. 33.99 wt.%)로서 후자에서 높다. 반면 FeO 함량은 대부분 0.3 wt.% 이하의 낮은 값을 보인다. 이에 따라 Hey(1954)의 녹니석 분류에 의하면, 펠로우광상에서 산출되는 녹니석의 조성은 두 그룹에서 모두 클리노클로어 조성이 우세하며, 페니나이트와 활석-녹니석도 산출된다(Fig. 6).

6. 유체포유물

연구지역의 유체포유물 분석은 마그네사이트 그룹 5개, 녹니석-마그네사이트 그룹 2개, 그리고 녹니석-활석-마그

Fig. 7. Microphotographs of two-phase fluid inclusions (L-V) hosted in magnesite from the Pailou deposit. a-b) pure magnesite group, c) chlorite+magnesite group, d) chlorite+talc+magnesite group.

네사이트 그룹의 3개 시료를 대상으로 하였으며, 상온(약 20 °C)에서 관찰된 상을 기초로 분석한 결과 기상이 약 10~40 % 부피비(avg. 19 %)를 보여 액상포유물에 해당되며, 대부분 10 μm 이하의 크기를 보인다.

순수한 마그네사이트 그룹(19PL-6, 6-2, 10a, 13, 13-1)의 유체포유물은 8 μm 이하의 크기를 보이는 액상포유물로서 자형 또는 반자형으로 발달한다(Fig. 7). 이들은 대체로 산점상 또는 광물의 결정면에 평행하게 선상배열을 한다. 균일화온도는 130~243 °C 그리고 녹는점은 -20~-2 °C로서 Driesner and Heinrich(2007)에 의해 계산된 염농도는 3.4~22.3 wt% NaCl equiv.의 범위를 나타낸다(Table 5). 녹니석-마그네사이트 그룹(19PL-6-1, 11)의 유체포유물도 8 μm 미만의 크기로 액상포유물로서 자형 또는 타형을 이루며, 주로 산점상으로 발달한다(Fig. 7). 균일화온도는

Table 5. Summary of microthermometric data of fluid inclusions from the Pailou deposit

Groups	Sample No.	Inclusion type	Number of analysis	Size(μm)	Th(°C)	Tm _{ice} (°C)	Salinity (wt%NaCl)	P(bar)
Pure Mgs	19PL-6	Liquid-rich	21	< 8	145 ~ 239	-12 ~ -2	3.4 ~ 16.0	4.1 ~ 32.0
	19PL-6-2	Liquid-rich	8	< 8	140 ~ 243	-9 ~ -3	5.0 ~ 12.8	10.0 ~ 32.5
	19PL-10a	Liquid-rich	8	< 4	130 ~ 161	-5 ~ -2	3.4 ~ 7.9	2.6 ~ 3.3
	19PL-13	Liquid-rich	14	< 4	134 ~ 213	-20 ~ -5	7.9 ~ 22.3	2.7 ~ 17.0
	19PL-13-1	Liquid-rich	7	< 4	173 ~ 220	-12 ~ -9	12.8 ~ 16.0	7.5 ~ 13.6
Chl+Mgs	19PL-6-1	Liquid-rich	12	< 8	150 ~ 220	-18 ~ -1	1.7 ~ 21.0	4.4 ~ 13.5
	19PL-11	Liquid-rich	8	< 6	143 ~ 171	-6 ~ -1	1.7 ~ 9.2	3.9 ~ 7.6
Chl+Tlc+Mgs	19PL-2-1, 2-2	Liquid-rich	9	< 10	163 ~ 224	-12 ~ -4	6.4 ~ 16.0	11.0 ~ 23.6
	19PL-8a	Liquid-rich	32	< 11	121 ~ 250	-20 ~ -2	3.4 ~ 22.4	2.0 ~ 10.6

Fig. 8. Microthermometric measurements of two-phase fluid inclusions in magnesite from the Pailou deposit. (A) Histogram of homogenization temperature, (B) Histogram of salinity, (C) Homogenization temperature and salinity correlation plotted on the phase diagram of H_2O -NaCl (Driesner and Heinrich, 2007).

143~220 °C, 녹는점은 -18~-1 °C로서 염농도는 1.7~21.0 wt% NaCl equiv.에 해당하며 마그네사이트 그룹과 유사하게 나타난다(Table 5). 활석-마그네사이트 그룹(19PL-2-1, 2-2, 8a)의 경우도 앞선 그룹들과 마찬가지로 액상형 유체포유물이 관찰된다(Fig. 7). 유체포유물의 크기는 대체로 10 μm 이하이며, 대부분 자형으로 산출되며 산점상 혹은 선상배열을 한다(Fig. 7. 19PL-8a). 이 그룹의 균일화온도는 121~250 °C, 용융온도는 -20~2 °C로서 염농도는 3.4~22.4 wt% NaCl equiv.의 범위를 보여 다른 그룹들과 유사하다(Table 5).

펠로우광상의 유체포유물 분석결과 전체적으로 균일화온도는 121~250 °C, 염농도는 1.7~22.4 wt% NaCl equiv.로서 넓게 나타나며 광물조합에 따른 차이는 거의 나타나지 않는다(Fig. 8). 이들 분석값에 대해 Driesner and Heinrich(2007)가 제시한 식을 적용하여 구한 압력은 전체적으로 2.0~32.5 bar의 범위를 나타낸다(Table 5).

7. 토 의

7.1. 광화유체 및 생성환경

전세계적으로 마그네사이트 광상의 유체포유물 연구에서 스페인 루비안(Rubian) 광상과 오스트리아의 호헨타우에른-준크(Hohentauern-Sunk) 광상은 균일화온도가 140~190 °C (max. 350 °C) 그리고 염농도는 3.5~29.5 wt%

NaCl equiv. 값을 보여주는 것으로 알려졌다(Kilias *et al.*, 2006; Zadeh *et al.*, 2015), 스페인 북동부 시에라 메네라(Sierra Menara) 광상에서는 마그네사이트-능철석 광화작용이 해성기원 탄산염암이 100~150 °C의 저온의 열수환경에서 변질작용에 의해 형성된 것으로 보고되기도 했다(Fernandez-Nieto *et al.*, 2003) (Fig. 9). 슬로바키아의 누스타 무트니크(Hnust'a-Mutnik) 활석-마그네사이트 광상과 미코바-제들로베크(Mikova-Jedl'ovec) 마그네사이트 광상은 각각 각섬암상과 녹색편암상의 변성작용을 받아 형성된 광상으로서 전체적인 균일화온도는 195~348 °C, 염농도는 23~32 wt% NaCl equiv.로서 앞서 제시한 광상들에 비해 현저히 높다(Kodera and Radvanec, 2002). 한편, 스페인 유구이(Eugui) 마그네사이트 광상은 140~300 °C의 넓은 균일화온도를 보이는데 이는 퇴적 및 속성과정을 통해 생성된 마그네사이트 광상이 광역변성작용을 거치며 재결정화되는 변화과정을 거친 것과 관련된 것으로 여겨진다(Velasco *et al.*, 1987). 한편, 다스차오 마그네사이트 광화대 유체포유물에 대한 기존 연구결과에서는 균일화온도가 130~300 °C, 염농도는 <37 wt% NaCl equiv.로서 비교적 높은 염농도를 보이는 것으로 나타났다(Chen *et al.*, 2003). 이러한 결과와 비교할 때 본 연구에서 구한 펠로우광상 유체포유물의 균일화온도(121~250 °C)와 염농도(1.7~22.4 wt% NaCl equiv.)는 기존 보고된 마그네사이트 연구결과 범위에 포함되는 것으로 볼 수 있

Fig. 9. Diagram summarizing the data of salinity and homogenization temperature of fluid inclusions from representative magnesite deposits worldwide, in comparison with those of the Pailou deposit (red cross) in this study.

다(Fig. 9).

유체포유물에서는 비등현상에 의해 동일 시료에서 두 가지 유형(액상이 우세한 포유물, 기상이 우세한 포유물)의 포유물이 공존하고 두 포유물이 유사한 온도에서 균일화 되었을 때 이 때의 균일화온도는 생성온도를 지시한다 (Roedder, 1984). 그러나 본 연구에서는 단일 유형인 액상포유물만 관찰되어 균일화온도 및 압력은 최저 생성조건을 지시한다. 아울러 균일화온도와 염농도를 함께 도 시한 결과 양자 간에는 뚜렷한 상호 관련성을 보이지 않는다(Fig. 8). 연구지역 마그네사이트 광화작용의 온도 및 압력 조건을 확인하기 위해 녹니석 지온계와 이를 활용한 유체포유물 지온계-지압계 분석을 수행하였다. 마그네사이트 광석에 수반되는 녹니석은 규질의 열수유체와 마그네사이트와의 반응에 의한 변질 산물로 여겨지며, 조성분석 결과 클리노클리어, 페니나이트, 그리고 활석-녹니석으로 분류된다(Fig. 6). Cathelineau and Nievia(1985)는 녹니석의 조성과 온도와의 관련성을 활용하여 생성온도를 추정하는 방법을 제시하였고, 이 방법으로 연구지역 녹니석 조성을 활용하여 생성온도를 추정한 결과 생성온도 범위는 137~293 °C를 보인다(Table 4). 이 온도는 마그네사이트 유체포유물의 균일화온도(121~250 °C)보다 다소 높은 값을 나타낸다. 생성압력을 파악하기 위해 앞서 계산된 녹니석 지질온도계를 통해 구한 생성온도와 유체포유물 분석으로 계산된 등용선(isochore)을 적용하여 압력을 추정하였다. 그 결과 펄로우광상의 광화작용

Fig. 10. Pressure-temperature diagram showing the ranges of fluid inclusion isochores in the Pailou deposits. The trapping conditions are limited by chlorite geothermometry and fluid inclusion isochores, of which the latter were constructed using the model proposed by Driesner and Heinrich (2007).

은 최대 3.2 kb를 넘지 않은 압력하에서 진행된 것으로 보인다(Fig. 10).

7.2. 펄로우광상 형성기작

원생대 시기에는 백운암이나 Mg가 부화된 초고철질암 내지 고철질암의 풍화로 해양으로 Mg가 공급되었고 증발과정을 거치면서 Mg가 풍부한 염수를 형성하였으며 (Aharon, 1988; Dong *et al.*, 2016; Henjes-Kunst *et al.*, 2014), 대기는 높은 CO₂ 분압을 이루고 있어서 마그네사이트가 정출될 수 있는 환경을 갖추고 있었다(Tu, 1996; Melezhik *et al.*, 2001). 다스차오벨트 일대도 과거 2.5~2.1 Ga 시기에 얕은 호수와 유사한 환경에서 Mg가 부화된 염수가 유입되고 증발되어 탄산염광물의 침전이 일어났고, 이후 침전된 탄산염광물들은 속성작용을 받았다(Chen *et al.*, 2002). Tang *et al.*(2013)에 따르면 다스차오 마그네사이트 광화대 모암인 돌로마이트와 마그네사이트의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 각각 16.4~19.5 ‰과 9.2~16.9 ‰을 나타낸다. 일반적으로 속성작용에 의해 돌로마이트가 마그네사이트로 변질되었다면, $\delta^{18}\text{O}$ 는 약 2 ‰ 가량의 감소를 보이지만, 광화대 일대에서 보다 큰 폭으로 감소한 결과를 고려하면 단순한 속성작용에 의해 마그네사이트가 형성된 것은 아닌 것으로 해석된다(Veizer *et al.*, 1999).

한편, 다스차오 광화대에서 마그네사이트가 발달한 라호에층군은 상부 녹색편암상에 해당하는 광역변성작용을

받은 것으로 나타났으며(Li *et al.*, 1998), 최대 변성작용 시기는 고기원생대(1.8-1.6 Ga)에 해당하는 것으로 알려졌다(Lu *et al.*, 2008; Misch *et al.*, 2018). 이 과정에서 변성유체에 의해 마그네사이트 광체가 점차 부화되며 동위원소 조성도 감소한 것으로 보인다. 이러한 속성작용 및 광역변성작용 외에도 다스차오 마그네사이트 광화대에 발달한 열수변질작용도 $\delta^{18}\text{O}$ 동위원소조성의 감소에 영향을 끼쳤을 것으로 보인다. 이와 관련하여 마그네사이트와 함께 산출되는 활석, 녹니석, 그리고 인회석과 같은 변질광물들의 경우 정확한 생성시기는 알려지지 않았으나 중생대 얀샤니안(Yanshanian) 조산운동에 수반된 광범위한 화성작용과 깊은 관련이 있는 것으로 알려졌다(Chen and Wang, 1994; Hart *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2003; Jiang *et al.*, 2005; Misch *et al.*, 2018).

전체적으로, 펠로우광상의 마그네사이트 광체의 발달은 Mg가 부화된 돌로마이트의 변질에 따른 마그네사이트 생성과 이후 광역변성작용과 열수변질작용을 거치면서 점차 부화되는 과정을 거친 것으로 해석된다.

7.3. 북한 단천 마그네사이트광상과의 비교

북한 대흥광상을 중심으로 한 단천지역 마그네사이트 광화작용의 특징에 관하여서는 그동안 광체 산상 및 구성광물 등 제한된 사항만 알려져 있었으나(Kim *et al.*, 1988; Choi *et al.*, 2011; Jeon *et al.*, 2011), 최근 Lee *et*

al.(2021)이 대흥 및 룡양광상 등 단천지역 마그네사이트 광화작용에 관한 연구에서 암석기재학, 광물화학, 전암화학, 유체포유물 및 탄소-산소 안정동위원소 연구 결과를 발표한 바 있다. 이를 바탕으로 다스차오 마그네사이트 광화대에 대한 기존 연구자료와 본 연구에서 획득한 자료를 바탕으로 북한 단천지역 마그네사이트 광상의 생성 환경 및 특징과 비교하였다(Table 6).

북한 단천 및 중국 다스차오 지역 마그네사이트 광화대는 모두 차오랴오지벨트에 속하며 유사한 지질 및 지구조환경에 놓여있다. 두 광화대는 모두 돌로마이트를 모암으로 마그네사이트 광상이 발달하며, 마그네사이트 광석내에 잔류된 형태로 돌로마이트가 관찰되어 돌로마이트가 변질작용을 받아 마그네사이트가 생성되었음을 보여준다. 또한 공통적으로 광상과 인접한 지역에 중생대 화성암체의 관입이 두드러진다. 아울러 마그네사이트 광석에서 녹니석, 활석, 그리고 인회석 등의 변질광물이 관찰되며, 이들은 마그네사이트를 절단하거나 결정 사이를 충전하며 발달한다(Lee *et al.*, 2021). 다만 단천지구와 달리 다스차오 광화대에서는 마그네사이트 뿐 만 아니라 활석광상도 두드러지게 발달하는 특징을 보인다(Chen *et al.*, 2003; Misch *et al.*, 2018).

기존 연구에 따르면, 산소-탄소 동위원소의 경우 다스차오 돌로마이트와 마그네사이트의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 각각 16.4~19.5‰과 9.2~16.9 ‰로 나타나며, $\delta^{13}\text{C}$ 는 0.6~1.4 ‰ 그

Table 6. Comparison of deposit characteristics between the Dashiqiao and Dancheon magnesite deposits

	Dashiqiao (China)	Dancheon (North Korea)
Host rock	• dolostone	• dolostone
Formation	• Dashiqiao Formation (Proterozoic)	• Bukdaecheon Series (Proterozoic)
Orebody	• white, gray, pinkish color • sparry texture • residual dolomite • talc-chlorite vein • dolomite, calcite vein	• pinkish, white, gray color • sparry texture • residual dolomite • talc-chlorite vein
Minerals	• major magnesite, talc • minor chlorite, apatite, quartz	• major magnesite • minor talc, chlorite, apatite, quartz, tremolite
Chlorite composition	• clinocllore, penninite, talc-chlorite	• mostly clinocllore
Homogenization temperature and salinity	• 121~250 °C (avg. 175 °C) • 1.7~22.4 wt% NaCl (avg. 10.2 wt% NaCl)	• 112~272 °C (avg. 187 °C) • 0.5~34.1 wt% NaCl (avg. 14.5 wt% NaCl)
Chlorite geothermometer	• 137~293 °C (avg. 228 °C)	• 159~307 °C (avg. 212 °C)
Pressure	• < 3.16 kb	• < 3.62 kb
Oxygen-carbon isotope	• $\delta^{18}\text{O}$: magnesite (9.2~16.9 ‰), dolomite (16.4~19.5 ‰) • $\delta^{13}\text{C}$: magnesite (-1.3~0.9 ‰), dolomitic marble (0.6~1.4 ‰)	• $\delta^{18}\text{O}$: magnesite (8.7~11.4 ‰), dolomite (19.0~23.0 ‰) • $\delta^{13}\text{C}$: magnesite (0.1~0.8 ‰), dolomite (-0.95~1.0 ‰)
References	This study, Tang <i>et al.</i> (2013)	Lee <i>et al.</i> (2021)

리고 $-2.7 \sim -0.9$ ‰을 보인다(Tang *et al.*, 2013). 북한 단천 지역의 경우 돌로마이트와 마그네사이트의 $\delta^{18}\text{O}$ 는 각각 $19.0 \sim 23.0$ ‰과 $8.7 \sim 11.4$ ‰이며, $\delta^{13}\text{C}$ 는 $-1.0 \sim -1.0$ ‰ 그리고 $0.1 \sim 0.8$ ‰이다(Lee *et al.*, 2021). 단천지역 돌로마이트의 산소동위원소조성이 높게 나타나지만 마그네사이트와의 관계나 탄소동위원소 조성 등에서 비슷한 양상을 나타낸다. 북한 단천지역 유체포유물의 균일화온도 및 염농도는 $112 \sim 272$ °C (avg. 187 °C)와 $0.5 \sim 34.1$ wt% NaCl equiv. (avg. 14.5 wt% NaCl equiv.)의 범위를 보여 $121 \sim 250$ °C (avg. 175 °C)와 $1.7 \sim 22.4$ wt% NaCl equiv. (avg. 10.2 wt% NaCl equiv.)의 범위를 보이는 중국 펠로우 광상과 유사하거나 약간 높다. 녹니석 지온계를 활용한 온도를 보면, 펠로우 광상은 $137 \sim 293$ °C (avg. 228 °C) 그리고 북한 단천 마그네사이트 광상은 $159 \sim 309$ °C (avg. 212 °C)로서 전체적으로 상호 유사한 값을 보인다.

이상과 같이 중국 펠로우광상을 비롯한 다스차오 광화대를 북한 단천지역 마그네사이트 광상과 비교한 결과 같은 지구조대에 속하는 이들은 상호 유사한 생성과정을 거치며 발달된 것으로 보이는데, 원생대 해양환경에서 퇴적된 돌로마이트의 변질에 따른 마그네사이트 생성과 이후 광역변성 및 열수변질작용을 거치면서 고품위 마그네사이트 광상이 형성된 것으로 보인다. 그러나 펠로우광상에서는 상대적으로 많은 양의 활석이 산출되는 것으로 보아 중국 다스차오 광화대에서는 후기 화성작용과 관련된 열수작용의 영향이 상대적으로 컸을 것으로 보인다.

8. 결 언

중국 펠로우 마그네사이트 광상은 차오랴오지벨트의 다스차오층의 돌로마이트를 모암으로 발달하며 산점상의 돌로마이트가 마그네사이트 광체 내에 포획된 형태로 산출되고 있어서 모암인 돌로마이트가 변질교대작용을 받아 마그네사이트가 형성되었음을 보여준다. 녹니석, 활석 및 인회석은 기존 마그네사이트를 절단하거나 교대하여 상대적으로 후기에 형성된 것으로 보이며, 또한 후기 맥상의 돌로마이트 및 방해석맥이 기존 돌로마이트와 마그네사이트를 교대하며 산출된다. 유체포유물의 균일화온도는 $121 \sim 250$ °C, 그리고 염농도는 $1.7 \sim 22.4$ wt% NaCl equiv.로서 전세계 주요 마그네사이트 광상의 생성조건과 유사하며, 녹니석 지온계를 이용한 열수변질작용의 온도는 $137 \sim 293$ °C를 나타낸다. 광체의 산상 및 생성환경을 고려할 때 연구지역 마그네사이트 광체는 돌로마이트의 변질에 따른 마그네사이트 생성과 이후 광역변성작용과 열수변질작용을 거치면서 부화과정을 거친 것으로 보인다. 또한 후기 열수의 유입은 녹니석 및 인회석과 더불어

어 마그네사이트를 교대하는 활석광화작용을 발달시킨 것으로 보인다. 광석광물조합, 광물화학, 지온계 및 유체포유물, 그리고 기존 안정동위원소연구 결과를 비교 해석한 결과 펠로우광상을 포함하는 다스차오 광화대와 북한 단천 마그네사이트광상은 지질광상학적으로 유사한 생성환경 및 변화과정을 거친 것으로 해석된다.

사 사

이 연구는 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 국가과학기술연구회(No.CRC-15-06-KIGAM)와 한국연구재단(No.2019R1A2C1085334)의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 논문을 세심하게 검토하고 유익한 비평을 주신 심사위원들께 감사드린다.

References

- Aharon, P. (1988) A stable-isotope study of magnesites from the rum jungle uranium field, Australia - implications for the origin of strata-bound massive magnesites. *Chem. Geol.*, v.69, p.127-145. doi: 10.1016/0009-2541(88)90164-7
- Cathelineau, M. and Nieva, D. (1985) A chlorite solid solution geothermometer the Los Azufres (Mexico) geothermal system. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v.91, p.235-244. doi: 10.1007/BF00413350
- Chen, C., Lu, A., Cai, K. and Zhai, Y. (2002) Sedimentary characteristics of Mg-rich carbonate formations and minerogenic fluids of magnesite and talc occurrences in early Proterozoic in eastern Liaoning Province, China. *Sci. China*, v.45, p.84-92. doi: 10.1007/BF02932210
- Chen, C.X., Jiang, S.Y., Cai, K.Q. and Ma, B. (2003) Metallogenic conditions of magnesite and talc deposits in early Proterozoic Mg-rich carbonate formations, eastern Liaoning province. *Mineral Deposits*, v.22, p.166-176.
- Chen, R. and Wang, Y. (1994) The evolution and metallogenesis of early Proterozoic palaeorift in eastern Liaoning and southern Jilin provinces. In: *Precambrian Geology and Tectonics in China*. Seismological Publishing House, Beijing, p.186-200.
- Choi, B.S., Gang, M.S., Shin, Y.H., Kim, S.G., Ryu, D.M., Joo, J.G., Ri, J.C., Park, Y.W. and Shin, C.J. (2011) A series of Joseon geology, 8. Industrial publishing house, Pyongyang.
- Dong, A., Zhu, X.K., Li, S.Z., Kendall, B., Wang, Y. and Gao, Z. (2016) Genesis of a giant Paleoproterozoic strata-bound magnesite deposit: constraints from Mg isotopes. *Precam. Res.*, v.281, p.673-683. doi: 10.1016/j.precamres.2016.06.020
- Driesner, T. and Heinrich, C.A. (2007) The system $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$. Part I: Correlation formulae for phase relations in temperature-pressure-composition space from 0 to 1000 °C, 0 to 5000 bar, and 0 to 1 XNaCl. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v.71, p.4880-4901. doi: 10.1016/j.gca.2006.01.033
- Fernandez-Nieto, C., Torres-Ruiz, J., Subias Perez, I., Fanlo

- Gonzalez, I. and Gonzalez Lopez, J.M. (2003) Genesis of Mg-Fe carbonates from the Sierra Menara magnesite-siderite deposits, Northeast Spain: evidence from fluid inclusions, trace elements, rare earth elements, and stable isotope data. *Econ. Geol.*, v.98, p.1413-1426. doi: 10.2113/gsecongeo.98.7.1413
- Hart, C.J., Goldfarb, R.J., Qiu, Y., Snee, L., Miller, L.D. and Miller, M.L. (2002) Gold deposits of the northern margin of the North China Craton: multiple late Paleozoic-Mesozoic mineralizing events. *Miner. Deposita*, v.37, p.326-351. doi: 10.1007/s00126-001-0239-2
- Henjes-Kunst, F., Prochaska, W., Niedermayr, A., Sullivan, N. and Baxter, E. (2014) Sm-Nd dating of hydrothermal carbonate formation: an example from the Breitenau magnesite deposit (Styria, Austria). *Chem. Geol.*, v.387, p.184-201. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.07.025
- Hey, M.H. (1954) A new review of the chlorites. *Mineral. Mag.*, v.30, p.277-292. doi: 10.1180/minmag.1954.030.224.01
- Jeon, G.B., Park, H.W., Kim, J.N., Yang, J.H., Ri, S.R., Jo, I.W., Gang, I.S., Kim, Y.N., Ri, Y.S., Kim, G.C., Rim, D.S., Park, W., Han, R.Y., Ri, W.R., Kim, Y.M., Kim, J.R., Jo, I.W., Park, S.C., Kim, S.S., Choi, W.J., Ryu, J.M., Ri, M.I., Oh, H.M., Rim, G.N., Park, C.S., Kim, J.H., Oh, I.T., Kim, M.G., Yoon, D.S., Yang, J.H., Gang, H.G. and Kim, H. (2011) *Geology of Joseon*. Sci. Tech. Publish. House, Pyongyang, 442p.
- Jiang, S., Chen, C., Chen, J., Jiang, J., Dai, B. and Ni, P. (2004) Geochemistry and genetic model for the giant magnesite deposits in eastern Liaoning Province, China. *Acta Petrol. Sinica*, v.20, p.765-772.
- Jiang, Y.H., Jiang, S.Y., Zhao, K.D., Ni, P., Ling, H.F. and Liu, D.Y. (2005) SHRIMP U-Pb zircon dating for lamprophyre from Liaodong Peninsula: Constraints on the initial time of Mesozoic lithosphere thinning beneath eastern China. *Chin. Sci. Bull.*, v.50, p.2612-2620. doi: 10.1360/982005-373
- KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 2021, Mineral commodity supply and demand. 264p.
- Kiliass, S.P., Pozo, M., Bustillo, M., Stamatakis, M.G. and Calvo, J.P. (2006) Origin of the rubian carbonate-hosted magnesite deposit, Galicia, NW Spain: mineralogical, REE, fluid inclusion and isotope evidence. *Mineral. Deposita*, v.41, p.713-733. doi: 10.1007/s00126-006-0075-5
- Kim, Y.M., Han, B.S., Park, I.S., Um, H.Y., Paik, R.J., Jeong, S.I., Ri, M.C., Joo, Y.J., Kim, M.O., Oh, H.S., Koh, D.S., Jeon, G.B., Kim, J.G., Ri, S.R., Gang, S.Y., Ri, W.R., Han, R.Y., Yang, S.B., Kim, R.H., Kim, Y.N., Gang, H.G., Kim, G.R., Kim, C.W., Han, B.J., Ri, D., Seo, W.S., Kim, Y.H., Choi, W.J., Shin, Y.W., Jang, J.S., Hyun, Y.S., Han, C.S., Kim, J.H., Kim, H.S., Kim, J.R., Jo, I.W., Jeon, J.A., Kim, H.O., Kim, R.S., Hong, T.R., Park, I.S., Oh, S.A., Yoon, B.J. and Kim, S.I. (1988) *Geology and Underground Resources*. Edu. Book Publish. House, Pyongyang, 667p.
- Kodera, P. and Radvanec, M. (2002) Comparative mineralogical and fluid inclusion study of the Hnust'a-Mutnik talc-magnesite and Mikova-Jedl'ovec magnesite deposit (Western Carpathians, Slovakia). *Boletim Paranaense de Geociencias*, v.50, p.131-150. doi: 10.5380/GEO.V50I0.4165
- Lee G.J., Shin, D.B., Lee, S.Y., Koh, S.M., Lee, B.H., Yu, B.U., Yoo, B.C. (2021) Ore genesis and tectonic implication of the Daheung-Ryongyang magnesite deposits in the East Jiao-Liao-Ji Belt, North Korea. *Lithos*, 400-401C, 106402. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106402.
- Li, S., Yang, Z. and Liu, Y. (1998) Stratification of metamorphic belts and its genesis in the Liaohe Group. *Chin. Sci. Bull.*, v.43, p.430-434. doi: 10.1007/bf02883726
- Li, S.Z., Zhao, G.C., Sun, M., Han, Z.Z., Luo, Y., Hao, D.F. and Xia, X.P. (2006) Are the south and north Liaohe groups of the north China craton different exotic terranes? Nd isotope constraints. *Gondwana Res.*, v.9, p.198-208. doi: 10.1016/j.gr.2005.06.011
- Liu, J., Liu, Y., Chen, H., Sha, D. and Wang, H. (1997) The inner zone of the Liaoji Paleorift: its early structural styles and structural evolution. *J. Asian Earth Sci.*, v.15, p.19-31. doi: 10.1016/S0743-9547(96)00077-3
- Lu, S., Zhao, G., Wang, H. and Hao, G. (2008) Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precam. Res.*, v.160, p.77-93. doi: 10.1016/j.precamres.2007.04.017
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G.C., Ayers, J.C., Li, S.Z., Xia, X.P. and Zhang, J.H. (2008) A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Group: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precam. Res.*, v.163, p.279-306. doi: 10.1016/j.precamres.2008.01.002
- Luo, Y., Sun, M., Zhao, G.C., Li, S.Z., Xu, P., Ye, K. and Xia, X.P. (2004) LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt. *Precam. Res.*, v.134, p.349-371. doi: 10.1016/j.precamres.2004.07.002
- Melezhik, V.A., Fallick, A.E., Medvedev, P.V. and Makarikhin, V.V. (2001) Paleoproterozoic magnesite: lithological and isotopic evidence for playa/sabkha environments. *Sedimentology*, v.48, p.379-397. doi: 10.1046/j.1365-3091.2001.00369.x
- Misch, D., Pluch, H., Mali, H., Ebner, F. and Huang, H. (2018) Genesis of giant Early Proterozoic magnesite and related talc deposits in the Mafeng area, Liaoning Province, NE China. *J. Asian Earth Sci.*, v.160, p.1-12. doi: 10.1016/j.jseaes.2018.04.005
- Roedder, E. (1984) Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*, v.12, Mineral. Soc. America, 646p.
- Tam, P.Y., Zhao, G.C., Zhou, X., Sun, M., Guo, J., Li, S., Yin, C., Wu, M. and He, Y. (2012) Metamorphic P-T path and implications of highpressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Gondwana Res.*, v.22, p.104-117. doi: 10.1016/j.gr.2011.09.006
- Tang, H.S., Chen, Y.J., Santosh, M., Zhong, H., Wu, G. and Lai, Y. (2013) C-O isotope geochemistry of the Dashiqiao magnesite belt, North China Craton: implications for the great oxidation event and ore genesis. *Geol. J.*, v.48, p.467-483. doi: 10.1002/gj.2486
- The Ministry of Land and Resources of China (2001) Reporting the land and resources of China in 2000. Geological Publishing House: Beijing (in Chinese).
- Tu, G. (1996) The discussion on some CO₂ problems. *Earth Sci.*

- Front., v.3, p.53-62.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebner, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawallek, F., Podlaha, O.G. and Strauss, H. (1999) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, v.161, p.59-88. doi: 10.1016/S0009-2541(99)00081-9
- Velasco, F., Pesquera, A., Arce, R. and Olmedo, F. (1987) A contribution to the ore genesis of the magnesite deposit of Eugui, Navarra (Spain). *Mineral. Deposita*, v.22, p.33-41. doi: 10.1007/BF00204241
- Wan, Y.S., Song, B., Liu, D.Y., Wilde, S.A., Wu, J.S., Shi, Y.R., Yin, X.Y. and Zhou, H.Y. (2006) SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: evidence for a major Late Palaeoproterozoic tectono-thermal event. *Precam. Res.*, v.149, p.249-271. doi: 10.1016/j.precamres.2006.06.006
- Yang, J.H., Wu, F.Y. and Wilde, S.A. (2003) A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: an association with lithospheric thinning. *Ore Geol. Rev.*, v.23, p.125-152. doi: 10.1016/S0169-1368(03)00033-7
- Zadeh, A.M.A., Ebner, F. and Jiang, S.Y. (2015) Mineralogical, geochemical, fluid inclusion and isotope study of Hohentauern/Sunk sparry magnesite deposit (Eastern Alps/Austria): implications for a metasomatic genetic model. *Mineral. Petrol.*, v.109, p.555-575. doi: 10.1007/s00710-015-0386-2
- Zhang, Q.S. and Yang, Z.S. (1988) Early crust and mineral deposits of Liaodong Peninsula, China. Geological Publishing House, Beijing.