

국내산 고품위 석회석의 광물상 및 광물특성에 관한 응용광물학적 연구

Applied-mineralogical Study on the Mineral Facies and Characteristics of Domestic High-Ca Limestone

노진환 (Jin Hwan Noh)^{1,*} · 오성진 (Sung Jin Oh)¹ · 김경진 (Kyong Jin Kim)²

¹강원대학교 지질학과

(Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

²대한광업진흥공사 자원탐사처

(Mineral Exploration Division, Korea Resources Corporation, Seoul 156-706, Korea)

요약: 국내산 고품위 석회석은 그 지질 배경과 광상 유형에 따라 (1) 제천-단양 지구, (2) 삼척-태백-정선 지구 및 (3) 울진-안동 지구의 유형들로 구분된다. 제천-단양 지구에서 산출되는 석회석을 제외한 대부분의 국내산 고품위 석회석들은 석회암이 열수변질작용과 열변성작용을 받아 재결정되고 Ca가 부화된 양상을 이룬다. 국내산 고품위 석회석은 광물조성, 화학조성, 결정도 및 광물상의 차이에 따라 결정질 석회암형, 대리암형, 미정질 및 거정질 방해석 유형으로 구분된다. 이들에 대해 응용광물학적 관점에서 그 조성과 특성을 밝히기 위한 체계적인 시험 및 분석이 이루어졌다.

제천-단양 지구의 고품위 석회석들은 외견상 원암에 가까운 결정질 석회암 유형으로서, 낮은 결정도와 세립질 조직, 비교적 높은 CaO 함량(51~54 wt.%) 및 낮은 백색도의 광석 특성을 갖는다. 삼척-태백-정선 지구에서 산출되는 미정질(대개 0.2~0.3 mm) 및 거정질(2~15 cm) 고품위 석회석은 전형적인 열수변질형 광석으로서, 결정도에서 유형별로 서로 현격한 차이를 보이고 다소 편차가 심한 CaO 함유도(50~55 wt.%) 및 높은 백색도를 보이는 것이 특징이다. 특히 이 지역의 주된 광체인 미정질 방해석형 광석은 미세하고 균일한 결정도와 보다 균질한 조성(대개 > 52 wt.%)을 이룬다. 울진-안동 지구의 변성퇴적암류에서 산출되는 석회석들은 그 광상 유형과 산출상태에 따라 품위와 품질면에서 현격한 차이를 보인다. 이 같은 국내산 고품위 석회석의 광물특성과 화학조성상의 특징에 의거하여 지역별로의 광석 유형에 따라 적절한 개발 용도를 제시하였다.

주요어: 고품위 석회석, 방해석, 결정질 석회암, 미정질, 거정질, 대리암형, 열수변질작용, 변성작용

ABSTRACT: Locality of domestic high-Ca limestones can be divided into three districts, *i.e.*, (1) the Jecheon-Danyang area, (2) the Samcheok-Taebaek-Jungsun area, and (3) the Uljin-Andong area, in accordance with their geologic background and type of the deposits. Except for some crystalline limestones from the Jecheon-Danyang area, domestic high-Ca limestones were mostly recrystallized and Ca-enriched by the effects of hydrothermal alteration and/or thermal metamorphism. The lime-

*교신저자: jhnoh@kangwon.ac.kr

stones can be also divided into crystalline limestone type, marble type, micro- and mega-crystalline calcite types on the basis of their composition, crystallinity, and mineral facies. An applied-mineralogical characterization of the high-Ca limestones was done through the systematic analyses and tests for the limestones.

The high-Ca limestones from the area (1), which are megascopically close to the original limestone in lithology, display lower whiteness, higher contents of CaO (51~54 wt.%), low crystallinity, and fine-grained texture. Two typical hydrothermal types of the high-Ca limestones from the area (2), *i.e.*, micro- (mostly 0.2~0.3 mm) and mega-crystalline (2~15 cm) calcite types, have comparatively higher whiteness and rather variable CaO contents (50~55 wt.%) with exhibiting quite different crystallinity each other. The micro-crystalline calcite type is especially dominant in this area, and has comparatively uniform crystallinity and homogeneous composition. Compared to these limestones, the high-Ca limestones from the area (3) show remarkable differences in grade and quality according to their types of deposit and occurrence. Based on these mineral characters and chemical composition, a possible scheme for industrial uses of the domestic high-Ca limestones was suggested.

Key words : high-Ca limestone, calcite, crystalline limestone, micro-crystalline, mega-crystalline, marble type, hydrothermal alteration, thermal metamorphism

서 론

일반적으로 석회석에서 품위(grade)와 품질(quality)은 다른 산업광물들의 경우처럼 엄밀히 구분되어 있지 않을 뿐만 아니라, 그 개념조차도 정확히 인식되지 않고 있는 실정이다. 이는 석회석의 응용부문에서 특정한 화학성분(Ca, Mg 또는 Fe)들의 함유정도를 기준으로 이 광석의 품위와 품질을 가늠하는 방식이 별다른 무리 없이 통용되고 있기 때문이다. 따라서 화학분석 이외에 석회석 원광에 대한 광물 조성이나 특성을 면밀히 조사 및 분석하는 과정은 상대적으로 등한시 되어 온 경향이 있었다.

그러나 품질관리가 보다 엄격히 요구되는 소위 '고품위 석회석(high-Ca limestone 또는 high-purity limestone)'의 경우에는 종래의 화학분석치 일변도의 광석 평가 방식으로는 효율적인 개발과 가공 및 응용을 도모할 수 없다. 고품위 석회석은 시멘트 제조 용도보다는 부가가치가 큰 산업용도 즉, 제철, 석회제조, 유리산업, 제지 및 각종 충전재 등과 같은 용도로 사용되는 석회석을 지칭한다. 이를 학술적으로 정의한다면, "CaCO₃ 함유도가 대개 97% 이상이며 밝은 색조를 띠고 관련 용도로의 기능성이 우수한 부가가치 높은 석회석"을 의미한다. 이 같은 석회석을 개발하고 응용하는 데에는 용도에 따른 보다 정밀하고 다양한 응용광물학적인 품위 및 품질 평가방식

이 효과적으로 적용되어야 하는 것으로 알려져 있다(Harrison, 1992; Harben, 1999).

현재 국내에서 개발되고 있는 고품위 석회석은 산출지의 지질 배경과 산출 상태에 따라 다양한 광석의 형태를 이루고, 이들은 또한 각기 독특한 광물상, 광물 조성 및 조직을 갖는다. 특히 백운석을 비롯한 불순 광물성분들의 존재 상태와 함량은 고품위 석회석의 품위와 품질에 절대적인 영향을 미침에도 불구하고 국내외를 막론하고 이에 대한 연구가 잘 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이 같은 맥락에서 그동안 단순히 Ca 함유도가 높은 석회암 정도로만 인식되어 왔던 석회석을 방해석이라는 유용광물을 함유하는 광석의 관점에서 그 광물상과 광물특성이 세밀하게 다루어져야 할 필요성이 제기된다.

필자들은 이 논문을 통해서 국내산 고품위 석회석들의 산출상태와 광물학적 특징을 비교·분석하고, 그 용도별로 품위와 품질을 가름하는 제반 응용광물학적 분석 및 감정 자료들을 도출하고자 한다. 이를 토대로 고품위 석회석의 용도, 품위 및 품질 간의 상관관계를 검토함으로써, 궁극적으로는 국내 석회석 자원의 효율적 관리, 개발 및 응용 체계를 수립하는데 뒷받침이 되는 지식기반을 마련하고자 한다.

연구 방법

정선, 태백, 제천, 단양 및 안동 등지에서 현재 가행 중인 고품위 석회석 광산 45개소를 대상으로 석회석의 산출상태, 부존여건 및 개발상황 등을 조사하였다. 또한 각 광산에서 산출되는 대표적 광석들을 유형 및 용도별로 2~4개씩 체계적으로 채취하였다.

채취된 석회석들에 대해서는 우선 편광현미경 및 주사전자현미경(SEM: model HITACHI S-4300) 관찰과 통상적인 분말 X-선회절(XRD: model RIGAKU D/Max 2000) 분석을 통해 그 광물조성과 광물상을 파악하였다. 특히 고품위 석회석의 결정도는 최근에 NIKON사에서 개발한 'Image Analysing System (*i-solution*TM)'을 사용하여 통계적으로 분석하였다. 석회석을 구성하는 탄산염 광물들의 광물상 및 변질 양상 그리고 이들의 발광성(luminescence)을 조사하기 위해서, 음극선발광현미경(luminescope, model CCL 8200 MK3)을 이용하여 음극선 전류 350 mA, 전압 15 kV 조건으로 관찰하였다. 석회석의 백색도는 표품을 10 μm 정도의 분말로 분쇄한 후, 색도계(Model: MINOLTA CR-300)를 이용하여 정량적으로 측정하였다.

불순물 감정과 석회석의 순도를 검증하기 위해서 X-선회절 분석을 시행하였다. X-선회절 분석은 $\text{CuK}\alpha$ 의 X-선을 이용하여 3~60°의 2 θ 범위에서 0.04°/min의 조건으로 실험하였다. 또한 변질되지 않은 석회암으로부터 열수변질에 의해서 파생된 석회석들의 방해석과 백운석의 함량 관계를 정량적으로 해석하기 위해서 X-선회절 정량분석(Quantitative XRD Phase Analysis)을 시행하였다. X-선회절 정량분석은 0.04°/sec 간격으로 단속적 주사방식(step-scanning)으로 실험하여 구해진 회절자료들을 수차례 검증한 후에, 리트벨트 구조점증법(Rietveld refinement method)에 의거한 정량분석 프로그램(SIROQUANTTM, ver.2.5)을 이용하여 그 결과를 해석하였다(Taylor, 1991; Taylor and Hinczak, 2001).

화학분석은 주요원소와 미량원소 단위로 구분하여 X-선형광(XRF) 분석법과 플라즈마 유도 방출분광(ICPS) 분석법으로 기초과학지원연구원에 의뢰하여 분석하였다. 방해석과 백운석, 석영 이외에 편광현미경 하에서 관찰하기 어려운 광물들의 감정을 위해서, 10% 염산에 용해시키고

남은 석회석 잔류물을 X-선회절 분석하는 방식(Harrison, 1992)으로 감정하였다.

고품질 석회석의 지구별 산출상태 및 광화양상

국내의 고품위 석회석 부존 지역은 그 지질 배경과 생성 여건의 차이에 따라 (1) 제천-단양 지구, (2) 삼척-태백-정선 지구 및 (3) 안동-울진 지구로 구분될 수 있다. 이 연구에서 조사된 광산은 모두 45 곳으로, 제천-단양 지구 9개, 삼척-정선 지구 25개, 울진-안동 지구 10개 광산 등으로 국내의 고품위 석회석 광산들이 대부분 포함되었다(그림 1).

제천-단양 지구에서는 평안누층군의 갑산층과 조선누층군의 영흥층에서 고품위 석회석이 산출된다. 이 지역의 석회석은 대개 속성변질 내지 저온의 변성작용을 받아 재결정된 암상, 즉 결정질 석회암(crystalline limestone)의 암상을 보인다. 또한 부분적으로 열수변질된 양상을 보이기도 하지만, 대부분 그 정도가 다른 지역에 비해서 상대적으로 미약하고 전체적으로 석회암의 암상을 유지한 상태로 산출된다. 석회석 광화작용 이후에 야기된 것으로 사료되는 변형작용의 결과로 석회석 층이 심하게 습곡되어 있는 것이 특징이다(그림 2). 갑산층의 상부 호층대와 중부 석회암 내에는 불순대로서 규질 석회암, 백운암질 석회암, 처트 등이 수반된다. 주로 세립의 결정질 석회암이 주된 광석 유형을 이루며 대개 담회색 내지 암회색의 암색을 보인다. 동일한 석회석 층군에서도 상대적으로 밝은 색조를 띠는 부분이 다른 부분에 비하여 상대적으로 CaO 함유 수준이 높은 것으로 나타나는 바, 이는 부분적 열수변질에 의한 CaO 부화(CaO-enrichment)와 탈색현상(bleaching)으로 여겨진다. 이 지역에서 특징적인 층군에 규제된 석회석 광화작용은 고품위대의 형성이 기본적으로는 일차적 기원, 즉 퇴적작용에 의해서 이루어졌음을 시사한다. 습곡축 부분의 석회석은 상대적으로 품위가 높게 나타나고 층후도 두터워지는 경향을 보인다. 또한 습곡의 날개 부분은 부분적으로 규화되는 양상을 보여 상대적으로 품위가 낮게 나타난다. 이러한 차이는 같은 층이더라도 구조적인 요인에 의하여 퇴적 후기에 Ca 유동을 야기시킨 속성작용이나 변성작용이 그 정도나 성격

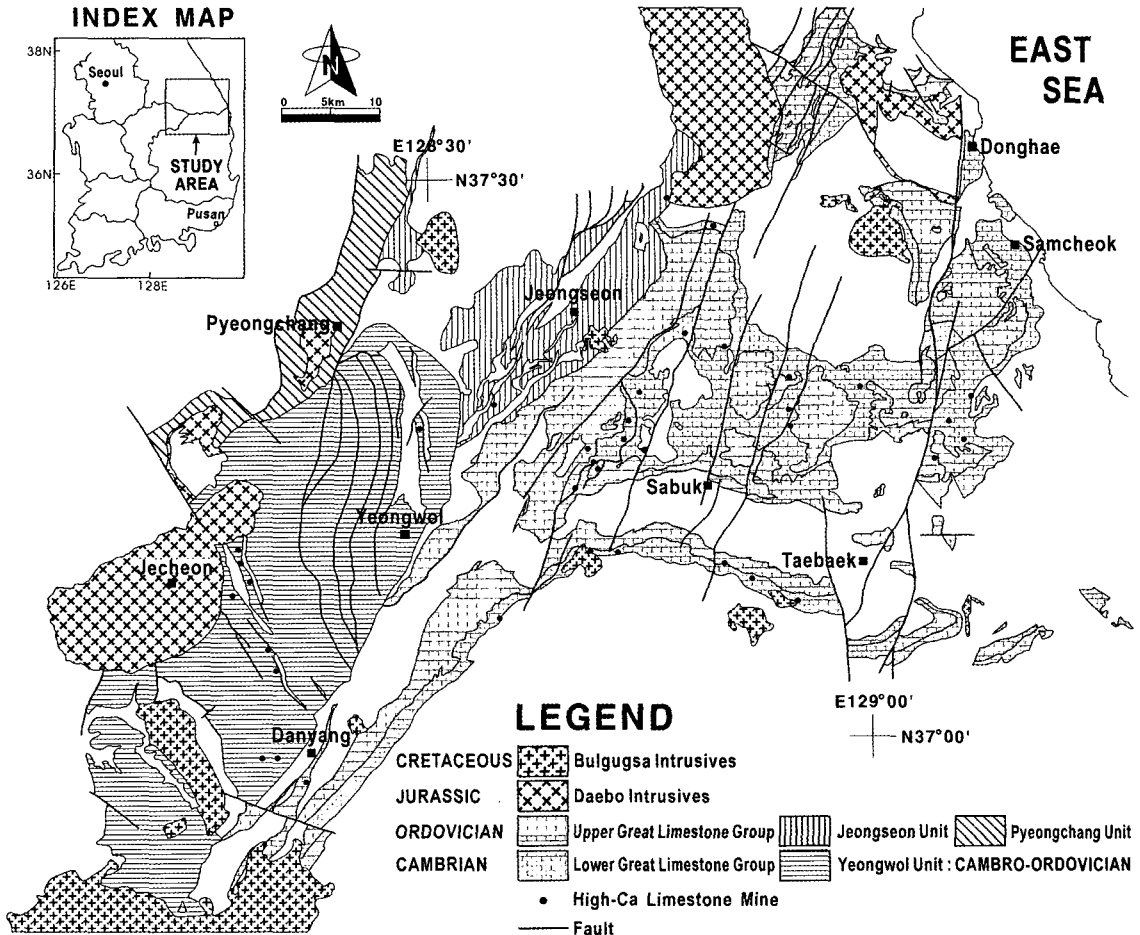


Fig. 1. Geologic and index maps illustrating the locality and geologic setting of some important high-Ca limestone deposits.

에 있어서 다소 다르게 관여되었기 때문인 것으로 여겨진다. 즉, 습곡작용 과정에서 석회암층 내의 Ca이 습곡축 부분으로 이동되었을 개연성을 시사한다.

삼척-태백-정선 지역에서 산출되는 고품위 석회석은 모두 풍촌층 상부, 즉 단속적으로 발달하는 백운암 층준 상위에 부존되는 것으로 알려져 있다(장병두와 손길상, 2002; 대한광업진흥공사, 2002). 이에 따라 이 백운암 층준과 화절 층과의 경계부 사이에 놓이는 30~50 m 두께의 담회색 내지 백색을 띠는 석회암대가 고품위 석회석으로 가행되고 있다. 그러나 고품위 석회석의 부존 층준이 전체적으로는 층준에 따라 발달하는 것으로 보이지만, 국지적으로는 원암의 층

리와 비조화적 관계(discordant)를 이루며 산출된다(그림 2). 태백시의 서측부에서는 풍촌층 석회암 원래의 암상이 잔존되는 경우가 드물어 담회색의 석회석을 원암으로 혼동하기 쉽지만, 정선 지역 광산들의 갱내나 삼척-태백 일대의 풍촌층에서는 우이드(ooids)와 자형의 백운석을 흔히 함유하고 암회색 내지 흑색을 띠는 전형적인 풍촌층 석회암의 암상을 찾아볼 수 있다. 즉, 담회색 내지 백색을 띠는 석회석들은 원암이 열수 변질되어 광물조성과 조직이 현격히 변화된 형태를 이루고 있다. 이 변질 과정에서 암색은 현격히 변화되어 백색 내지 담회색을 띠게 된 것으로 보인다. 이 지구의 남쪽에서 동-서로 분포된 광산들에서는 방연석(galena), 섬아연석(sphal-

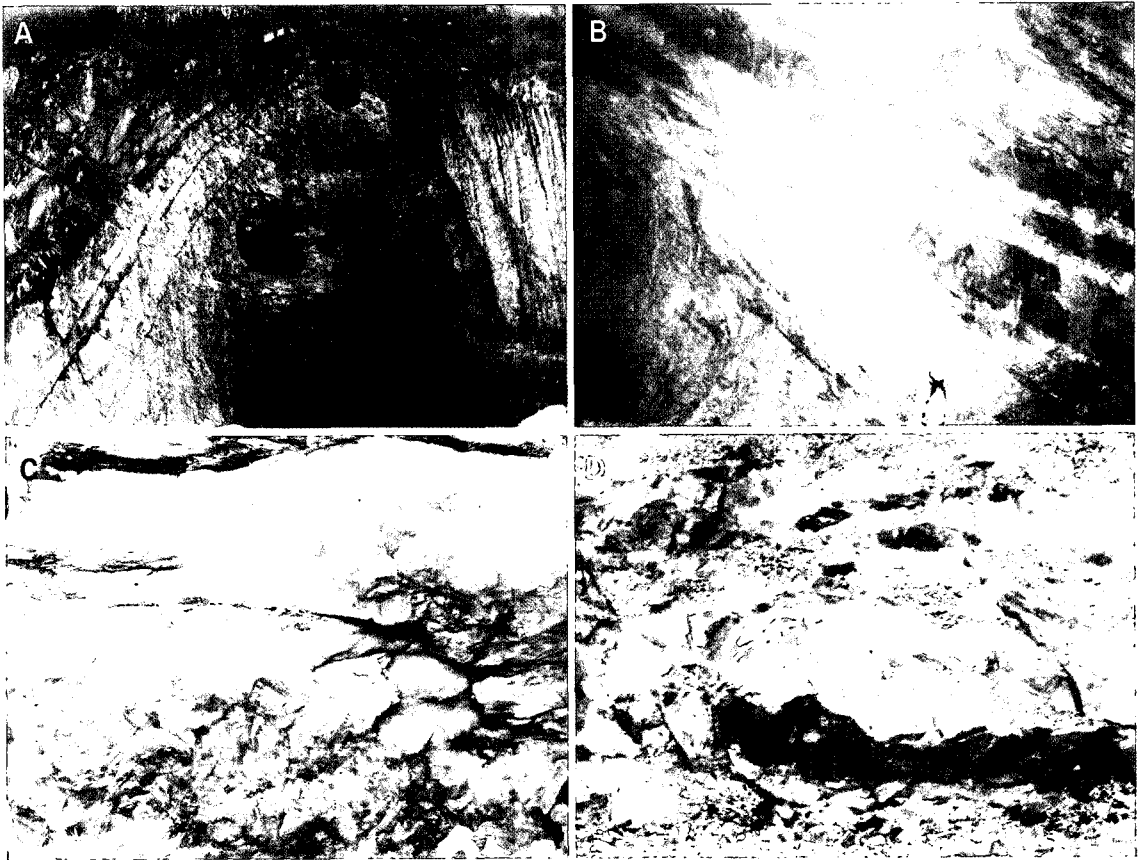


Fig. 2. Modes of field occurrence of the domestic high-Ca limestones. A: High-Ca limestone beds deformed by folding in the Daeseong-Jecheon Mine, Jecheon area. B: Formation of high-Ca limestone (white) of micro-crystalline calcite type from the original limestone beds (black) as the results of hydrothermal alteration controlled by bedding planes in the Songwon Mine, Jeongseon area. C: Replacement contacts forming between the micro-crystalline calcite type and late-formed mega-crystalline ore in the Daechang-Sangdong Mine, Sangdong area. D: A field association of marble type ore (white) and amphibolite (black) in the Imdong Mine, Andong area.

erite), 자류철석(pyrrhotite) 등과 같은 황화 금속 광물들과 함께 단결정의 크기가 1~15 cm에 달하는 거정질 석회석 광체가 부존된다(그림 2). 또한 이 석회석 광산들 근처에는 과거에 이들 금속 광물들을 개발했던 채굴적들이 흔히 발견된다. 따라서 이 지역의 석회석 광화대는 전체적으로 조선누층군 석회암층에 금속(Pb, Zn, W) 광상을 형성시킨 스카른(skarn) 광화대의 외곽 열수변질대로 여겨진다(노진환 외, 2004). 스카른이 수반되지 않는 고품위 석회석 대·내에서 흔히 찾아 볼 수 있는 황갈색의 일라이트 변질물의 존재도 이 같은 열수변질의 영향을 시사

한다. 이 같은 광화 양상은 대개 서쪽으로 갈수록 심화되는 경향을 보이며, 풍촌층의 동쪽 부분인 삼척 지역에서 개발되고 있는 석회석은 백운석을 많이 함유하는 원암의 암상을 보인다. 그렇지만 어란상 석회암(oolitic limestone)의 암상을 보이는 상부의 일부 층준에서는 고품위 석회석으로 간주될 수 있는 광석이 부존된다. 이 지역의 고품위 석회석 광체들은 열수변질 외에 퇴적층 용기 후에 야기된 화절층의 표성변질(supergene alteration)에 의해서도 석회석의 품위 및 품질 저하를 가져오는 2차적인 영향을 받은 것으로 나타난다.

울진-안동 지구의 석회석은 곳에 따라 산출상태와 광화 양상이 다양하다. 대부분은 열적 변성작용(thermal metamorphism)을 받아 재결정된 암상을 이루는 유형으로, 시대미상의 변성퇴적암류 중에 개재되는 변성탄산염 암체로서 산출된다. 따라서 대리암의 조성과 조직을 보이고 흑연과 석회규산염(calc-silicates) 광물들을 불순물로 수반하는 것이 특징이다. 평해 지역에서 산출되는 석회석은 대리암의 암상을 이루는 대규모 광체이지만, 품위 면에서 상대적으로 낮은 양상을 보인다. 전형적인 변성퇴적암체로 산출되는 이 석회석 광체는 층상으로 발달된다(그림 2). 전반적으로 석회규산염 계통의 불순광물 성분들이 많이 함유되는 것이 특징이다. 그렇지만 울진 온정리 지역 광산의 경우에는 열수변질 내지 스카른 광화양상을 보인다. 불순 석회질 부분에서는 석류석(grossular), 규회석(wollastonite) 등과 같은 고온성 스카른 광물들을 흔히 수반하며, 태백-정선 지구의 열수기원의 석회석대 보다 상대적으로 높은 온도의 스카른 광화대를 형성한다. 이 석회석 광상은 광체의 발달이 다소 불규칙하지만, 고순도의 방해석 함유와 거정질의 광물 특성을 지닌다. 안동 지역 광산의 석회석은 변성작용과 함께 구조적 변형작용을 심하게 받은 대리암상의 광체를 이룬다. 퇴적기원으로 사료되는 각섬암(amphibolite)이 흔히 석회석 광체 내에 혼재되고, 흑연질 불순물이 특징적으로 많이 함유된다(그림 2).

고품위 석회석의 유형 및 광물상

국내에서 산출되는 고품위 석회석의 광석 유형은 그 산출상태, 조성, 결정도 및 조직의 차이에 따라 다음과 같은 5가지 유형으로 구분된다:

- (1) 결정질 석회암형(Crystalline limestone type),
- (2) 미정질 방해석형(Micro-crystalline calcite type),
- (3) 미정질 대리암형(Micro-crystalline marble type),
- (4) 조립질 대리암형(Coarse-crystalline marble type) 및
- (5) 거정질 방해석형(Mega-crystalline calcite type).

유형 (1) 석회석은 대개 회색~담회색을 띠며, 속성변질이나 저변성작용에 의해서 결정화 되어 있지만 부분적으로는 원암인 석회암의 조성과 조직을 보존하고 있다(그림 3). 대개 등립상을 이루고 순수한 방해석 조성을 이루지만(제천-단

양 지구의 갑산층과 영흥층에서 산출되는 석회석들), 지역에 따라 백운석을 많이 함유하기도 한다(태백-삼척 지역의 풍촌층 석회석). 유형 (2) 광석들은 풍촌층에 주로 부존되는 전형적인 열수변질형 광석들이다(그림 3). 이 유형의 광석들은 대개 세립질(평균 0.1~0.4 mm)을 이루지만, 대부분 방해석으로 재결정화 되어 있고 균질한 조성과 균일한 입도를 보이는 것이 특징이다. 유형 (3)의 미정질 대리암형 광석은 유백색을 띠며 매우 치밀하고 견고한 물성을 보인다. 유형 (2)와 유사한 미정질 광석이지만, 평균 0.2~0.3 mm 크기의 방해석 결정 사이를 0.05 mm 내외의 미립질 방해석 결정들이 입간을 채우거나 봉합하는 조직상의 특징을 보인다(그림 3). 유형 (4) 석회석은 정선 임계 지구와 안동 지역의 변성퇴적암 내의 일부 석회석 광석에서 볼 수 있는 광석 유형이다. 이 석회석은 변성작용에 의한 치밀한 봉합상 구조와 방해석 결정들의 선택적 편향 양상이 특징적으로 나타나는 전형적인 대리암형 광석이다(그림 3). 유형 (5)는 거정질 방해석형 석회석으로 결정의 크기가 대개 수 cm 단위에 이르는 조립질 광석이다. 풍촌층의 태백에서 영월에 이르는 지역의 광산들과 울진 지역 광산에서 산출된다. 특히 상동광산의 경우에는 10~15 cm에 달하는 초대형의 방해석 결정들로 구성된 석회석 광체가 부존된다. 이 유형의 광체는 대개 층상을 이루는 유형 (2)와 (3)의 석회석 광체를 하부 쪽에서부터 교대시키는 양상으로 산출된다.

국내산 고품위 석회석들은 대부분 95% 이상 방해석으로 구성된 단순 조성을 보이지만, 그 광석 유형과 광화작용의 성격에 따라 다양한 불순물들이 존재한다. 결정질 석회암 원암형의 경우에는 백운석(dolomite), 탄질물(coaly material), 석영 등이 수반되고, 대리암형 광석은 흑연(graphite), 스피넬(sphene), 투회석(diopside) 등과 같은 특징적인 변성광물들이 흔히 관찰된다(그림 4, 5). 특히 안동 지역과 영월-태백-정선 지구의 북부 지역에서 산출되는 대리암형 석회석에서는 분체상의 색도에 민감한 영향을 주는 흑연이 흔히 수반된다. 이에 비해서 열수변질형 광석에는 특징적인 열수변질 광물인 일라이트를 비롯해서 석회규산염 내지 스카른 광물들, 즉 투각섬석, 단사녹니석(clinocllore), 투회석, 규회석(wollastonite), Ca-형 석류석(grossular, andra-

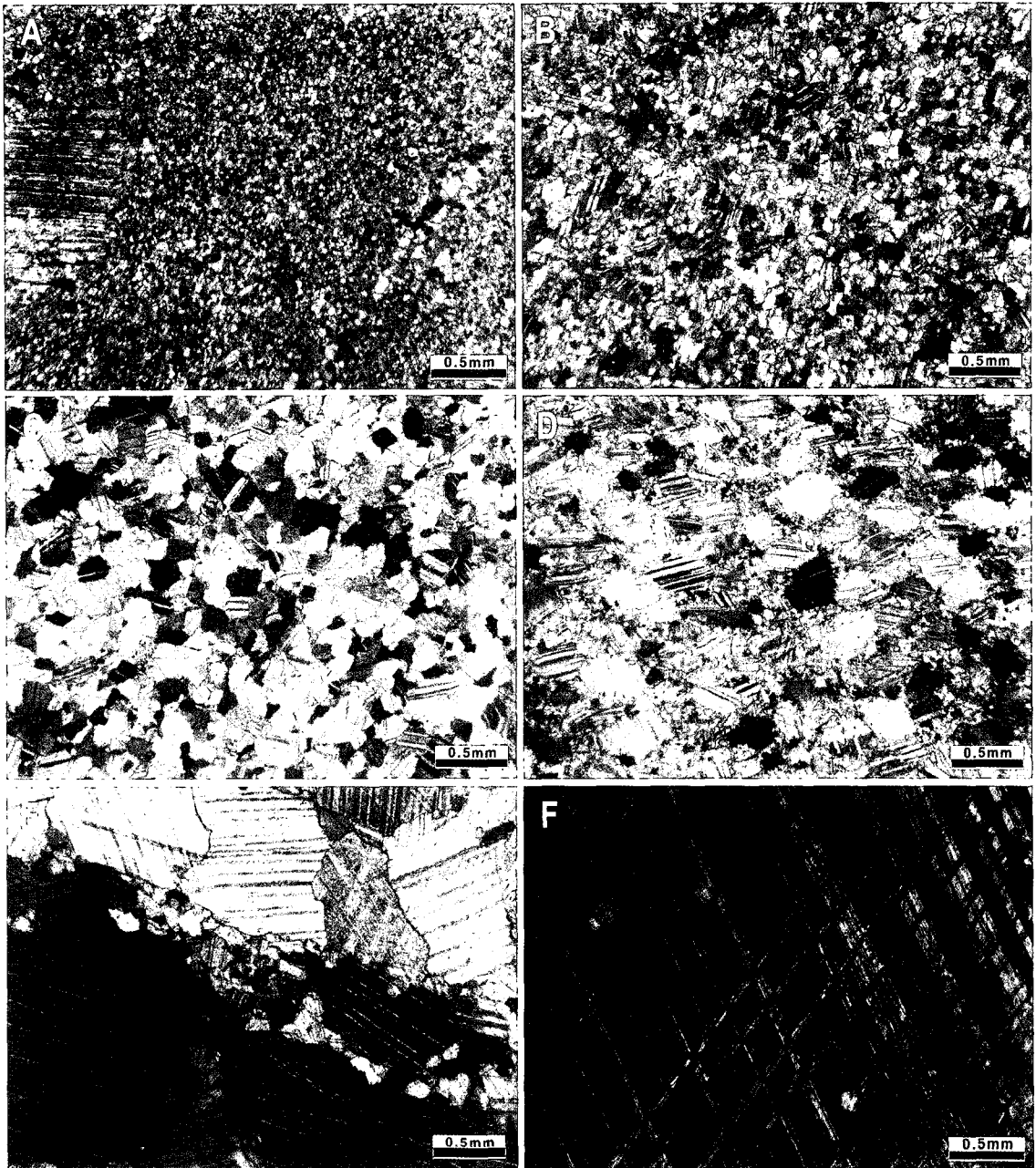


Fig. 3. Photomicrographs of the domestic high-Ca limestones showing various crystallinity and texture (crossed nicols). A. A crystalline limestone type exhibiting very fine-grained texture: Note the mode of recrystallization and the absence of micritic sediments. B: A micro-crystalline calcite type ore recrystallized at the expense of original micritic sediments. C. An equigranular texture found in the micro-crystalline calcite type ore: Note the uniform crystal size. D. Micro-crystalline marble type ore showing an intergranular recrystallization of minute calcite crystals. E. Coarse-crystalline marble type ore showing interlocking of calcite crystals. F. A large intertwined calcite crystal found in the mega-crystalline calcite ore.

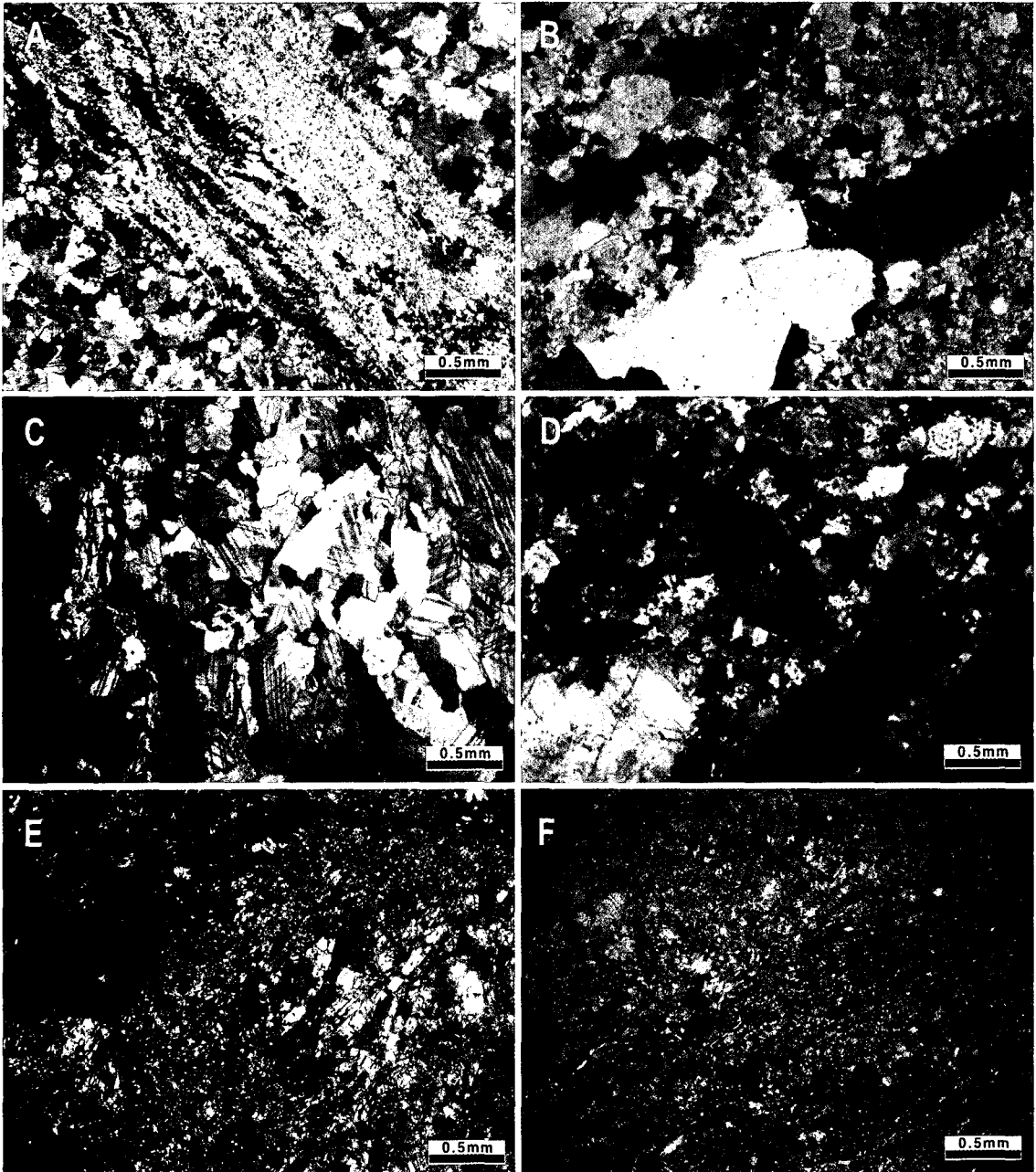


Fig. 4. Photomicrographs of mineral impurities found in the domestic high-Ca limestones (crossed nicols). A. An aggregates of illite and clinocllore included in the clayey part of the micro-crystalline calcite ore. B: Quartz and dolomite crystals segregated within the micro-crystalline type ore. C. Tremolite crystals included in the micro-crystalline calcite type ore. D. Well-formed sphene crystal found in the coarse-crystalline marble type. E. A calc-silicate assemblage composed of garnet (black) and wollastonite (fibrous, white) found in the impure part of mega-crystalline calcite type ore. F. Pyrite impurities associating elongated tremolite crystals in the micro-crystalline calcite type ore.

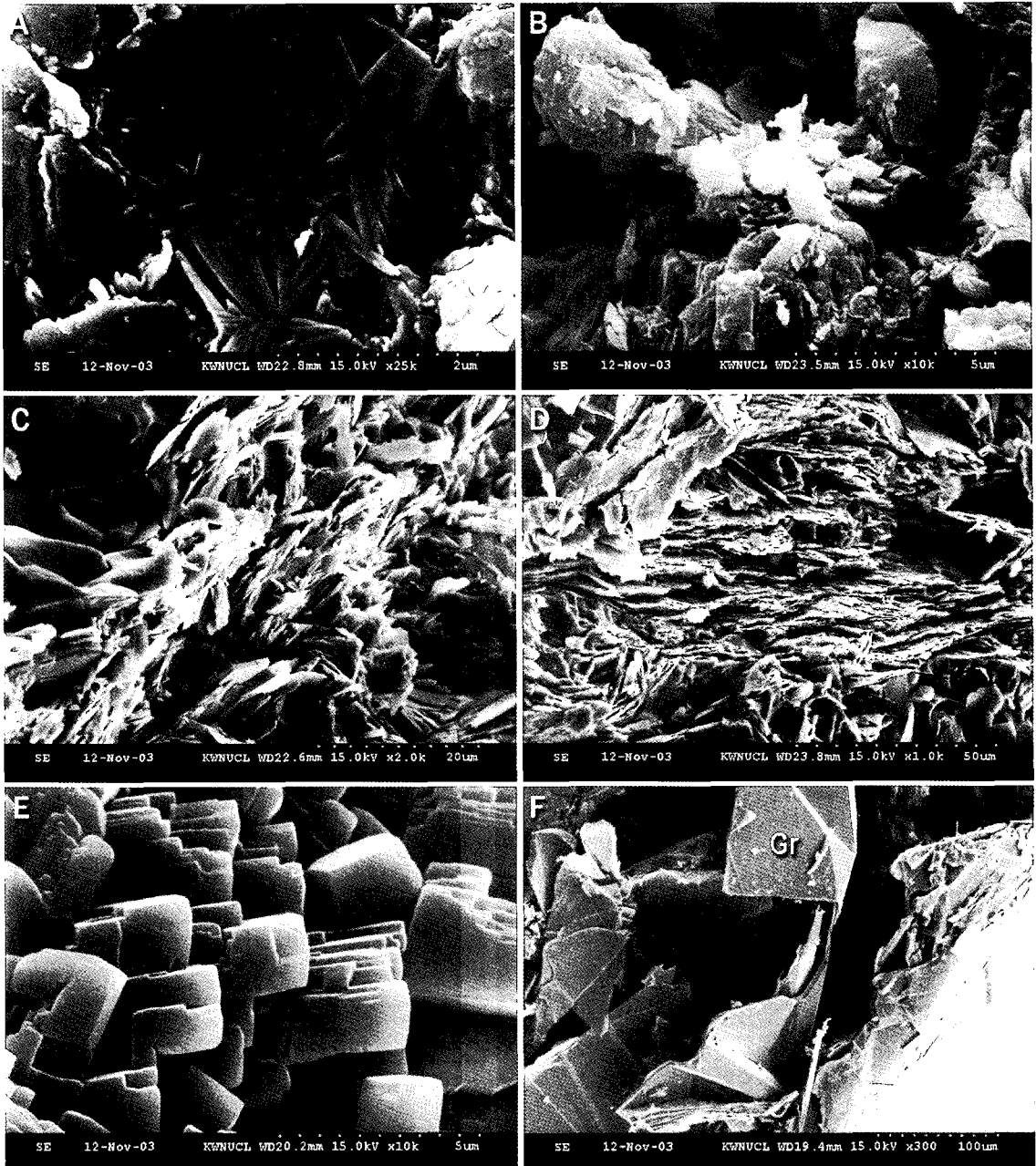


Fig. 5. SEM images showing the fine impurities found in the high-ca limestones. A. Goethite fibers in the micro-cavities in the micro-crystalline calcite type ore. B. Minute authigenic crystals of quartz found in the micro-crystalline calcite type ore. C. An aggregate of platy clinocllore in the micro-crystalline calcite type ore. D. Illite and clinocllore assemblage in the micro-crystalline calcite type ore. E. Rhombohedral calcite crystals found in the micro-crystalline calcite type ore. F. Graphite (Gr) found in the coarse-crystalline marble type ore.

dite) 등이 함유되고, 부수적으로는 침철석(goethite), 황철석(pyrite) 및 Pb-Zn 계열의 황화광물이 2차적 변질물로서 흔히 수반된다(그림 4). 저온형 광석에서는 주로 단사녹니석-투각섬석 광물상이 특징적이고, 보다 고온형에서는 석류석-규회석 광물상이 관찰된다. 이외에 석영도 이들과 함께 흔히 수반되는 불순물이다. 특히 일라이트는 특징적인 열수변질물로서, 스카른 형성과 관계없이 풍촌층의 석회석에서 흔히 수반된다.

고품위 석회석의 화학조성

X-선형광 분석법(XRF)으로 분석된 화학성분들 중에서 주요 성분인 CaO는 광석의 유형별로 조금씩 차이가 나지만 대개 52 wt.% 이상의 높은 함유 수준을 나타낸다(표 1). 거정질 방해석형의 경우, CaO의 함량이 평균 50.4 wt.%로써 다른 광석 유형들(미정질 방해석형: 53.0 wt.%, 결정질 석회석형: 53.3 wt.%, 방해석질 대리암형: 53.2 wt.%)에 비해서 상대적으로 낮은 함량을 나타낸다. 전반적으로 제천-단양 지구의 결정질 석회석이 가장 높은 수준의 CaO 함유도를 보인다. 반면에 MgO의 함량은 거정질 방해석형이 1.05 wt.%로써 결정질 석회석형(0.61 wt.%), 미정질 방해석형(0.69 wt.%) 및 방해석질 대리암형(0.61 wt.%)에 비해서 상대적으로 높다. 이는 거정질 석회석이 불순광물로서 Mg를 주성분으로 갖는 백운석, 투각섬석 등을 다른 유형들보다 상대적으로 많이 함유하기 때문인 것으로 해석된다. 또한 국내산 석회석들은 대부분 Fe₂O₃의 함량이 전반적으로 낮은 것으로 분석되었다. 그렇지만 열수기원의 풍촌층 석회석들 중에서는 황철석 등과 같은 황화 금속광물들이 열극이나 이질부에 농집되어 있는 경우가 흔히 있기 때문에 광석에 따라 Fe, Pb, Zn 등과 같은 중금속 광물들이 수반될 개연성을 배제할 수 없는 상황이다.

석회석이 인체와 관련된 충전 및 충전재 용도로서 사용될 경우에는 Pb와 같은 중금속 원소들의 농도가 0.01% 이내로 제한되어야 하는 것으로 알려져 있다(Harben, 1999). 이에 따라 중탄 용으로 많이 개발되고 있는 풍촌층에서 산출되는 고품위 석회석을 대상으로 광석의 유형별로 Pb의 함량을 ICPS 분석법으로 분석해 본 결과,

이 석회석들의 Pb 함량은 평균 3.7 ppm 정도로 매우 낮은 수준임이 확인되었다(표 2). 광석 유형별로 Pb를 제일 많이 함유하는 방해석질 대리암의 경우에서도 13 ppm 정도로써 선진국 허용 기준치를 고려할지라도 적어도 풍촌층 석회석에서는 전혀 문제될 사안이 아닌 것으로 판단된다. 다른 중금속 원소들에 비해서 국내산 석회석들은 상대적으로 Ni (10~45 ppm)을 비교적 많이 함유하는 것으로 분석되지만, 이는 플라스틱 충전재로서의 품질과 관련하여 주요한 유해 성분이 아닐뿐더러 그 절대 농도도 우려할만한 수준이 아닌 것으로 여겨진다.

결정도 및 기타 물리적 특성

결정도(crystallinity)와 결정 입도(crystal size)는 석회석의 품질에 영향을 주는 광물특성이다. 고품위 석회석의 가공 및 응용에서 석회석을 구성하는 방해석 결정의 크기나 결정 내의 벽개나 쌍정의 발달 사항 등이 분체 효율 및 형상 그리고 소성 효과 등에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 원광 상태에서의 방해석 결정의 크기는 석회석의 중요한 품질요건으로 취급될 수 있다(노진환과 최진범, 2002). 이 같은 석회석의 품질평가의 주요 기준인 방해석 결정립들의 입도분포를 영상분석 시스템을 사용하여 분석해 보았다(그림 6). 분석결과 국내산 고품위 석회석들의 입도분포는 단순형(simple form), 이중형(bimodal form) 및 복합형(complex form)의 세 가지의 유형으로 구분된다.

광석의 유형별로 나누어서 살펴보면, 결정질 석회암형 내 방해석 결정의 평균 크기는 0.02~0.08 mm 내외로 분포하며 대부분 단순형으로 나타난다. 미정질 석회석은 0.05~0.3 mm인 세립의 방해석 결정들로 이루어진 단순형으로, 현미경 하에서 관찰하면 주로 등립상의 방해석으로 이루어지기 때문에 단순형으로 나타나는 것으로 여겨진다. 대리암형 광석의 입도 분포는 이중형 및 복합형의 두 가지 양상이 나타난다. 이에 비해서 거정질 방해석형 광석의 결정 입도는 cm 단위로서 현미경 하에서의 계측이 불가능한 상황이지만, 광석 절단면 상에서의 육안적 측정 결과에 의하면 그 입자 분포는 대개 1~15 cm 범위에 놓인다

고품위 석회석에서 방해석의 결정형, 쌍정이

Table 1. Chemical analyses (wt.%) determined by XRF method for some domestic high-Ca limestones

Locality	Sample No	Chemical Composition											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
Uljin - Andong	CM-ID1	1.82	0.37	0.00	0.00	0.00	1.12	52.94	0.00	0.01	0.02	43.19	99.47
	CM-ID2	1.72	0.36	0.00	0.00	0.00	0.87	52.94	0.00	0.01	0.02	43.23	99.15
	CM-DJ	2.24	0.46	0.00	0.00	0.01	2.54	50.47	0.13	0.07	0.00	43.54	99.50
	MI-YP	3.51	0.85	0.02	0.30	0.05	1.27	52.42	0.14	0.19	0.24	42.28	101.26
	ME-SD1	2.29	0.42	0.00	0.00	0.00	0.63	53.25	0.09	0.01	0.01	43.20	99.91
	ME-SD2	7.17	0.60	0.00	0.00	0.00	1.01	53.60	0.07	0.01	0.02	38.81	101.29
Jecheon - Danyang	CL-DJ1	1.80	0.37	0.00	0.00	0.00	0.66	54.06	0.00	0.02	0.01	43.12	100.04
	CL-DJ2	1.95	0.53	0.00	0.01	0.00	0.70	53.84	0.00	0.08	0.00	43.23	100.33
	CL-DJ3	2.08	0.36	0.00	0.06	0.00	2.01	52.48	0.00	0.01	0.00	43.48	100.49
	CL-CY1	2.43	0.35	0.00	0.00	0.00	0.58	53.94	0.00	0.01	0.00	42.98	100.28
	CL-CY2	1.67	0.37	0.00	0.00	0.00	0.62	52.39	0.00	0.01	0.00	41.23	96.29
	CL-DD1	1.73	0.38	0.00	0.00	0.00	0.57	50.73	0.00	0.02	0.00	42.86	96.29
Samcheok - Taebaek - Jeongseon	OL-DP	0.20	0.11	0.00	0.33	0.02	3.46	51.96	0.00	0.03	0.05	42.60	98.75
	ME-DC	1.72	0.37	0.00	0.00	0.01	1.72	51.04	0.00	0.02	0.00	43.13	98.01
	ME-SU	1.92	0.42	0.00	0.02	0.01	1.67	50.95	0.00	0.04	0.00	43.03	98.05
	MI-KD	1.69	0.39	0.00	0.00	0.00	0.54	52.62	0.00	0.03	0.00	43.24	98.51
	MI-CM	1.70	0.41	0.00	0.00	0.00	0.67	54.51	0.00	0.04	0.00	42.64	99.98
	MI-SD	1.65	0.38	0.00	0.00	0.00	0.56	54.26	0.00	0.02	0.00	42.83	99.70
	MI-SO1	2.27	0.40	0.00	0.00	0.00	0.63	53.21	0.00	0.03	0.00	42.77	99.31
	MI-SO2	1.69	0.38	0.00	0.00	0.00	0.55	54.11	0.00	0.02	0.00	41.63	98.38
	MI-SS	2.10	0.42	0.00	0.00	0.00	0.56	53.23	0.05	0.01	0.00	43.33	99.70
	MM-DA	1.65	0.37	0.00	0.00	0.00	0.55	52.41	0.00	0.02	0.00	43.32	98.33

CL: Crystalline limestone type, MI: Micro-crystalline calcite type, ME: Mega-crystalline calcite type, MM: Micro-crystalline marble type, CM: Coarse-crystalline marble type.

Table 2. Concentrations (ppb) of trace elements and heavy metals of some domestic high-Ca limestones

	Samcheok-Taebaek-Jeongseon Area										
	CM-DA	MI-SW	MI-SS	MI-CC	MI-TS	MI-DS	MM-TY	MM-SH	ME-DS	ME-CM	ME-CM
Be	<50.00	102.49	319.61	68.34	54.29	14.74	82.44	18.15	1.32	112.95	70.54
Co	2170.66	1528.40	2775.70	3912.05	3677.80	3733.98	3839.33	3975.33	4114.41	3854.37	4032.44
Ni	33311.47	31467.06	22480.36	45310.72	42755.79	43826.14	43815.59	46542.33	46187.42	36056.31	39966.96
Cu	9680.77	10249.27	4134.73	3619.62	3993.97	1863.69	2988.93	3395.11	14701.18	12360.14	10474.18
Mo	77.57	80.92	60.26	23.22	87.89	17.93	34.35	6.56	35.43	185.28	87.28
Pb	3222.91	5987.73	4409.02	9636.04	6293.49	6903.90	3559.00	4932.28	2129.51	2927.84	2248.03
Th	165.35	101.29	751.02	46.32	28.58	<15.0	26.76	<15.0	<15.0	312.44	31.95
U	78.77	65.33	1046.24	76.32	154.26	86.58	49.53	48.94	87.20	293.61	113.65

	Uljin-Andong Area						Jecheon-Danyang Area				
	CM-ID	CL-YP	CL-PH	ME-SD	CM-DJ	CM-ID	CL-DJ	CL-CJ	CL-CY	CL-BY	CL-DD
Be	<50.00	209.92	123.99	109.68	73.57	79.97	<50.00	<50.00	<50.00	117.92	<50.00
Co	1405.96	2157.33	2585.98	1835.22	1987.22	1931.02	1850.22	1955.94	1907.67	1861.60	1749.38
Ni	29320.91	35113.89	39186.95	10266.73	15183.85	8787.73	43792.54	42458.13	44141.99	44534.67	41299.85
Cu	4950.91	5803.00	14052.91	5591.24	11750.24	4875.18	3231.88	4931.58	9013.61	4357.69	3528.82
Mo	170.64	83.80	100.64	249.38	174.89	90.67	198.24	88.26	251.89	96.97	93.78
Pb	1526.13	4435.99	3851.58	2153.40	3664.71	1324.11	1267.52	3756.83	7593.66	1969.34	1502.91
Th	124.97	742.98	383.59	124.38	203.72	218.98	159.79	215.87	248.18	276.55	201.99
U	368.91	175.02	86.70	409.95	380.17	2495.97	606.73	286.23	580.33	480.06	224.83

CL: Crystalline limestone type, MI: Micro-crystalline calcite type, ME: Mega-crystalline calcite type, MM: Micro-crystalline marble type, CM: Coarse-crystalline marble type.

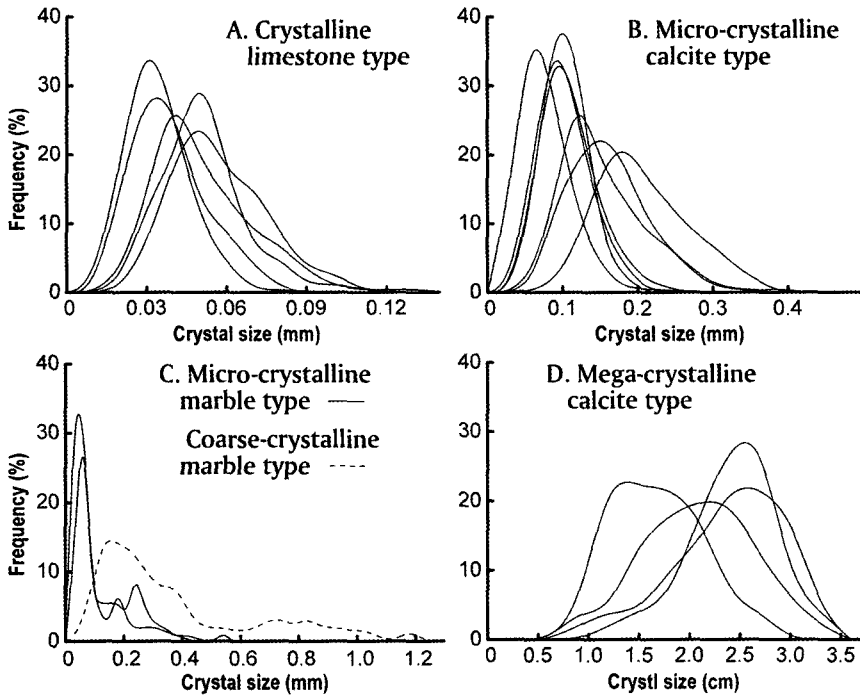


Fig. 6. Size distribution curves of various types of domestic high-Ca limestones.

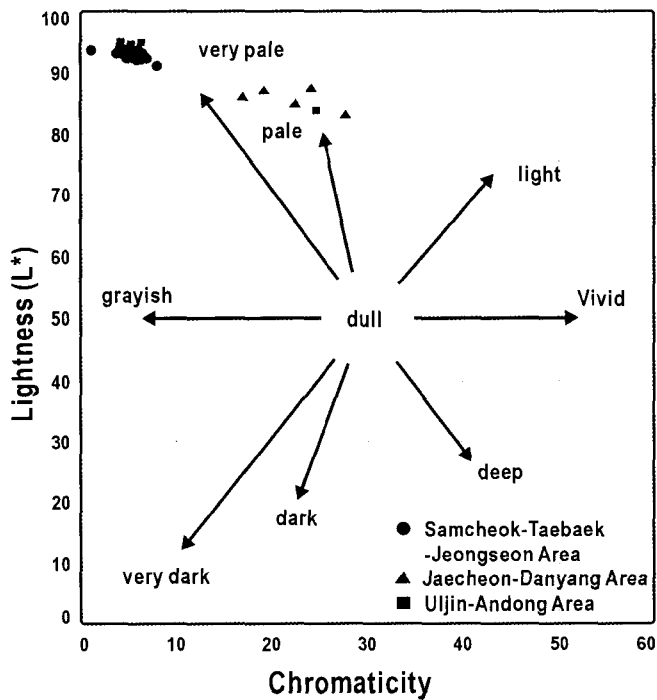


Fig. 7. A chromaticity diagram illustrating whiteness of some domestic high-Ca limestones.

나 벽개의 발달 정도는 전술한 바와 같이 분체 효과와 형상에 영향을 주기 때문에, 비표면적과 분체 형상이 중요시되는 용도에서는 주요 품질 기준이 된다. 주사전자현미경(SEM) 하에서 고품위 석회석을 구성하는 방해석들은 대부분 능면체 결정형을 이루는 것으로 나타난다. 벽개와 쌍정의 발달은 광석의 유형에 따라 조금씩 차이가 나는데, 거정질 석회석의 경우처럼 조립질 방해석 결정에서 벽개와 엽리 쌍정(lamellar twin)이 잘 발달되는 것으로 나타난다. 그렇지만 쌍정면이 다소 만곡되어 있거나 중첩되어 나타나기도 한다.

· 고품위 석회석의 백색도

고품위 석회석에서 백색도는 석회석의 분체의 물성이 산업에 응용되는 이른바 ‘중탄용’ 용도에서 중요한 품질기준이 된다는 것은 주지의 사실이다. 분체상 석회석의 백색도 저하에 영향을 주는 것은 무엇보다도 특별한 조흔색(streak color)을 갖는 불순광물들의 존재와 그 함유 정도일 것으로 여겨진다. 즉, 검은 색조의 조흔색을 갖는 금속광물들과 흑연을 포함한 탄질물 등이 주요 영향 인자로 알려져 있다(Harben, 1999; Harben and Kuzvart, 1999; Chang, 2002).

이 같은 석회석의 백색도를 표준색도계를 이용하여 $75 \mu\text{m}$ 입도에서 측정하여 광석 유형별로 그 색도와 광도를 색차계 상에 도시해 보았다(그림 7). 측정된 모든 시료들이 90 이상의 높은 백색도를 보였지만, 석회석의 산출지별로는 분명한 차이를 보인다. 즉, 열수변질과 변성작용의 영향이 큰 풍촌층 석회석과 울진-안동 지역의 변성퇴적암류에서 산출되는 석회석들에 비해서, 제천-단양 지구의 결정질 석회암 유형의 석회석들은 상대적으로 현격히 백색도가 떨어지는 것으로 나타난다. 이는 이 지역의 석회석들이 열수변질의 영향을 덜 받았기 때문에 원암에서 유래된 탄질물을 상당량 포함하고 있기 때문인 것으로 여겨진다.

토 의

고품위 석회석의 용도는 광석의 화학 조성, 광물상, 결정도 및 기타 물성 등에 의해서 평가되어야 함에도 불구하고(표 3), 그 동안 너무 특

정 화학성분 즉, CaO와 철분 함량 등에 너무 의존되어 온 경향이 있다. 고품위 석회석의 주된 용도인 금속제련, 석회제조, 충전·충진재, 탈황 공정 및 석고제조 등의 산업공정에서 알 수 있는 바와 같이, 고품위 석회석의 응용은 대부분 CaO가 아닌 석회석의 주성분 광물인 방해석, 즉 CaCO_3 의 상태로 이루어진다. 따라서 석회석의 품위는 당연히 방해석의 함량을 기준으로 평가되어야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 국내에서는 화학분석치의 도출과 이해 측면에서의 편이성 때문에 아직도 이에 대한 인식이 결여되어 있는 실정이다. 이에 따라 그동안 관련 업계에서는 개발 및 가공 과정에서 밖으로는 잘 드러나지 않는 생산성 저하 및 경제적 비효율성이 초래되었던 것으로 여겨진다. 이는 궁극적으로 국가적 차원에서 한정된 부존 규모일 수밖에 없는 석회석 자원에 대한 효율적 개발 및 자원 관리가 제대로 이루어지지 않는 결과를 가져다 주는 격이 될 것이다.

국내산 고품위 석회석은 전술한 바와 같이 다양한 지질배경 하에서 산출되기 때문에 그 조성 및 특성 면에서도 다양한 양태를 보인다(표 4). 우선 지역적으로 제천-단양 지구의 고품위 석회석들은 상대적으로 열수변질이나 변성 작용의 영향이 미약하여 대부분 결정질 석회암의 광석 유형을 이루며 (1) 낮은 결정도와 세립질 암상, (2) 비교적 높은 CaO 함량(50~54 wt.%) 및 (3) 낮은 백색도의 광석 특징을 갖는다. 이 같은 광물특성은 대체로 석회제조용이나 제철제강 용도 등으로 사용될 수 있는 소위 ‘소성용 석회석’으로서의 적합한 품위 및 품질 조건을 갖추었음을 지시한다. 이 지역에서 산출되는 석회석들 중에서 MgO와 Fe_2O_3 함유도가 상대적으로 높고 인(P)의 함량이 0.01 wt.% 이하로 적게 함유되는 광석은 석회제조용보다는 제철·제강을 포함한 일반적인 금속제련 용도로 사용하는 것이 바람직할 것이다. 또한 금속제련 용도로 사용할 경우에는 불순광물로서 석회규산염 광물의 혼재 정도가 가능한 한 적게 함유되는 광석을 사용해야 할 것으로 여겨진다. MgO와 Fe_2O_3 함유도가 상대적으로 낮고 황화광물의 함량이 낮은 갑산층 석회석들 중에서 상대적으로 고품위를 이루는 광석들은 석회제조용이나 배연탈황용으로 적합할 것으로 판단된다. 그렇지만 이 지역에서 산출되는 고품위 석회석일지라도 열수변질의 영

Table 3. Specifications of the grade and quality for high-Ca limestone (modified after Harben, 1999 Chang, 2000)

		Major Application Fields				
		Metallurgical Flux	Flue Gas De-sulphurization	Filler & Extender	Glass Manufacture	Lime Manufacture
Chemical Controls	CaCO ₃	> 97.0% (CaCO ₃ + MgCO ₃)	85 ~ 95%	> 96.0%	> 54.8% (CaO)	> 95.0% (CaCO ₃)
	MgO		<5%	0.5-1.5% (MgCO ₃)	<0.8%	<1.0%
	SiO ₂	<0.1%	<2%	negligible	negligible	<1.0%
	Al ₂ O ₃	negligible	<1%	negligible	<0.35%	negligible
	Fe ₂ O ₃	negligible	<1%	<0.1%	<0.07%	<0.03
	Others	P: <0.02%	MnO ₂ : <0.02% Cl: <1000ppm	Very low in free carbon, Cu, Pb & Mn content	Sulfate:<0.05% Free carbon: <0.1%	minimal sulfur content
Mineralogical & Other Physical Controls		Finer crystallinity, Resistant to decrepitation on heating	Free of clays, metallics & organics, Fine size (<45 μm) required	Good white color, High reflectivity & surface area, Specific particle size & shape	Critical contaminants: colorants (Cr, Co, Mn) & metallics	Finer crystallinity, Resistant to decrepitation on heating, Free of clays & sulfur minerals

향으로 국지적으로는 결정도가 큰 석회석이 산출되기도 하는데, 이럴 경우에는 공정상 소성 효율이 떨어지므로 가급적 다른 용도(중탄용)로 사용해야 할 것이다.

삼척-정선-영월 지구에서 산출되는 고품위 석회석들은 열수변질 및 스카른 광화작용의 영향으로 광석의 유형과 특성이 다양하다. 삼척 도계 지역에 한정되어 개발되는 풍촌층 원암상의 흑색 석회석은 일부 층에서는 소규모로 고품위를 이루기도 하지만 대부분 백운석의 수반으로 인해 Mg를 많이 함유하는 저품위 광석이다. 따라서 이 석회석은 금속제련용으로 개발하는 것이 유리할 것으로 여겨진다. 태백-정선-영월 지역에서 주된 광체를 이루는 미정질 및 거정질 석회석은 전형적인 열수변질형 광석으로 결정도에서 현격한 차이를 보이고 높은 CaO 함유도 및 백색도를 보이는 것이 특징이다. 대개 CaO 52 wt.% 이상의 고품위 광석인 미정질 방해석형 석회석은 미세하면서도 균일한 결정도와 상대적으로 균질한 탄산염 광물상으로 보아 '소성

용'으로 사용되는 것이 바람직한 것으로 평가된다. 불순 성분들의 내용과 그 함유 정도로 보아 금속제련용 보다는 석회제조용이나 배연탈황으로 사용하는 것이 좋을 것으로 여겨진다. 특히 고순도(≥ 55 wt.%)를 이루는 미정질 방해석형 및 대리암형 광석들은 유리제조용 용체로서 사용이 가능할 것으로 여겨진다. 이에 비해서 거정질 방해석형 석회석은 그 광물특성, 즉 높은 결정도와 백색도의 특성상 소위 '중탄용'으로 사용되어야 할 것이다. 일반적인 충전 및 충전재로서 적당한 품위와 품질을 지닌 것으로 평가되지만, 제지용으로 사용할 경우에는 황화광물이 적게 함유되고 가급적 벽개나 쌍정이 보다 잘 발달하는 광석을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 이는 석회석의 마광 과정에서 미분체의 백색도와 형상에 영향을 주기 때문이다.

울진-안동 지구의 변성퇴적암류에서 산출되는 석회석들은 그 광상 유형에 따라 품위와 품질면에서 현격한 차이를 보인다. 열수변질 및 스카른형 광산인 울진의 삼도광산에서 산출되는

Table 4. Ore characteristics and industrial uses of some domestic high-Ca limestones

Area	Mine Name	Deposit Type	Ore Type	Color	Common Associated Minerals	CaO (wt.%)	Suggested Uses
Samcheok - Taebaek - Jeongseon	Donghae	D	CL	blackish, pale gray	dolomite	51.9~53.0	MF
	Samdo	D	CL, MI	blackish, pale gray	dolomite	53.0~53.8	MF
	Cheongsam	D, H	CL, MI	blackish, light gray	dolomite	51.6~55.9	MF
	Kyeongdong	H	MI	light to pale gray	dolomite, illite, pyrite	51.8~52.6	F&E
	Yongyeon	H	MI, MM	milky white	dolomite, illite	51.1~56.5	LM, F&E
	Deokam	H	MI, MM	milky white	dolomite, illite, quartz	52.4	F&E
	Sindong	H	MI	light gray	dolomite, illite, quartz, pyrite	53.0~54.3	LM
	Seongsin	H	MI	beige-white	dolomite, illite, goethite	52.1~53.8	LM, F&E, GM
	Chungmu	H	MI	light to pale gray	dolomite, illite, clinochlore, tremolite	50.7~54.5	LM, F&E
	Daedong	H	MI	pale gray	dolomite, illite, tremolite	51.4~52.8	LM
	Songwon	H	MI	light to pale gray	dolomite, illite, pyrite	54.9	F&E,
	Seongwoo	H	MI, ME	light to pale gray	dolomite, diopside, quartz, clinochlore	51.0~52.3	F&E
	Okdong	H	MI	light to pale gray	dolomite, quartz, tremolite	53.0~55.2	MF
	Sangdong	H, S	ME	whitish to light gray	dolomite, illite, quartz	51.0~54.7	F&E, GM
	Seojin	H, S	ME	light to pale gray	dolomite, clinochlore, grossular, wollastonite	50.1~53.1	F&E
Dongsin	H, S	ME	light to pale gray	dolomite, tremolite, diopside, quartz, brucite	50.5	LM	
Nammyeong	M	CM	whitish to light gray	dolomite, tremolite, quartz, chalcopryrite	52.3~54.5	F&E	
Jecheon - Danyang	Jecheon	D, H	CL	dusky to pale gray	quartz, tremolite, illite	51.9~54.1	MF, LM, FGD
	Yeongwol	D, H	CL	dusky gray	dolomite, quartz, ankerite	50.4~53.9	LM
	Cheongye	D	CL	dusky to pale gray	quartz, dolomite	50.2	MF, LM
	Danyang	D	CL	dusky to pale gray	quartz, dolomite	50.4~50.7	LM, MF, FGD
Andong - Uljin	Pyeonghae	D, H	CL	dusky to pale gray	illite, quartz, diopside, tremolite	44.6	MF
	Samdo	H, S	ME	whitish to light bluish white	grossular, rhodonite, wollastonite	53.3~53.6	F&E
	Imdong	H, M	ME	whitish to light gray	graphite, quartz, dolomite	52.9	F&E
	Daewoo	H	ME	light to pale gray	dolomite, graphite	45.8	F&E
	Odae	H	ME	light to pale gray	dolomite, quartz	46.3	F&E

D: Diagenesis, H: Hydrothermal, S: Skarnization, M: Metamorphism, CL: Crystalline limestone type, MI: Micro-crystalline calcite type, ME: Mega-crystalline calcite type, MM: Micro-crystalline marble type, CM: Coarse-crystalline marble type, F&E: Filler and Extender, FGD: Flue Gas Desulphurization, MF: Metallurgical Flux, LM: Lime Manufacture.

석회석은 (1) 높은 결정도, (2) 고순도의 CaO 함량(평균 53 wt.% 정도) 및 (3) 높은 백색도의 특징을 나타낸다. 따라서 이 석회석은 '중탄용'으로 적합하여 부가가치 높은 방면의 충전 및 충전재로서 활용되어야 할 것이다. 이 보다는 CaO 함량이 떨어지지만, 비교적 고품위를 이루는 안동 지역의 조립질 대리암형 광석들은 일반적인 용도의 중탄용 소재로서는 사용이 가능할 것으로 여겨진다. 그러나 제지 용도와 같이 높은 백색도를 필요로 하는 부문으로 활용할 경우에는 흑연질 불순물의 존재로 인해 품질상 다소 어려움이 수반될 것으로 평가된다. 평해 지역의 광산처럼 비교적 변성도가 낮고 저품위를 이루는 석회암 원암형의 광석은 그 결정도나 불순물 내용으로 보아 '소성용' 그 중에서도 제철·제강용으로 한정되어 사용될 수밖에 없을 것으로 여겨진다.

석회석의 화학조성은 원천적으로 그 광물조성에 의존되는 사항이지만, 특정 화학성분의 함유도가 반드시 특정 광물의 함량을 지시하지 않는다는 것은 상식에 관한 사안일 것이다. 예를 들어, CaO의 함량이 반드시 방해석의 함유 수준을 의미하는 것으로 볼 수는 없고, 석회석에서 불순물로 간주되는 백운석, 투회석, 규회석 등 대부분의 석회규산염 광물들에서도 유래된다. 따라서 석회석의 화학조성을 따지기에 앞서 석회석의 암상과 광물상을 편광현미경 하에서 관찰하는 것이 광석평가 기술의 주요 사안이 되어야 할 것이다. 또한 현미경 조사를 통해서 석회석 품질 평가에 주요 사안인 결정 입도를 정량적으로 해석할 수 있다는 점을 감안하면, 이 같은 응용광물학적 광석특성 평가방식의 당위성은 더욱 제고될 것으로 생각된다.

결 론

1) 국내산 고품위 석회석은 그 지질 배경과 광상 유형에 따라 제천-단양 지구, 삼척-태백-정선 지구 및 울진-안동 지구로 구분된다. 제천-단양 지구의 갑산층과 영흥층에서 산출되는 석회석은 원암의 암상이 일부 보존된 결정질 석회암의 형태를 이루고, 속성변질 내지 미약한 열수변질의 영향을 받은 암상과 광물상을 이룬다. 삼척-태백-정선 지구의 풍촌층 상부에 부존되는 고품위 석회석은 전형적인 열수변질과 스카른

광화작용의 영향으로 대부분 재결정된 암상과 광물상을 보이는 것이 특징이다. 이에 비해서 울진-안동 지구의 석회석은 주로 변성작용에 의해서 형성된 암상을 보이지만, 일부 지역에서는 고도의 열수변질 내지 스카른 광화작용에 의해서 생성되기도 한다.

2) 국내산 고품위 석회석은 광물조성, 화학조성, 결정도 및 광물상의 차이에 따라 결정질 석회암형, 대리암형, 미정질 및 거정질 방해석 유형으로 구분된다. 결정질 석회암형은 원암에서 잔류된 백운석, 석영, 탄질물 등과 같은 퇴적기원의 불순물들을 함유하는 것이 특징이다. 이에 비해서 열수변질에 의해서 형성된 미정질 및 거정질 방해석형 광석들은 일라이트, 단사녹니석 및 황화 금속광물들이 특징적인 불순 광물상을 이룬다. 대리암형은 변성작용의 영향으로 흑연 및 스피나 같은 특징적인 변성광물들이 수반된다. 또한 고품위 석회석 광체 내에서 석회규산염 광물들, 즉 투각섬석, 투회석, 규회석, 석류석 등이 열수변질과 변성작용의 정도에 따라 흔히 수반된다.

3) 제천-단양 지구의 고품위 석회석들은 낮은 결정도와 세립질 암상, 비교적 높은 CaO 함량 및 낮은 백색도의 광석 특성을 갖는다. 삼척-태백-정선 지구에서 산출되는 미정질 및 거정질 석회석은 전형적인 열수변질형 광석으로서, 결정도에서 서로 현격한 차이를 보이고 높은 CaO 함유도 및 백색도를 보이는 것이 특징이다. 특히 이 지역의 주된 광체인 미정질 방해석형 광석은 미세하고 균일한 결정도와 비교적 균질한 조성을 이룬다. 울진-안동 지구의 변성퇴적암류에서 산출되는 석회석들은 그 광상 유형에 따라 품위와 품질 면에서 현격한 차이를 보인다.

4) 국내산 고품위 석회석들은 다양한 산출배경 및 생성기작을 가지므로 그 광물 조성, 결정도 및 조직 등에 있어서 석회석의 품위 및 품질과 관련하여 상당한 차이를 보인다. 따라서 국내산 석회석의 부가가치를 증대시키기 위해서는 석회석을 단순한 암석이 아닌 광석의 관점에서 그 응용광물학적 특성들을 상세히 취급하는 지혜가 요구된다. 이 같은 맥락에서 국내산 고품위 석회석의 광물특성과 화학조성상의 특징에 의거하여 지역별로의 광석 유형을 평가하고 이에 따른 적절한 개발 용도를 제시하였다.

사 사

이 연구는 2003년도에 이루어진 대한광업진흥공사의 위탁연구사업과 한국과학재단의 특수연구소재은행 사업(산업광물은행)의 일환으로 수행되었다. 현지조사 과정에서 협조해준 대한광업진흥공사 및 석회석광산 관계자들에게 감사한다. 이 연구에 필요한 화학분석(XRF 및 ICPS)을 대행해준 기초과학지원연구원 서울분소의 윤혜은 박사와 박찬수 박사를 비롯한 연구원들께도 감사한다. 이 논문의 심사 과정에서 유익한 지적과 조언을 해주신 김건영 박사와 황진연 교수에게 감사드린다. 또한 이 논문 준비 과정에서 자료정리를 도와준 강원대학교 광물학연구소의 학생들에게 사의를 표하고자 한다.

참 고 문 헌

노진환, 오성진, 이나경 (2004) 풍춘층 석회암의 열수 변질과 고품위 석회석의 생성, 2004 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, 81.
대한광업진흥공사 (2002) 정밀조사보고서 (석회석: 영월-토교 및 제천 두학 지구). 대한광업진흥공사 자원탐사처, 82p.

장병두, 손길상 (2002) 국내 고품위 석회석의 부존특성 및 개발현황, 석회석과 그 응용, 제3회 산업광물심포지움 논문집, 15-31.
노진환, 최진범 (2002) 석회석의 품위 및 품질 개념과 그 평가방안, 광물과산업, 15, 1-14.
Chang, L.L.Y. (2002) *Industrial Mineralogy: Materials, Processes, and Uses*. Prentice Hall, 472p.
Harben, P.W. (1999) *The Industrial Minerals Handbook*. Industrial Minerals Information LTD., 296p.
Harben, P.W. and Kuzvart, M. (1999) *Industrial Minerals: A Global Geology*. Industrial Minerals Information LTD., 462p.
Harrison, D.J. (1992) Limestone, *British Geological Survey*, 38-40p.
Taylor, J.C. (1991) Computer programs for standardless quantitative analysis of minerals using the full powder diffraction profile. *Powder Diffraction*, 6, 2-9.
Taylor, J.C. and Hinczak, I. (2001) *Rietveld made easy: A practical guide to the understanding of the method and successful phase quantification*, 201p.

2004년 11월 30일 원고접수, 2004년 12월 17일 게재승인.