

국내 백운석 광석의 산상과 광물학적 특성

Occurrence and Mineralogical Characteristics of Dolomite Ores from South Korea

황진연(Jinyeon Hwang)^{1*} · 최진범(Jin Beom Choi)² · 정기영(Gi Young Jeong)³ · 오지호(Jiho Oh)¹ · 최영훈(Younghun Choi)¹ · 이진현(Jinhyun Lee)¹

¹부산대학교 지질환경과학과

(Department of Geologic Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)

²경상대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Gyeongsan National University, Jinju 660-701, Korea)

³안동대학교 지구환경과학과

(Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong 760-749, Korea)

요약 : 국내 주요 백운석 광산에서 산출되는 백운석 광석과 수반광물에 대하여 X-선회절분석, 박편관찰, 주사전자현미경 관찰 등을 통하여 광물학적 및 조직 특성을 분석하고, 이들의 산출상태와 성인을 검토하였다. 연구 결과, 백운석 광석은 담회색에서 암회색을 띠며 입자도 세립에서 조립까지 다양하였으나, 주로 거의 순수한 돌로마이트로 이루어졌다. 일부 백운암에서는 소량의 방해석, 석영, 운모가 함유되었다. 세맥, 암맥, 변질부 등에서 국지적으로 방해석, 석영, 일라이트, 장석, 고령토광물, 녹니석 등이 산출되며, 일부 광산 변질부에서 세피올라이트와 규회석이 확인되었다. 그러나 이번 조사에서 온석면과 투각섬석과 같은 석면광물은 확인되지 않았다. 광산내 적갈색 및 황색을 띠는 점토물질들은 주로 일라이트로 구성되며, 카올린광물과 스멕타이트가 수반되기도 한다. 이들은 암맥관입과 관련된 부분적 열수변질과 이후의 풍화작용에 의해 형성된 것으로 보인다. 백운암층의 구성광물, 조직, 산출상태와 기존의 연구결과로 볼 때, 백운석 광상은 선캄브리아기와 고생대의 얇은 바다에서 퇴적된 석회질 퇴적물이 속성작용에 의해 백운석화 작용을 받아 형성된 것으로 보인다.

주요어 : 백운석, 백운암, 산출상태, 성인, 석면

ABSTRACT : The occurrence, mineralogical characteristics, and origin of the dolomite ores were investigated from major dolomite mines in South Korea. Mineralogical and textural properties of the ores and associated minerals were analyzed using X-ray diffraction, thin section petrography, and scanning electron microscopy. Dolomite ores were light to dark gray in color and mainly composed of dolomite in varying particle size with minor amounts of calcite, quartz and micas. Calcite, quartz, illite, feldspar, kaolin minerals, and chlorite occurred in local veins, dikes and alteration zones. Sepiolite and wollastonite occurred in the altered part of some mine. Asbestos minerals such as chrysotile and tremolite, however, were not identified in the present study. Reddish brown to yellow clay materials were mainly composed of illite, occasionally associated with kaolin minerals and smectite. These clay minerals

*Corresponding author: +82-51-510-2254, E-mail: hwangjy@pusan.ac.kr

might be a product of the local hydrothermal alteration related to the dyke intrusion and subsequent weathering. As well indicated in the previous studies, mineral composition, texture, and occurrence of the dolostone beds suggest their formation through the diagenesis of carbonate sediments deposited in the shallow sea during the Precambrian to Paleozoic period.

Key words : dolomite, dolostone, occurrence, genesis, asbestos

서 언

우리나라의 주요 비금속 광물자원으로서 석회석과 함께 백운석(dolomite)이 오래 전부터 대량으로 채굴되어 오고 있다. 백운석을 주로 함유하는 암석을 백운암, 고회암이라 하며, 영어로는 dolostone, dolomite, dolomitite 등으로 불린다. 백운석(dolomite)은 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 의 화학조성을 가지는 탄산염광물의 일종으로, 내화재, 유리, 제강, 비료, 골재, 충전재 등으로 많은 용도로 사용되고 있다.

국내 백운석 광산은 1988년도 대한광업진흥공사의 자료에서는 41개의 광산이 등록된 것으로 나타났다. 이 중에는 실제로 채굴이 이루어지지 않고 경제성이 없는 광산도 포함되어 있다. 최근 2011년도 한국광물공사의 광물자원매장량 현황 자료에서는 전국에 백운석 광산이 81개로 기술되어 있으며, 이들에 대한 품위, 맥폭, 매장량, 생산량 등의 내용이 포함되어 있다. 그러나 이들 중 대부분은 수년간 생산실적이 없는 광산들이며, 이전 3년간 생산을 계속한 광산은 16개 정도에 지나지 않는다. 2011년에 10만 톤 이상을 생산한 광산은 9개 정도이고, 나머지는 소규모로 채굴하고 있다. 이처럼 등록된 광산의 수에 비해서 실제적으로 광석을 다량 생산하는 광산은 많지 않다. 이번 연구에서는 실제적으로 백운석을 다량 생산하고 있는 대표적인 주요 광산 9개를 대상으로 조사하였다. 이번에 조사한 백운석 광산은 삼보광업, KCC자원개발, 태봉광업, 대성MDI, (주)성신, 한성, 두원산업, 서암 및 제일산업 등 총 9개 광산이다.

이러한 국내 주요 백운석 광산을 대상으로 하여, 광산에 산출하는 광물들의 산상과 광물학적 특성 등을 조사하고, 그 생성과정에 대해서도 고찰해 보았다. 특히 최근 석면문제가 크게 대두되면서 자연발생석면에 대한 관심도 증가되고 있다. 최근에 제정된 환경부고시 제2012-72호(2012.4.27.) 중의 ‘석면안전관리법’ 제10조 제2항에는 인체에 미치는 위해성 등이 우려되는 광물질을 “석면을 함유할 가능성이 있는 물질”로 지정·고시하고,

석면을 함유할 가능성이 있는 물질의 대상물질로 ‘활석, 질석, 사문석, 해포석’ 등 4가지 광물을 지정하고 있다. 여기에 석면을 함유할 가능성이 있는 물질로 백운석이 포함되지는 않았지만, 그 전에 이에 대해 일부 논란이 된 적이 있었다. 따라서 이러한 측면에서 백운석 광산에 석면광물의 수반 가능성에 대해서도 검토해 보았다.

연구방법

주요 백운석 광산을 대상으로 현장 지질조사를 실시하고, 광산 채굴장에 나타나는 광석, 암석, 암맥, 세맥, 점토 등의 많은 시료를 채취하였다. 채취한 시료를 건조시킨 후 분쇄하여 우선적으로 X-선 회절분석을 행하여 구성광물과 광물조합을 검토하였다. X-선회절분석은 Rigaku사의 Geigerflex 2013 기기를 사용하여, $\text{CuK}\alpha$ 선과 Ni 필터에 의한 X-선으로 전압 35 KV, 전류 20 mA, 주사속도 $2^\circ 2\theta/\text{min}$, 시정수 1 sec, 슬릿 $1^\circ \sim 0.3 \text{ mm} \sim 1^\circ$ 의 조건으로 측정하였다. 그리고 점토광물의 조성을 자세히 검토하기 위하여 이를 침강법으로 $2 \mu\text{m}$ 이하의 점토분으로 분리하여, 정방위시편을 만들어 에칠렌글리콜 처리 및 가열처리 등을 통하여 X-선회절분석을 행하였다.

광석 및 암석 등의 광물 조직과 형태를 관찰하기 위하여 편광현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다. 주사전자현미경(SEM)은 한국기초과학지원연구원 부산센터의 Hitachi사 모델 S4800 FE-SEM을 사용하였고, 가속전압 15~20 KV, 10~15 mA의 측정조건으로 하였으며, 에너지 분산분광장치(EDS)를 이용하여 정성분석을 행하였다.

연구결과

백운석 광산의 지질과 광석의 품위

국내 백운석 광산은 충북 및 강원지역에 가장 많이 밀집되어 있고, 그 외에 충남, 경기, 전북, 전

Table 1. The geologic formation, average dignity and scale of dolomite ore for major dolomite mines

Mine	Geologic formation	Average dignity of ore (wt. %)			Scale of ore body	
		CaO	MgO	SiO ₂	width (m)	extent (m)
Sambo	Paleozoic, Yeonghung F.	30.4	20.7	1.5	10~30	700~800
KCC	Paleozoic, Hungweolri F.	30.7	21.8	< 0.1	200~300	-
Taebong	Paleozoic, Yeonghung F.	30.6	20.6	1.1	250~900	1,500
Daesung	Paleozoic, Yeonghung F.	30.6	20.7	0.8	1,000	3,000
Seongshin	Age unknown, Dolomitic limestone F.	30.9	21.0	0.6	30~40	> 500
Hansung	Paleozoic, Hungweolri F.	30.3	21.2	0.6	350~400	1,800
Jaeil	Precambrian, Dolomitic limestone F.	37.8	13.0	7.0	400	1,000
Doweon	Paleozoic, Great limestone F.	31.0	20.9	0.9	-	500
Seoam	Paleozoic, Poongchon limestone F.	30.9	22.3	-	120~180	600

남, 경북 등에서 일부 분포하고 있다(대한광업진흥공사, 1988; 한국광물자원공사, 2011). 이러한 광산의 분포는 백운석의 모암인 선캄브리아기와 고생대의 지층의 분포와 일치하고 있다. 백운석 광상이 배태하는 지층은 주로 선캄브리아기와 고생대의 변성퇴적암과 석회질퇴적암으로 되어 있으나, 세부적으로는 다양한 시대의 각종 암질을 포함하고 있다. 이들의 지층명과 대비되는 지질시대도 그동안의 연구에 의해 다소 달라져 왔다(대한광업진흥공사, 1988; 대한광업진흥공사, 2008; 한국광물자원공사, 2009). 백운석 광상이 배태하는 지층으로 오래된 지층으로는 선캄브리아기 변성퇴적암류가 있으며 여기에 계명산층과 같은 지층이 포함된다. 그리고 고생대 초기의 대석회암층에 해당되는 지층에 다수 배태되고 있다. 영월지구에서 고생대 캄브리아기의 홍월리층(와곡층)과 오르도비스기의 삼태산층(문곡층), 영홍층 등에서 백운암이 주로 배태되어 있다. 그 외의 다른 지층에서도 드물게 백운석 광상이 발달되는 경우도 있으며, 어떤 경우에는 화강암 및 화강편마암에 포획체 형태로 나타나기도 한다. 그리고 석회암의 광체에 부분적으로 포함되어 산출되는 경우도 있다.

이번에 조사한 9개 광산의 모암의 지질시대, 채굴지층, 품위, 및 매장량 등을 표 1에 정리하였다. 현재 채굴하는 지층은 일부 선캄브리아기도 포함되지만 대부분 고생대 지층에 해당되고 있다. 백운석 광석의 평균품위는 CaO가 모두 30% 이상이며, MgO는 한 광산만 제외하면 모두 20% 이상을 나타내고 규산의 함량은 극히 적다. 이러한 함량

은 백운석의 화학성분과 거의 일치하는 것으로 대체로 품위가 높은 것으로 볼 수 있다. 광체의 규모에서도 광산에 따라 다소 차이가 있으나 비교적 두꺼운 폭과 연장을 가진다.

백운석 광산별 수반광물과 산출상태

삼보광업

삼보광산은 이 광산은 충북 단양 매포읍 하시리에 위치하며 등록번호가 제54012호 (영춘 118호)인 백운석 광산이다. 이 광산지역은 영월형 조선누층군에 해당하는 오르도비스기의 문곡층과 영홍층이 주로 분포하고, 그 외에 평안누층군의 만항층에 대비되는 석탄기의 갑산층과 이를 관입한 백악기의 암맥류로 되어 있다. 백운석 광체는 영홍층에 넓게 분포하는 괴상 백운암을 대상으로 하며 주로 노천채굴을 하고 있으나 갱내 채굴도 일부 이루어졌다. 괴상 백운암층에는 층상백운암, 엽리상백운암, 리본암, 석회암 등이 일부 협재되기도 한다. 부분적으로 점토화된 변질부와 세맥 등이 여러 곳에서 나타나며, 폭이 약 40 cm 정도 되는 암록색의 중성암맥도 관찰된다.

이곳의 여러 시료들에 대해 X-선회절분석을 행한 결과, 백운석 광석으로는 거의 순수한 백운석으로만 구성되어 있으며, 일부 방해석과 석영을 소량 포함하는 것도 나타난다. 각 광산에 대한 산상별 광물성분의 분석결과를 표 2에 모두 정리하여 나타냈다. 점토물질을 포함하는 시료에 대해서는 입도분리, 정방위시편 제작, 각종 처리를 포함

Table 2. The mineral composition according to occurrence in major dolomite mines

Mine	Ore	Vein	Alteration part	Dyke
Sambo	Dolomite, calcite, quartz	Dolomite, calcite	Illite, kaolin mineral	Feldspar, chlorite, calcite
KCC	Dolomite, quartz, mica	Dolomite, calcite, illite, quartz, mixed clay mineral	Illite, kaolin mineral, smectite	Illite, kaolin mineral, smectite
Taebong	Dolomite, calcite	Calcite, dolomite	Dolomite	
Daesung	Dolomite, calcite, quartz	Calcite, quartz, illite	Illite, kaolin mineral, quartz, calcite, dolomite	Quartz, feldspar, chlorite, illite
Seongshin	Dolomite, calcite, quartz	Quartz, mica	Quartz, mica, illite	
Hansung	Dolomite, calcite, quartz	Calcite, dolomite	Quartz, calcite, dolomite	Quartz, chlorite, illite, calcite
Jaeil	Dolomite, calcite, mica, chlorite	Quartz, calcite, feldspar, sepiolite, mixed clay mineral	Quartz, calcite, feldspar, wollastonite	
Doweon	Dolomite, calcite, quartz	Calcite, dolomite		
Seoam	Dolomite, calcite, mica	Illite, chlorite	Quartz, illite, feldspar, augite	

하는 X-선회절분석을 통하여 광물을 식별하였다. 그 결과, 백운암 내에 협재된 적갈색 점토에는 일라이트가 다량 함유되고 카올린광물도 수반되었다. 암록색의 암맥에서는 장석과 녹니석이 다량 함유되며, 암맥의 측면부에 평행하게 발달하는 얇은 백색 세맥은 방해석인 것으로 나타났다.

KCC자원개발

KCC자원개발의 영월광산은 강원 영월군 북면 문곡리에 위치하며 등록번호가 제32876호 외 5(영월 47호 외 5)인 백운석 광상으로 대규모로 노천 채광을 하고 있다.

이 광산지역의 지질은 조선누층군에 해당되며 캄브리아기의 홍월리층을 대상으로 백운암을 채굴하고 있다. 홍월리층을 정합으로 덮는 상부층인 삼태산층이 서부에 평행하게 분포하고 있고 홍월리층의 동부에는 더 상부층인 영홍층과 충상단층으로 접하고 나타난다. 홍월리층에는 암회색 세립질 백운암(dark-colored fine-grained dolomite, DFD)과 담회색 조립질 백운암(light-colored coarse-grained dolomite, LCD)이 나타나며, 주로 층의 중앙부에는 LCD가 우세하며 삼태산층과 경계부에

는 DFD가 우세하나 전체적으로 불규칙한 경계를 보인다. 광체의 노두에서는 황색 및 적갈색의 점토질 세맥이 부분적으로 협재되어 나타난다(그림 1). 그리고 작은 백색의 방해석 혹은 돌로마이트의 세맥들이 망상으로 포함된다.

여러 광석, 암석, 세맥, 점토 등을 분석한 결과, 돌로마이트가 다량 함유되며 그 외에 석영과 일라이트 등의 점토광물이 포함된다. 이 광산에 나타나는 황색의 점토시료에 대해서는 X-선회절분석을 수행한 결과를 그림 2에 나타냈다. 무처리에서 15.2, 10.2, 7.2 Å의 회절선이 크게 잘 나타난다. 여기서 7.2 Å의 회절선은 에칠렌글리콜 처리에도 변화가 없으나, 550°C 1시간의 가열처리에서는 회절선이 완전 소실되었다. 이러한 결과로 볼 때 이 광물은 카올린광물에 해당되는 것으로 판단된다. 그리고 15.2 Å의 회절선은 에칠렌글리콜 처리에 16.7 Å으로 팽윤하고 있으며, 가열처리에서 10 Å으로 수축하고 있다. 이것으로 보아 이 광물은 스�멕타이트에 해당되는 것으로 보인다. 무처리에 10.2 Å의 회절선은 에칠렌글리콜과 가열 처리에도 변화가 없는 것으로 보아 일라이트로 볼 수 있다. 즉 이들 점토시료에서는 일라이트, 카올린광

물, 스�멕타이트가 포함되는 것으로 나타났다. 적갈색의 점토세맥에서는 유사한 광물조성을 가지지만 일라이트가 다소 많이 함유되었다.

태봉광업

태봉광업이 운영하는 영월광산은 강원 영월군 한반도면 쌍룡리에 위치하며 등록번호가 제29914호(영월 90호)인 백운석 광장으로 대규모로 노천 채광을 하고 있다.

이 광산지역은 영월형 조선누층군에 해당하는 오르도비스기의 삼태산층(문곡층)과 이를 정합으로 덮고 있는 영흥층이 주로 분포하고, 그 외에 이들을 관입한 암맥류로 구성되어 있다. 영흥층을 채굴 대상으로 하며, 영흥층은 상부 석회암 우세대와 하부 백운암 우세대로 대략적으로 구분된다. 따라서 백운석 광체는 영흥층의 하부에 주로 분포한다. 영흥층의 상부 석회암 우세대에는 암회색의 치밀질 석회암이 주로 나타나고, 하부 백운암 우세대에는 회색 내지 암회색 백운암으로 구성되고 품위가 양호하다. 이곳에 나타나는 백운석 광체는 DFD (dark-colored fine-grained dolomite), LCD (light-colored coarse-grained dolomite), DCD (dark-colored coarse-grained dolomite), LFD (light-colored fine-grained dolomite)의 4개 종류의 백운암에 해당된다. 즉 백운암의 암색이 밝은 색에서부터 암회색에 이르기까지 나타나고 입자의 크기도 세립질에서 조립질에 이르기까지 다양하게 나타난다. 이들 암석들이 교호해서 나타나기도 한다. 이들 암석의 일부에서는 파쇄되어 각력화된 부분도 포함되고, 방해석 혹은 돌로마이트의 세맥들이 망상으로 분포하는 곳도 관찰된다(그림 1). 여기서도 황색 및 적갈색을 띠는 변질부가 나타났다.

이곳의 광석 및 암석 등의 시료들에 대해 X-선 회절분석한 결과, 대부분 시료에서 거의 순수한 돌로마이트로 구성되어 있고, 그 외에 방해석이 소량 포함되어 있다. 이곳 시료에서는 석영과 운모 등이 거의 함유되지 않았다. 협재되는 흑색의 암석도 거의 순수한 돌로마이트로 구성된다. 황색 및 적갈색을 띠는 변질부에서도 주로 돌로마이트가 포함되었다.

대성MDI

대성MDI 단양광산은 충북 단양군 어상천면 석교리에 위치하며 등록번호가 제26331호 외 2(영춘 122호 외 2)인 백운석 광장으로 대규모로 노천

채광하고 있다.

이 광산지역의 지질은 영월형 조선누층군의 삼태산층(문곡층)과 이를 정합으로 덮고 있는 영흥층으로 구성되며, 그 외에 이들을 관입한 암맥들로 구성되어 있다. 이들 암층은 대체적으로 북북서-남남동 방향의 주향을 나타내며 암맥들도 주향에 평행하게 발달하는 경향을 보여준다. 백운석 광체는 영흥층을 채굴 대상으로 하며, 영흥층의 하부 백운암 우세대를 주로 채굴한다. 여기 영흥층은 약 200 m의 층후를 가지며, 습곡에 의하여 반복되어 광산의 전역에 걸쳐 넓은 분포를 보인다. 이곳에 나타나는 구성암석으로는 암회색 백운암, 담회색 백운암, 녹회색 석회질 슬레이트, 회색 및 암회색 판상 석회암, 담회색 괴상석회암 등이다. 이 지층의 하부구간에는 암회색 및 회색 괴상 백운암이 우세하고, 상부구간은 회색석회암과 암회색 백운암이 호층을 이루며 발달된다. 녹회색 석회질 슬레이트는 석회암과 백운암 경계부에 다수 나타난다. 광체의 노두에서는 황색 및 적갈색의 점토 변질부가 세맥상으로 나타난다. 그리고 작은 백색의 방해석 혹은 돌로마이트의 세맥들로 망상으로 포함되고, 일부 석영이 농집된 부분도 관찰된다. 암맥이 풍화되어 황록색과 적갈색으로 변질되어 나타난다(그림 1).

이곳의 광석 및 암석 등의 시료를 분석한 결과, 대부분 시료에서 돌로마이트가 다량 함유되고 있고, 그 외에 방해석, 석영, 일라이트, 카올린 광물, 장석 등이 포함된다. 고품위 광석에는 거의 순수한 돌로마이트로 구성되어 있고, 석회질 암석에는 방해석이 다량 포함된다. 맥상으로 나타나는 황색 및 적갈색의 점토 변질부에는 일라이트 및 카올린 광물 등의 점토광물이 주로 포함된다. 암맥에는 석영, 녹니석, 장석 등의 광물로 구성되며 조직과 암색으로 보아 중성암맥으로 보인다. 일부 경질의 암석에서는 돌로마이트와 함께 다량의 석영이 포함되고 있다.

성신광산

(주)성신 충주광산은 충북 충주시 산척면 명서리에 위치하며 등록번호가 제39446호(제천 107호)인 백운석 광장으로 현재 채굴은 모두 갱내에서 이루어지고 있다.

이 광산지역의 지질은 선캄브리아기의 변성퇴적암인 계명산층과 이를 정합으로 피복하는 시대 미상의 서창리 백운암질석회암층으로 구성되어

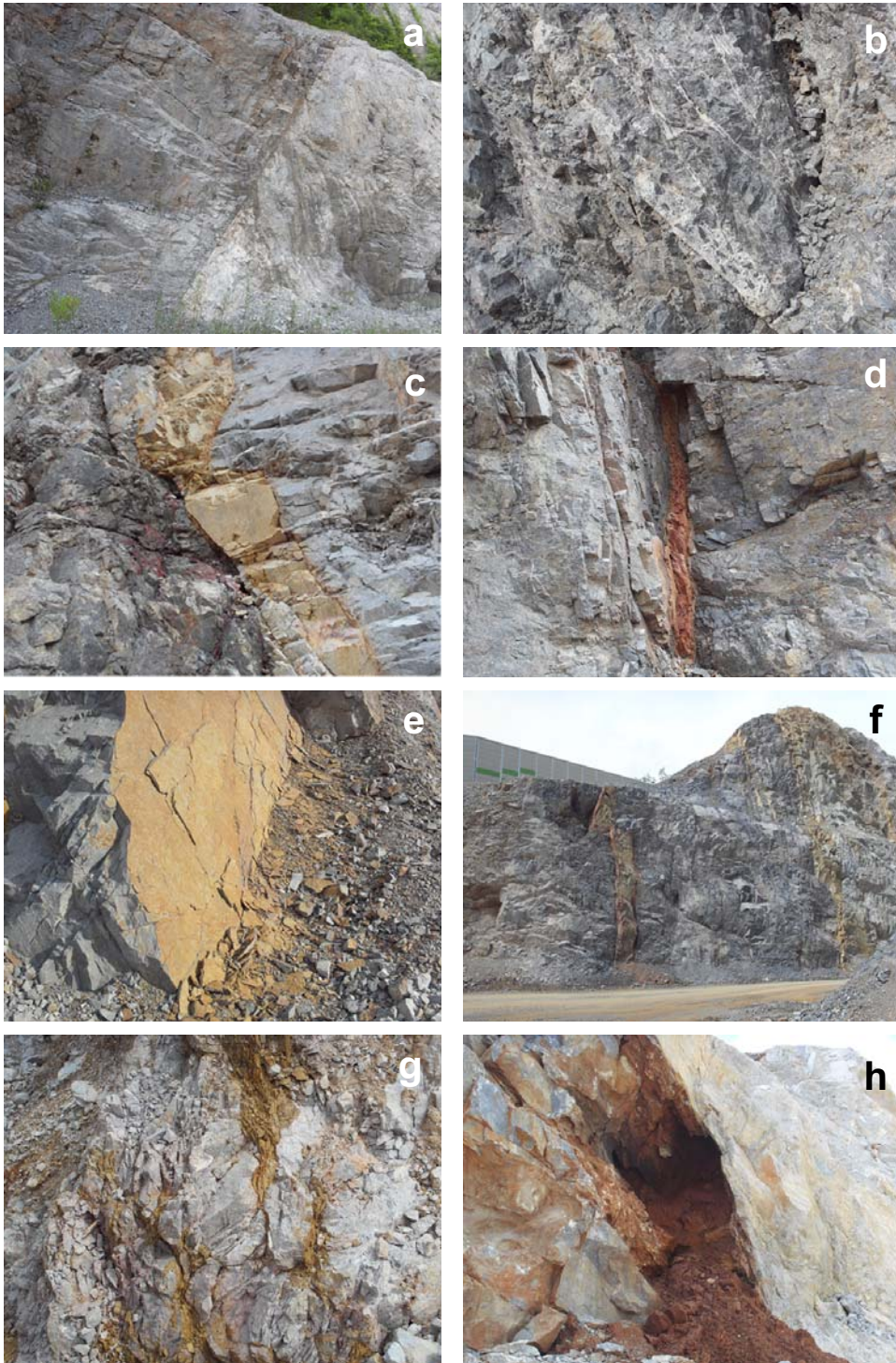


Fig. 1. Outcrops of dolomite mines. (a) Dolostone showing Light gray and dark gray colors, (b) white veins, (c-h) the dikes, veins and clays showing yellow, reddish brown and red colors.

있다. 광상은 서창리 백운암질석회암층에 포함된 백운암과 백운암질석회암을 대상으로 하는 백운석 광상이다. 서창리 백운암질석회암층은 약 300 m의 두께로 발달되어 있으며, 석회질백운암과 백운암질석회암이 서로 불규칙하게 교호하여 발달하고 있다. 여기에 결정질석회암과 박층의 녹니석 편암이 협재된다. 주 광체는 백색 내지 회백색의 당정질 또는 치밀질을 보이는 석회질백운암으로 되어 있다. 백운석 광체의 주변 맥석으로서 운모 편암 등의 변성암 및 변질암이 나타난다. 흑운모, 전기석, 황철석 등의 광물이 부분적으로 농집된 암석이 흔히 관찰된다. 야외의 석회질 암석 중에는 층리를 따라 석영 세맥이 층층이 혼입되어 있어 풍화표면에 요철을 나타내는 특징적인 형태가 나타난다. 이것은 일종의 리본암이라 부르고 있다.

이곳의 시료들에 대해 X-선회절분석한 결과, 고품위 광석에서는 거의 순수한 돌로마이트로만 구성이 되어 있으나, 그 외에는 방해석, 석영, 운모 등이 포함되고 있다. 이들 중에는 주로 방해석을 다량 함유하는 암석들도 있는데, 이들은 석회질 암석에 해당되는 것으로 보인다. 운모편암 등의 맥석에서는 운모와 석영을 포함한다. 풍화표면에 요철을 나타내는 리본암에서 튀어나온 부분에 대해서 분석한 결과, 거의 순수한 석영으로만 구성되는 것으로 나타났다. 구성광물이 석영이기 때문에 풍화에 강하여 볼록이 튀어나온 형태를 유지하는 것으로 판단된다.

한성광산

한성광산은 강원 영월군 북면 마차리에 위치하며 등록번호가 제63585호(영월 025호)인 백운석 광상으로 대규모로 노천 채광을 하고 있다.

이 광산지역의 지질은 조선누층군에 해당되는 오르도비스기의 삼태산층(문곡층)과 캄브리아기의 홍월리층 및 마차리층으로 구성되어 있다. 이 중에서 홍월리층의 백운암을 대상으로 채굴하고 있다. 홍월리층은 회색, 회백색, 암회색을 띠는 세립 내지 조립의 백운암을 주로 하고 있으며, 박층의 암회색 석회암이 협재되기도 한다. 중성암맥도 일부 관찰된다. 방해석 내지 돌로마이트의 세맥들도 망상으로 발달되는 곳이 많으며, 황색 내지 적갈색의 풍화 변질된 부분도 나타난다.

이곳 시료들에 대해 X-선회절분석한 결과, 고품위 광석에서는 거의 순수한 돌로마이트로만 구성이 되어 있으나, 그 외에는 방해석, 석영 등이

포함되고 있다. 흑색의 치밀한 암석은 돌로마이트는 포함되지 않고 다량의 방해석과 소량의 석영이 포함되고 있는데, 이것으로 보아 홍월리층에 협재되는 박층의 암회색 석회암에 해당되는 것으로 보인다. 백색의 세맥에서는 돌로마이트와 방해석이 포함되고 있다. 약간 황색을 띠는 풍화암에서는 석영, 돌로마이트, 방해석 등이 포함된다.

두원산업

두원산업의 수산광산은 충북 제천시 수산면 오티리에 위치하며 등록번호가 제44300호 외 1(황강리 044호 외 1)인 백운석광상으로 노천 채광을 하고 있다.

이 광산지역의 지질은 고생대 오르도비스기의 석회암누층군에 속하는 석회규산염암, 석회암, 백운암으로 구성된다. 이 중에서 백운암을 대상으로 채굴하고 있는 광산으로 현재 잠시 채광을 중단하고 적극적인 채굴을 위해 준비 중에 있다. 노천채굴을 하며 광체의 노두가 잘 발달되어 있으며, 광석은 유백색에서 암회색을 띠는 중립질암으로 당정질 조직을 잘 나타낸다. 광산 노두의 상부에는 층식구조를 보이는 석회질 암층이 나타난다. 이곳에서는 암맥이나 세맥 등의 발달이 잘 관찰되지 않았다.

이곳 시료들에 대해 X-선회절분석한 결과, 돌로마이트가 다량 함유되고 있으며 일부에서 방해석과 석영이 소량 함유된다.

서암광산

서암광산은 충북 단양군 대강면 두음리에 위치하며 등록번호가 제27886호(단양 076호)인 백운석광상으로 노천 채광을 하고 있다. 예전에는 석회석광산으로 미선광산으로 불리웠다.

이 광산지역의 지질은 조선계 양덕통의 장산규암층과 묘봉층을 기저로 하여 석회암누층군의 풍촌석회암층, 천동리층, 두무동층, 그리고 막동석회암층으로 구성된다. 이 중에 풍촌석회암층은 하부에 석회암층과 상부에 백운암층으로 이루어져 있다. 풍촌석회암층의 상부에 분포하는 백운암을 대상으로 채굴하고 있다. 노천채굴을 하며 백운암 광체의 노두가 잘 발달되어 있으며, 광석은 백색 내지 담홍색을 띠며 당정질 조직을 잘 나타낸다. 여기 광체는 풍화작용을 많이 받아 잘 부스러지는 부분이 많으며 그 부분은 설탕과 같은 형태를 나타낸다. 풍화작용에 의해서 용탈되어 나온 철과

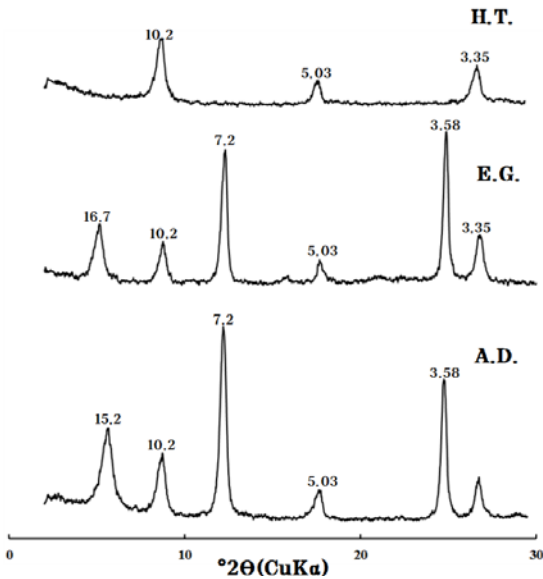


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the clay fraction sample from the KCC mine. A.D.: Air Dried, E.G.: Ethylene glycolated, H.T.: Heated at 550°C for 1 hr.

같은 성분이 암석표면이나 절리면에 침착되어 있어 적갈색 내지 황색 등의 색을 나타낸다. 광산 노두의 최하부에서 암록색을 띠는 변질암석과 세맥이 일부 관찰되었다.

이곳 시료들에 대해 X-선회절분석 결과, 거의 순수한 돌로마이트로 구성된 시료가 다수 나타났다. 암록색의 변질암에서는 휘석이 주로 함유되어 나타났고, 암록색 세맥에서는 일라이트와 녹니석이 포함되었다.

제일산업

제일산업 장수광산은 전북 장수군 장계면 금곡리에 위치하며 등록번호가 제28792호(장계 115호)인 석회석(백운암질석회석)광산으로 현재 채굴은 모두 갱내에서 이루어지고 있다.

이 광산지역의 지질은 선캄브리아기의 흑운모편마암과 편마암 내에 협재되어 나타나는 백운암질석회암과 규질석회암 등으로 구성된 변성퇴적암류로 되어 있고, 이들을 후기에 관입한 주라기 화강암으로 구성된다. 흑운모편마암은 선캄브리아기 소백산 변성암복합체의 남서연장부에 해당된다. 이 암층은 광역적인 화강암화작용에 의하여 대부분 화강암질 편마암화되어 나타나고, 일부 운모편암, 석회암, 규질석회암 등이 부분적으로 협

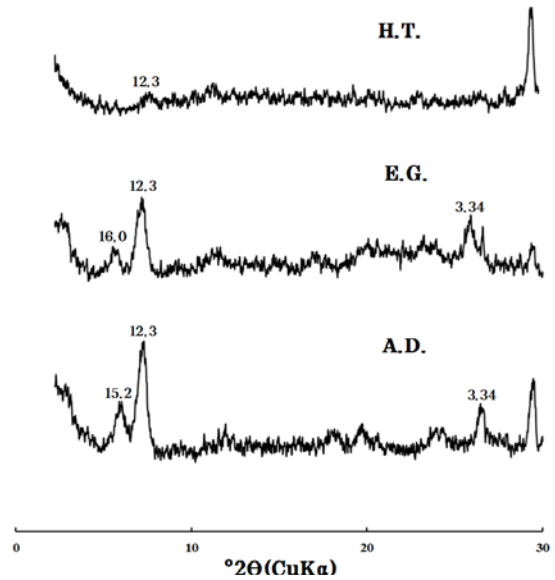


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of clay fraction sample from the Jaeil mine. A.D.: Air Dried, E.G.: Ethylene glycolated, H.T.: Heated at 550°C for 1 hr.

재된다. 주로 채굴하는 광체는 흑운모편마암 내에 협재되어 발달하는 변성퇴적암류 중에서 백운암질 석회암을 대상으로 한다.

이 광산은 전술한 다른 백운석 광산과는 달리 백운석만을 대상으로 하지 않고 석회암을 포함하는 석회석 광산으로 채굴하고 있다. 여기에 협재되는 규질 석회암에는 석영으로 구성되는 규암이 교호로 협재되고 있다. 이러한 암석의 성분 혼입에 의해 이 광산의 광석에는 SiO₂ 함량이 다소 높게 나타난다(표 1). 이 광산은 현재 갱내채굴을 하고 있다. 갱내의 광체와 그 주변 암체는 모두 괴상으로 나타나고 점이적으로 변하여 경계부가 대체로 불분명하다. 화강암의 관입에 의한 작용으로 생각되는 전기석이 부분적으로 농집되어 있는 곳이 다수 관찰된다. 그리고 흑운모 등의 유색광물이 여러 형태로 농집되어 있는 부분도 나타나고, 점토질 세맥도 관찰된다.

이곳의 시료들에 대해 X-선회절분석한 결과, 돌로마이트가 대부분 방해석을 포함하는 것으로 나타났다. 이것은 역시 이곳의 모암이 백운암질석회암이기 때문인 것으로 생각된다. 돌로마이트가 포함되지 않고 방해석이 소량 포함되는 맥석에서는 석영, 장석, 운모광물, 카올린광물, 녹니석 등이 포함된다. 이들은 화강암화작용을 받은 변성암

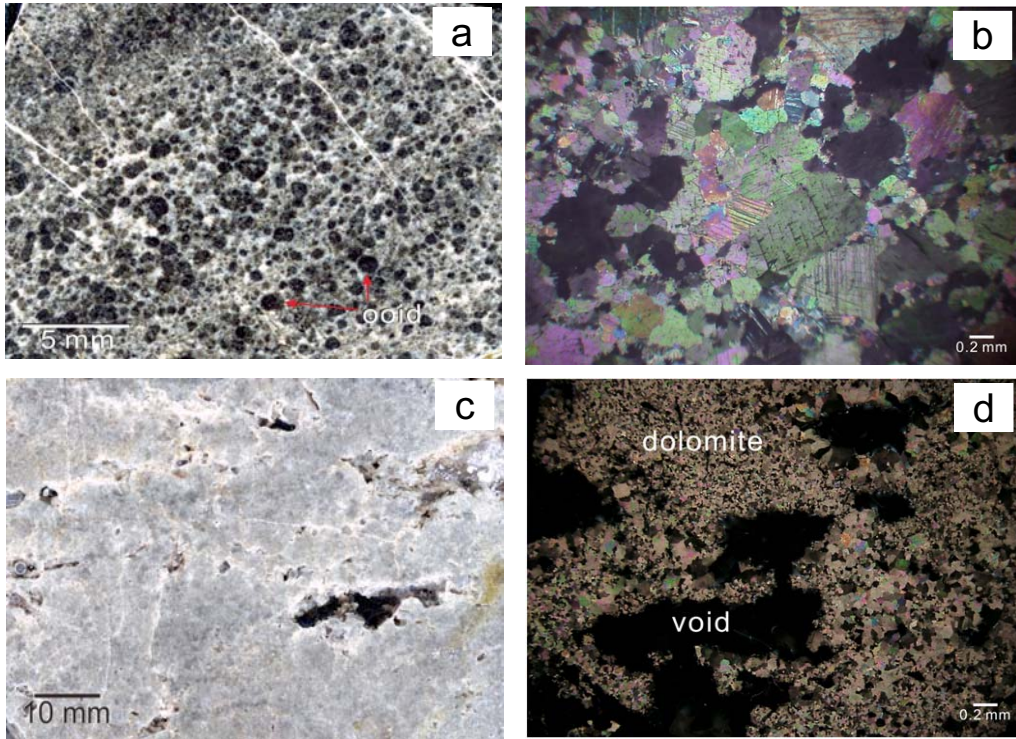


Fig. 4. Microtextures of dark gray (a, b) and light gray (c, d) dolomite ores. (a, c) are the scanned images of rock slabs. (b, d) are the polarizing microscope images under cross-polarized light.

에 해당되는 것으로 생각된다. 일부 점토질 세맥에서는 12.3 Å의 회절선을 나타내는 광물을 포함하고 있다. 이 광물시료에 대한 X-선회절패턴을 그림 3에 나타냈다. 여기서 보듯이 무처리에서 12.3, 15.2 Å의 회절선이 나타난다. 여기서 12.3 Å의 회절선은 에틸렌글리콜 처리에도 변화가 없으며, 550°C 1시간의 가열처리에서는 약간의 회절선이 남아 있을 정도로 감소된다. 이러한 결과는 세피올라이트의 특성과 잘 일치하고 있다. 그리고 15.2 Å의 회절선은 에틸렌글리콜 처리에 16.0 Å으로 약간 팽윤하고 있으며, 가열처리에는 12 Å 부근의 회절선만 나타난다. 이것은 회절선이 작아서 자세한 검토가 어렵지만 아마 녹니석/스멕타이트혼합층광물에 가까운 것으로 생각된다. 12.3 Å의 회절선을 나타내는 광물은 후술할 전자현미경 분석결과에서 세피올라이트(sepiolite, 해포석)인 것으로 확인되었다. 그리고 최근에 이 광산에서 산출한 세피올라이트에 대해서도 논문(최승현·이정후, 2012)으로 발표되었다. 그 이전에 울산 사문석광산에서도 세피올라이트가 발견되어 국내 처

음으로 연구된 바가 있다(황진연, 1991).

백운석 광산 구성광물의 조직 및 형태

백운석 광산에서 산출하는 구성광물의 조직과 형태에 대해 편광현미경과 주사전자현미경(SEM) 등으로 관찰하였다. 전술한 바와 같이 백운석 광석에는 색깔에 따라 암회색(dark-colored)과 담회색(light-colored)으로 크게 구분하고 있다. 이 두 가지 대표적인 광석들의 절단표면과 박편에 대한 사진을 그림 4에 나타냈다. 그림에서 보듯이 암회색 광석에는 1~2 mm의 작은 구상형태의 우이드(oid)가 다량 포함되는 어란상(oolitic) 조직을 잘 나타낸다. 그러나 담회색을 띠는 광석에서는 우이드들은 잘 관찰되지 않으며 빈 공동들이 부분적으로 나타난다. 따라서 암회색을 띠는 백운암은 어두운 색의 우이드들이 많이 포함되기 때문으로 보인다. 이들 광석에 대한 박편 관찰결과, 약 0.1~0.8 mm 범위의 돌로마이트 결정들이 모자이크 형태로 조직되어 나타난다(그림 4). 박편 관찰에서

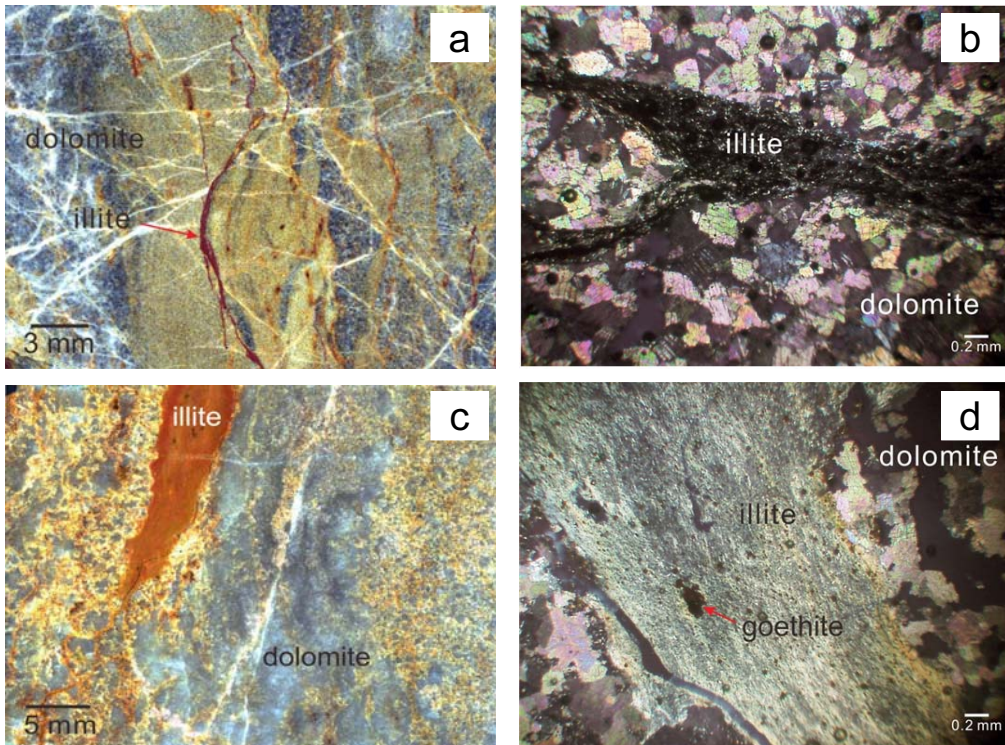


Fig. 5. Microscopic occurrences of dark red (a, b) and yellowish brown clay veins (c, d) in dolomite ores. (a, c) are the scanned images of rock slabs. (b, d) are the polarizing microscope images under cross-polarized light.

는 우이드의 구상 형태 등은 인지하기 어려웠지만, 입자가 크고 작은 입자들이 다소 불균질한 집합체로 나타나고 있다. 따라서 원래 방해석이나 아라고나이트가 백운석으로 교대되는 과정에서 본래의 우이드 구조는 사라지고, 희미한 흔적으로만 남아 있어서 암석 절단표면에서만 관찰되는 것으로 생각된다.

그리고 백운석 광체의 노두 일부에는 암적색이나 황갈색 및 담황색을 띠는 세맥 및 변질부가 발달되어 있다(그림 5). 그림에서 보듯이 암적색 세맥은 그 연장선이 봉합선과 같이 굴곡져 있어 일종의 스타일로라이트(styrolite)에 해당되는 것으로 생각된다. 이들 세맥 및 변질부에 대한 박편을 관찰해보면, 개별 입자 형태를 확인할 수 없을 정도로 미세한 점토광물로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이들 점토광물은 전술한 X-선회절분석에 의해 주로 일라이트로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 그리고 그림 5의 박편사진에서 검은 불투명 광물들이 분산되어 나타나는 것은 주로 침철석과 같은 산화철에 해당되며, 이들로 인하여 암적색

또는 황갈색을 띠게 된 것으로 보인다. 황갈색의 부분보다 암적색을 띠는 부분에서 더 많은 산화철 광물이 포함되어 있다.

백운석 광석과 세맥 및 변질부 등에 대해서 주사전자현미경(SEM)으로 결정형태를 관찰하였다. 그 결과, 백운석 광석들은 능면체, 입상 및 괴상의 일반적인 백운석의 결정형태로 되어 있고, 섬유상과 같은 다른 광물들은 관찰되지 않았다. 그러나 제일광산의 점토세맥 시료에서는 그림 6에서 보는 바와 같이 미세한 섬유상 결정의 다발을 잘 나타냈다. 이것은 전술한 12.3 Å의 회절선을 나타내는 시료로서 EDX의 분석결과와 섬유상 결정형태로 보아, 세피올라이트(sepiolite)인 것으로 확인되었다. 또한, 제일광산의 다른 시료에서는 그림 6과 같이 긴 주상의 결정형태로 나타났는데, 이에 대한 EDX의 분석결과로 보아, 규회석(wollastonite)인 것으로 확인되었다. X-선 회절분석에서 회절선이 잘 나타나지 않은 것으로 보아 이 규회석은 극히 소량으로 포함되는 것으로 나타났다.

그리고 분말시료에 대해 특성의 굴절액에 침액

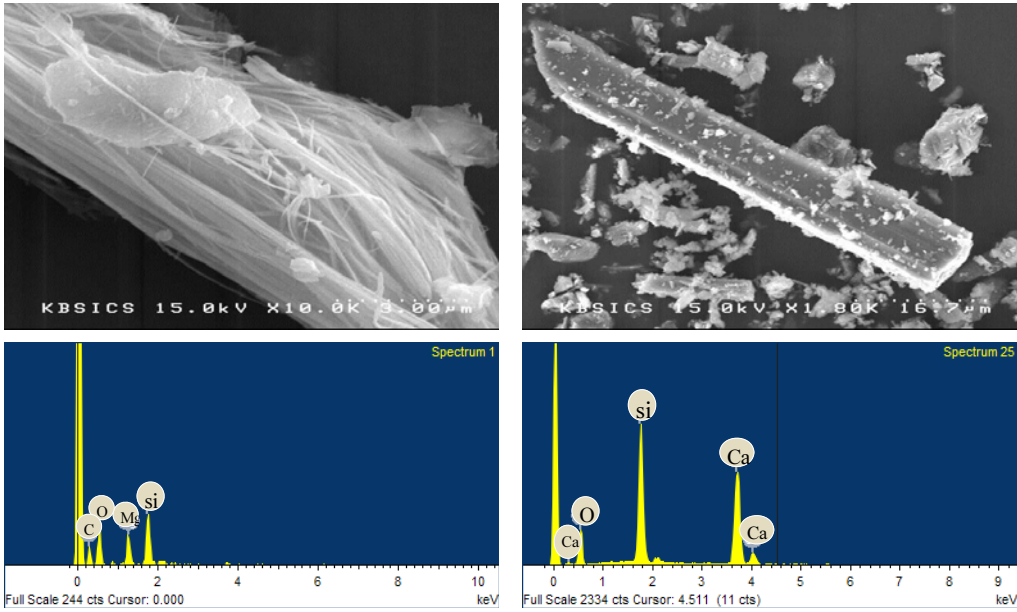


Fig. 6. SEM images and EDS patterns of sepiolite (left) and wollastonite (right) from the Jaeil mine.

하여 편광현미경으로 광물의 형태도 조사하였다. 대부분의 많은 시료에 대하여 이러한 방법으로 관찰해 보았으나, 섬유상의 형태는 관찰되지 않았다. 즉, 온석면이나 투각섬석 계열의 석면광물은 확인하지 못하였다.

고 찰

백운석(dolomite)을 다량 함유하는 암석은 선캄브리아기부터 현생이년까지 많이 나타나는 탄산염암 중의 하나이다. 이러한 백운암은 특히 하부 고생대의 탄산염암 내에는 많은 양이 전 세계적으로 분포한다. 한편, 돌로마이트가 오래된 지질시대의 탄산염암 내에 많이 분포하는데 비하여 현생 환경에서는 매우 적은 양의 돌로마이트만이 발견된다. 따라서 과거에 퇴적되었거나 속성작용을 통하여 생성된 돌로마이트의 성인 규명에 현생환경을 그대로 적용하는 것은 상당히 불합리하다. 돌로마이트의 생성환경을 설명하기 위해 여러 학자들은 역순환침투, 쿠롱(Coorong), 사브카(Sabkha), 혼합수, 매물다져짐, 열수순환, 기타 모델 등의 다양한 모델을 제시한 것으로 알려져 있다(Morrow, 1990; 문재운, 1992; 박병권, 김정률, 1990). 그러나 실제적으로 각 광산의 산출상태에 따른 돌로마이트의 성인을 규명하기에는 불명한 부분이 많으

며 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

여기서 국내의 백운석의 성인에 대한 연구내용을 알아본다. 1970년대 초반에서부터 백운석광산의 지질학적 산출상태와 지질구조 등에 대한 연구(유병화, 1971)가 있었으나, 백운석의 성인에 대해서는 검토되지 못하였다. 그 후, 단양과 영춘지역에 분포하는 홍월리층에 관한 퇴적암석학적 연구(이원국, 1983)에서는 홍월리층 돌로마이트의 산출상태, 조직 및 성분 등을 조사하여 돌로마이트의 성인에 대해 검토하였다. 그 결과, 홍월리층 돌로마이트는 조간대 내지 초조간대 환경에서 퇴적 변질성 돌로마이트화 작용에 의하여 형성되었으며, 국부적으로 후성 돌로마이트화 작용이 단층대 등의 지질구조와 관련하여 일어난 것으로 보았다. 그리고 지표 부근에서는 풍화와 관련된 탈돌로마이트화 작용도 일어난 것으로 설명하였다.

그리고 강원도 장성지역 중부 오르도비스계 막골층의 돌로마이트화 작용에 대한 연구(백인성, 1986)에서는 돌로마이트의 산출상태를 4가지 유형으로 구분하여 그 성인을 검토하였다. 그 결과, 4가지 유형으로는 먼저 세립질의 돌로마이트 결정으로 이루어진 것으로서 본래의 조직이 보존된 유형, 둘째로는 원래 퇴적물의 공극률, 광물성분 및 유기물질이 함량등에 의해 지배되어 돌로마이트화 작용이 선택적으로 발달된 유형, 세 번째로

입자, 기질 및 시멘트 모두가 돌로마이트화되었으며 원래 조직이 어느 정도 보존된 유형, 넷째로 모자이크 형태의 돌로마이트 결정으로 이루어진 것으로 원래의 조직이 거의 멸실되어 있는 유형으로 나누었다. 이들 유형의 돌로마이트화 작용의 시기는 돌로마이트화 작용의 양상과 수반된 퇴적구조 및 속성작용 현상과 연관지어 볼 때, 대부분 속성작용의 초기로 여겨지며, 돌로마이트화 작용 용액의 성질은 증발잔류암층의 결여 및 낮은 스트론튬 함량(평균 164 ppm)으로 미루어 해수와 담수가 혼합되어진 것으로 고찰하였다.

그리고, 강원시 일대에 분포하는 풍춘층 돌로마이트의 성인에 대한 연구(임성원·우경식, 1995)도 이루어졌다. 여기서 풍춘층의 돌로마이트를 조직적으로 4가지로 분류하였다. 즉, ① 괴상 돌로마이트내의 타형 돌로마이트, ② 판상석회암질 역암내의 자형 돌로마이트, ③ 우이드나 극피류를 치환하는 타형 돌로마이트, ④ 모틀구조로 보이는 돌로마이트이다. 이들 시료에 대한 동위원소 및 미량성분 등의 지화학적 분석을 통하여 돌로마이트의 성인을 검토하였다. 그 결과, 돌로마이트를 형성시킨 속성수가 대륙기원의 암석들과 반응하였던 것으로 보았고, 환원환경인 심부 매몰속성환경에서 돌로마이트가 형성된 것으로 해석하였다.

이상과 같이 국내 돌로마이트의 형성에 대한 여러 연구가 이루어졌으나, 국내의 모든 백운석 광상의 성인을 검토하기에는 미흡한 실정이다. 그러나 이번 연구에서 나타난 대부분 광산의 백운암이 거의 균질하고 유사한 광물조성, 우이드를 포함하는 흔적과 돌로마이트의 모자이크 조직, 다소 두꺼운 층상의 산출상태 등을 포함하여, 상기한 기존 연구의 결과를 종합해 볼 때, 국내의 주요 백운석광상은 선캄브리아기와 고생대의 얇은 바다에서 퇴적된 퇴적물이 속성작용에 의해 돌로마이트화 작용을 받아 형성된 것으로 보아도 좋을 것으로 생각된다. 이에 대해서는 여러 가지 관점에서 더 많은 연구가 필요할 것이다.

그리고 광산의 nodules에 나타나는 세맥, 암맥, 변질부 등에 대한 구성광물과 산상을 조사한 결과, 백운암에 포함되는 백색내지 담회색의 세맥들은 주로 방해석이나 돌로마이트의 탄산염광물로 구성되어 있는데 이들은 속성작용이나 그 후의 단층운동과 열수작용에 의한 것으로 볼 수 있다.

적갈색, 황갈색, 담황색 등을 띠는 세맥 및 변질부도 백운암체에 나타나는데 이들은 주로 일라이

트로 구성되어 있으며 침철석, 카올린광물 등이 포함되었다. 변질된 암맥 부분들도 적갈색내지 담황색을 띠었고 주로 일라이트로 구성되어 나타났다. 또한 용해 공동을 충진한 적갈색 점토도 주로 일라이트로 구성되며 침철석, 카올린광물 등이 포함되었다. 진한 암적색에 가까울수록 침철석과 같은 산화철광물이 많으며, 이러한 산화철광물의 함량에 따라 암적색에서 담황색까지의 다양한 색을 띠는 것으로 나타났다. 적갈색, 황갈색, 담황색 등을 띠는 세맥 및 변질부를 구성하는 점토물질들은 그 구성광물과 산상으로 보아 암맥관입에 따른 부분적 열수변질과 이후의 풍화작용에 의해 형성된 것으로 보인다.

결론

국내 주요 백운석광산에서 나타나는 광물들의 광물학적 특성, 공생관계 및 산출상태 등을 조사하고, 그리고 그 성인에 대해서도 일부 검토해 보았다. 이번 연구에서는 실제적으로 백운석을 다량 생산하고 있는 대표적인 주요 광산 9개를 대상으로 조사하였다. 이들 광산에 대하여 현장 지질조사를 실시하고 광석, 암석, 암맥, 세맥, 점토 등의 여러 시료를 채취하였으며, X-선 회절분석 및 주사전자현미경 등을 통하여 구성광물을 분석하였다.

구성광물의 분석 결과, 백운석광석은 특징적으로 암회색과 담회색 백운석이며 입자는 조립부터 세립까지 다양하였으며, 거의 순수한 돌로마이트로 이루어져 있다. 일부 백운암에서 소량의 방해석, 석영, 운모 등의 불순광물이 함유된 것으로 밝혀졌다. 광석 이외의 암석, 암맥, 세맥, 점토부 등의 여러 시료에서는 방해석, 석영, 일라이트, 장석, 카올린광물, 녹니석 등으로 광산 및 시료에 따라 다양하게 나타났다. 일부 광산의 변질부에서 섬유상의 광물인 세피올라이트와 규회석이 포함되는 것으로 확인되었다. 그러나, 이번 조사에서 국제기구에서 지정한 6개의 석면광물의 존재 여부에 대해 XRD분석 이외에 주사전자현미경(SEM)과 편광현미경 등을 사용하여 형태적인 분석도 행하였으나, 온석면 및 투각섬석과 같은 석면광물은 발견되지 않았다.

적갈색, 황갈색, 담황색 등을 띠는 세맥 및 변질부도 백운암체에 나타나는데 이들은 주로 일라이트로 구성되어 있으며 침철석, 카올린광물 등이 포함되었다. 변질된 암맥 부분들도 적갈색내지 담

황색을 띠었고 주로 일라이트로 구성되어 나타났다. 그리고 침철석과 같은 산화철광물의 함량에 따라 암적색에서 담황색까지의 다양한 색을 띠는 것으로 나타났다. 이러한 세맥 및 변질부의 점토 물질들은 그 구성광물과 산상으로 보아 암맥관입에 따른 부분적 열수변질과 이후의 풍화작용에 의해 형성된 것으로 보인다.

국내 백운석 광상의 성인에 대해서는 이번 연구 결과를 포함하여 기존 연구결과를 종합해 볼 때, 백운석광상은 선캄브리아기와 고생대의 얇은 바다에서 퇴적된 퇴적물이 속성작용에 의해 돌로마이트화 작용을 받아 형성된 것으로 생각된다.

사 사

이 논문을 작성하는데 광산현장에서 많은 협조와 자료를 제공해 주신 한국석회석가공협동조합과 광산담당자들에게 깊이 감사드립니다. 이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음을 밝힙니다. 또한 논문을 세심하게 검토하고 좋은 의견을 보내 주신 심사위원님들께 감사드립니다.

참고문헌

- Choi, S.H. and Lee, J.H. (2012) A Sepiolite from the Jeil Industry Dolomite Mine, Jangkye Area, Jangsungun. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 25, 37-40 (in Korean with English abstract).
- Hwang, J.Y. (1991) Mineralogy of sepiolite from the Ulsan Serpentine mine. *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 4, 108-118 (in Korean with English abstract).
- KORES (1988) Non-metallic Mineral Deposits in Korea, 11 (in Korean).
- KORES (2008) The detailed geological survey; Chungju-Hwanggangri Area (in Korean with English abstract).
- KORES (2009) The detailed geological survey; Yeongwol Area (in Korean with English abstract).
- KORES (2011) Mineral Reserves of Korea (in Korean).
- Lim, S.W and Woo, K.S. (1995) The origin of the dolomite of the Pungchon Fomation near Taebaeg City, *Korean Journal of Petrological Geology*, 3, 28-39 (in Korean with English abstract).
- Lee, W.K. (1983) Sedimentary Petrological Study on the Heungwolri Formation, *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 190-202 (in Korean with English abstract).
- Moon, J.W. (1992) Review on dolomitization models. *Journal of the Geological Society of Korea*, 28, 376-383 (in Korean with English abstract).
- Morrow, D. W. (1990) Dolomite - Part 1: The chemistry of dolomitization and dolomite precipitation, in McIlreath, A. and Morrow, D.W., eds., *Diagenesis*, Geoscience Canada, 113-139.
- Park, B.K. and Kim, J.R. (1990) Carbonate Rock, Woosung, Seoul. 1-176 (in Korean).
- Paik, I.S. (1986) Dolomitization of the Middle Ordovician Maggol Formation in Jangseong Area, Gangweondo, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 22, 333-346 (in Korean with English abstract).
- Ryuu, B.H. (1971) A Preliminary Report on the Geology and Ore Deposit of Daeheung Dolomite Mine, *Journal of the Korean Institute of Mining Geology*. 4, 113-119 (in Korean with English abstract).

접수일(2013년 6월 3일), 수정일(1차 : 2013년 6월 21일),
 게재확정일(2013년 6월 21일), 책임편집위원 : 신동복