충남 청양군 비봉광산 사문암체의 산상과 구성광물

Occurrence and Mineralogy of Serpentinite from Bibong Mine in Chungyang Area, Korea

박 기 남(Ginam Park) · 황 진 연(Jinyeon Hwang)* ·
오 지 호(Jiho Oh) · 이 효 민(Hyomin Lee)

부산대학교 자연과학대학 지질환경학과

(Department of Geological Sciences, College of Natural Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)

요약 : 우리나라에는 약 6개소의 사문석광산이 존재하였으며, 그 중에 최근까지 채굴되었던 충남지역의 비봉광산에 대하여 구성광물의 산출상태, 특성 및 성인을 검토하였다. X-선회절분석, X-선형광분석, 주사현미분석, 전자현미분석, 적외선분광분석, 편광현미경관찰 등을 통하여 사문석의 광물학적 특성을 조사하였다. 비봉광산의 사문암체는 선캄브리아기의 변성퇴적암을 관입한 형태로 소규모로 분포하여 나타나며, 사문석, 포스터라이트, 휘석, 투각섬석, 자철석, 녹니석, 운모, 활석, 돌로마이트 등의 다양한 광물들이 산출되었다. 사문암체의 광물조합은 크게 A) 사문석-포스터라이트, B) 사문석, C) 사문석-녹니석(버미쿨라이트), D) 사문석-투각섬석, E) 투각섬석-녹니석의 5가지로 구분되어 나타났다. 사문석광물은 리자르다이트와 안티고라이트가 주로 포함되며 크리소타일은 일부 부분적으로 포함되어 산출되는 것으로 나타났다. 사문암체의 구성광물과 그 산출상태로 보아 포스터라이트를 주성분으로 하는 초염기성암의 열수변질작용에 의해 사문석이 형성되었으며, 그후 2차적인 열수작용에 의해 녹니석과 투각섬석 등의 변질광물이 형성된 것으로 나타났다.

주요어 : 사문석, 사문암, 투각섬석, 포스터라이트, 초염기성암, 열수변질작용, 크리소타일

ABSTRACT : Six serpentine mines are found in South Korea. We investigated occurrence, characteristics and origin of constituent minerals of Bibong serpentine mine in Chungcheongnam-do. We also analyzed the properties of serpentine minerals using XRD, XRF, SEM/EDS, FT-IR, EPMA and polarized microscope. The serpentinite of Bibong mine occurs as intruded body within the Precambrian metasedimentary rocks. Various minerals such as serpentine, forsterite, pyroxene, tremolite, magnetite, chlorite, mica, talc and dolomite are occur. Five distinctive mineral assemblage types are observed in the serpentinite: (A) serpentine-forsterite, (B) serpentine, (C) serpentine-chlorite (vermiculite), (D) serpentine-tremolite, (E) tremolite-chlorite. Lizardite and antigorite are mainly occurred as serpentine minerals and chrysotile is partly included. From the study of mineral compositions and occurrence of serpentinite body, serpentine formed by hydrothermal alteration of ultramafic rock consisting mainly of forsterite, and altered minerals such as chlorite and tremolite subsequently formed by secondary hydrothermal alteration.

Key words : serpentine, serpentinite, tremolite, forsterite, ultramafic rock, hydrothermal alteration, chrysotile

*교신저자: hwangjy@pusan.ac.kr

서 언

사문석(serpentine)은 1:1형 층상규산염 광물로써 점토광물에 속하며, 사문석이 다량 함유되는 암석을 사문암(serpentine)이라 한다. 사문암의 어원은 밤하늘에 빛나는 뱀자리를 “Serpens”라고 하는데서 유래되었으며, 이 암석의 외관이 뱀의 껍질과 유사하여 사문암(蛇紋岩)으로 기술하게 되었다. 이 사문석은 특징적인 결정형태와 물리·화학적인 특성을 이용하여 제철소 용제 및 비료 등의 산업적 여러 용도로 사용되고 있다(황진연, 2002). 우리나라에는 지금까지 약 6개소의 사문석광산이 존재하고 있었으며, 이들 사문석들 역시 제철소의 용제와 비료 등으로 사용되었다. 현재 대부분의 광산들은 폐광되었고, 이 중 비봉광산은 안동광산과 함께 현재 채굴하고 있는 광산에 속한다. 비봉광산은 행정구역상 충청남도 청양군 비봉면 강정리에 위치한다. 본 광산은 1978년 2월 경기광업주식회사에 의해 최초로 광구로 등록된 이후, 2002년 성우환경산업(주)에 최종 이전되어 최근까지 채굴이 이루어지고 있다.

국내 사문석 광물에 관한 연구로는 울산 사문암체의 광물학적 지구화학적 연구(최수용 외, 1990), 안동지역 사문암 광상의 구성광물 및 성인에 관한 연구(황진연 외, 1993), 충남 예산-공주-청양지역의 초염기성암의 사문암화 작용(김진영과 김수진, 1997), 그리고 충남 월림-광시-비봉 사문석광상 사문암의 기원암과 사문석화작용(우영균 외, 2005a) 등이 있다. 이와 같이 비봉광산을 포함하는 사문암에 대한 광역적이고 개괄적인 연구는 수행된 바 있으나, 구성광물에 대한 자세한 광물화학적 연구는 아직 미흡한 상태이다. 또한 광산의 채굴 활동에 따라 채굴적의 범위와 형태가 크게 바뀌게 되었다. 따라서 이번 연구에서는 비봉광산에 나타나는 전체 사문암체에 대한 지질학적 및 광물학적 조사를 통하여 이곳에서 산출하는 구성광물의 종류, 특성과 분포 상태를 파악하고, 나아가 사문암의 형성과정을 검토하고자 한다.

연구방법

충남 청양군 비봉광산 지역에 대하여 지질조사를 수행하고 현재 채굴적의 모든 노두에 대한 광석 및 암석시료의 채취가 이루어졌다. 이들 시료를 건조시킨 후 분쇄하여 X-선분말회절분석을 실시하여

구성광물을 조사하였다. 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.

암석과 광석의 조직과 구성광물을 관찰하기 위하여 박편을 제작하여 편광현미경을 관찰하였다. 그리고 광물결정의 형태적 특성을 파악하기 위하여 미세 분말을 특정 굴절액에 침액한 후에 편광현미경의 관찰도 실시하였다.

그리고 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 광물 입자의 미세한 형태 및 구조를 관찰하였다. 장치는 한국기초과학지원연구원 부산센터의 Hitachi사 모델 S4800 FE-SEM을 사용하였고, 가속전압 15~20 KV, 10~15 mA의 측정조건으로 하였으며, 에너지 분산 분광장치(EDS)를 이용하여 정성분석을 행하였다.

사문석의 광물종 식별을 위하여 적외선분광분석(FT-IR)을 실시하였다. 장비는 한국기초과학지원연구원 부산센터의 Bruker사 Bruker IFS 66기종을 이용하였으며 스펙트럼 범위 $4,000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$, 해상도 0.1 cm^{-1} 의 조건으로 분석하였다.

대표적인 시료의 주화합성분 분석은 부경대학교 공동실험실습관에 설치된 SHIMADZU사 모델 XRF-1700의 X-선형광분석(XRF)을 통해 비드(bead) 정량법으로 분석하였다.

그리고 전자현미분석(EPMA)은 Cameca사의 SX100을 사용하였으며, 가속전압 15 KeV, 빔전류 20 mA, 빔직경 $1 \mu\text{m}$ 의 조건으로 이루어졌다.

미량원소 분석은 한국기초과학지원연구원 서울센터에 의뢰하여 ICP-MS 및 ICP-AES를 이용하여 분석하였다. ICP-MS는 Perkin Elmer사의 Elan 6100을 사용하여 아르곤 플라즈마 가스 유속 15 L/min, 보조 유속 1.2 L/min, 분무 유속 0.86 L/min, 방사 주파수 40 MHz, 해상도 0.75 AMU 조건에서 측정하였다. ICP-AES는 Jobin Yvon 138 Ultima 2를 사용하여 아르곤 플라즈마 6000 K, 스펙트럼 범위 160~800 nm, 해상도 0.005 nm (UV)의 조건에서 측정하였다.

광산지역의 지질과 광상의 배태상태

충남 청양군 일대 지역의 광역적인 지질에 대해서는 1:250,000의 대전지질 도폭(이병주 외, 1995)과 1:50,000의 홍성도폭(이종혁 외, 1963) 및 대

Fig. 1. Geological map of the Bibong Mine area (modified from Lee *et al.*, 1963 and Um *et al.*, 1963).

홍도폭(엄상호 외, 1963)에서 기재하고 있다. 이 지역의 지질은 주로 선캄브리아기 변성퇴적암류인 운모편암과 화강편마암이 분포하고 있으며, 곳에 따라 이들을 부정합으로 덮는 주라기의 남포층군이 분포하고 있다(그림 1). 지질도와 같이 비봉광산은 선캄브리아기 편마암층 내에 소규모의 관입 형태로 분포하고 있다. 이 지역에 나타나는 관입암체로는 대보 관입암류인 화강암류와 섬록암과 백악기의 반화강암, 중성암맥 및 페그마타이트 암맥 등이 존재하는 것으로 알려지고 있다(우영균 외 2005b). 운모편암은 광산의 서부에 분포하며, 주로 흑운모 편암으로 구성되어 있으며, 화강편마암은 이 지역에서 가장 넓게 분포하고 있다. 이들 선캄브리아기의 변성퇴적암들은 화강암, 섬록암 및 장석 반암 등의 관입을 받았으며 대체로 흑운모-각섬석 편암, 각섬석 편암, 규선석-녹니석 편암, 함흑연 흑운모편암, 흑운모-백운모편암으로 구성되어 나타난다. 선캄브리아기 변성암복합체를 주라기 퇴적암인 남포층군들이 부정합으로 덮고 있다.

비봉광산의 사문암체는 주변의 선캄브리아기 변성퇴적암인 운모편암 및 화강편마암 등과 단층 접촉되어 나타나며, 육안으로도 사문암체는 주변암과 암상 및 색 등의 특징들로 쉽게 구분된다. 광산의 채굴장 노두에서 관찰되는 사문암은 주로 흑색 내지 암회색을 띠고 있으며 부분적으로 담녹색 내지 암갈색을 띠기도 한다. 사문암체에는 다양한 크기의 염기성 암맥과 비교적 소규모의 불규칙적인 형태를 가지는 산성 암맥들이 관입하여 나타난다. 일

부 파쇄대나 암상의 경계부분에서는 백색의 세맥과 국부적으로 변질되어 점토화된 부분이 관찰된다. 이곳 사문암체에는 단층 작용에 의해 각력화된 파쇄대가 나타나기도 하며, 불규칙한 절리와 세맥들이 많이 발달되어 있다. 이곳의 사문암은 치밀하고 지방감을 띠는 것이 많고 부분적으로 세립의 입상을 보이는 것도 관찰되며, 표면에 불규칙적인 세맥의 집합을 보여주고 있는 사문구조도 관찰되기도 한다. 이들 사문구조는 사문암체 표면에서 국한되어 주로 나타났다. 사문암체의 분포상태는 긴 타원형으로 북북동 방향의 장축을 가지고 나타난다.

구성광물 및 광물조합

비봉광산의 채굴장에서 채취한 사문암체 시료들의 X-선회절분석의 결과, 사문석, 포스터라이트, 투각섬석, 자철석, 활석, 돌로마이트, 녹니석, 버미쿨라이트 등의 광물이 나타났다. 이들 구성광물들의 특성과 조합으로부터 A) 사문석-포스터라이트, B) 사문석, C) 사문석-녹니석(버미쿨라이트), D) 사문석-투각섬석-녹니석(버미쿨라이트), E) 투각섬석-녹니석의 5가지 광물조합으로 구분되었다. 자철석은 A, B, C, D 조합의 시료에서 사문석의 부수 광물로 부분적으로 소량 포함되어 나타난다. 활석은 투각섬석이 포함되는 일부 시료에서 수반되어 나타난다.

각 조합별 대표적인 X-선회절선을 그림 2에 나타냈다. A 조합은 사문석과 포스터라이트의 두 광

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of five distinctive mineral assemblage types (Ser; Serpentine, For; Forsterite, Chl; Chlorite, Tre; Tremolite).

물이 주를 이루며 그 상대적 함량은 시료에 따라 다양하게 나타난다. B 조합은 거의 대부분 사문석으로만 구성되어 있어 높은 품위의 광석에 해당된다. C 조합은 사문석이 가장 많은 함량을 나타내지만, 시료에 따라 녹니석이나 버미쿨라이트가 수반되며, 간혹 돌로마이트가 포함되는 시료도 있다. D 조합은 사문석과 함께 투각섬석과 녹니석을 포함하고 있으며 시료에 따라 버미쿨라이트와 활석이 포함되기도 한다. E 조합은 사문석광물이 거의 포함되지 않고 투각섬석을 주성분으로 하고 녹니석을 수반하며 일부 시료에서는 활석 및 돌로마이트가 포함된다. E 조합은 백색이나 담녹색 등을 띠는 시료로서 세맥이나 국부적인 변질부에 해당된다.

이들 5가지 광물조합의 시료에 대해 그 분포상태를 그림 3에 나타냈다. 이들 광물조합들은 일정한 경향성을 가지고 분포하기보다는 각기 분산되어 분포하는 경향을 보여 이것으로 변질분대를 나타내기 어렵다. 가장 많은 조합으로는 사문석을 주로 구성하는 B조합이 전 지역에 걸쳐 다수 분포되어 있다. 포스터라이트를 포함하는 A조합은 채굴장의 남동부의 일부에 비교적 많이 분포하고 있다. 그리고 투각섬석이 포함되는 D조합과 E조합은 채굴장의 북동부에 주로 분포하는 경향이 있다. 대

Fig. 3. A map showing locations of mineral assemblage types in serpentine body.

체적으로 A, B, C 조합은 남동부 채굴장에 많고, 반면에 D, E 조합은 북동부의 사문암체에 주로 나타난다. 이러한 분포는 사문암체의 형성과 변질과정과 관련이 있는 것으로 생각된다.

그리고 주변암과 암맥의 시료에서는 석영, 장석, 운모, 각섬석, 휘석, 녹니석 등의 광물이 포함되어 나타났다. 사문암체 내에 백색으로 산성 암맥 상을 보이는 부분에서도 석영, 장석, 운모 등이 주를 나타낸다. 관입된 염기성 내지 중성의 암맥들에는 사장석, 각섬석, 휘석, 녹니석 등의 광물이 포함되고 있다. 이와 같이 사문암의 구성광물과는 큰 차이를 나타낸다.

사문석의 광물학적 성질

사문암을 구성하는 사문석 광물로는 일반적으로 안티고라이트(antigorite), 리자르다이트(lizardite) 및 크리소타일(chrysotile)의 3가지 광물종이 주로 나타난다(Deer *et al.*, 1980). 이 중에서 크리소타일은 섬유상을 나타내는 석면광물로서 일명 온석면 혹은 백석면이라 불린다.

비봉광산의 사문암체에서 산출되는 사문석 광물을 검토하기 위하여 X-선회절선을 자세히 조사하였으며 Whittaker와 Zussman (1965) 및 Rucklidge와 Zussman (1965)의 자료를 토대로 비교분석하였다. 그림 4에는 사문석을 주로 하는 4개의 광석시

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of the serpentine ore samples (Ser; Serpentine, Dol: Dolomite).

료에 대한 X-선회절선을 나타냈다. 즉, 흑색내지 암갈색을 띠며 치밀하며 지방감을 보이는 BB 2-39 시료, 흑색으로 치밀한 광석인 BB 2-41 시료, 암 회색을 띠며 세립질 입상을 보이는 BB 35시료, 담 녹색을 띠며 지방감을 보이는 BB 44-1시료이다. 그림에서 보듯이, 먼저 큰 회절선을 보이는 7.3, 3.63 Å 등의 회절선은 모든 시료에서 비슷하게 나타났다. 2.53~2.50 Å 구간의 회절선에 대해서 시료에 따른 약간의 차이가 관찰되었다. 순수한 사문석의 경우 안티고라이트는 2.53 Å에 특징적인 강한 회절선이 나타나는데 이는 리자르다이트의 2.50 Å 이하의 강한 회절선과는 뚜렷이 구분되며 (Nemecz, 1981), 크리스타일은 2.59 Å에 특징적인 회절선이 나타나는 것으로 알려져 있다(下田右, 1985). 이러한 자료들과 비교해 볼 때, 이곳 사문석의 2.53 Å 회절선은 안티고라이트에 해당되는 것으로 생각되며, 2.50 Å 회절선은 리자르다이트에 해당되는 것으로 보인다. 그러나 크리스타일에 해당되는 2.59 Å 부근의 회절선은 잘 나타나지 않았다. 그림 4에서 BB 2-39 시료는 2.53 Å 회절선이 강하게 나타나지만, 다른 시료들은 2.50 Å의 회절선이 크게 나타났다. 따라서 BB 2-39 시료와 같이 안티고라이트가 다량 포함되는 시료도 있지만, 많은 시료에서 리자르다이트를 포함하는 것으

Fig. 5. FT-IR spectra of the serpentine ore samples.

로 생각된다.

모든 시료에서 7.3 Å 회절선의 반가폭(회절선 높이의 반에 해당되는 곳의 회절선의 폭)을 측정해 본 결과, 0.2~0.5° 2θ의 범위로 나타났다. 2.53 Å 회절선의 강도와 반가폭과의 관계를 검토한 결과, 2.53 Å 회절선의 강도가 큰 시료에서 반가폭이 다소 큰 결과가 나타났는데, 이에 대해서는 광물학적으로 더 많은 검토가 필요할 것으로 생각된다.

사문석 광물의 결정구조와 광물종 식별을 위하여 적외선분광분석(FT-IR)을 실시하였다. 전술한 사문석을 주로 포함하는 대표적인 시료 4개에 대해서 분석하였다. 그 결과, 모든 시료에서 유사한 흡수선을 나타냈으며, 그 중에서 큰 흡수선의 일부를 그림 5에 표시하였다. 그림에서 보듯이 OH의 신축진동에 해당되는 흡수선은 3,674~3,684 cm⁻¹ 범위로 유사하게 나타났다. 이 중에서 BB 2-39 시료는 다소 낮은 3,674 cm⁻¹ 흡수선을 나타냈는데, 이는 전술한 X-선회절분석에서 안티고라이트에 해당되는 2.53 Å의 회절선이 크게 나타난 시료이다.

Russell and Fraser (1994)의 연구결과와 비교해 볼 때 이들 흡수선은 리자르다이트와 안티고라이트의 흡수선에 가까운 것으로 나타났으며, 크리스타일의 3,694 cm⁻¹의 흡수선과는 다르게 나타났다. 이는 전술한 X-선회절분석의 결과와도 일치하고 있다.

박편의 편광현미경 관찰

사문암체의 대표적인 광석 및 암석에 대하여 박편을 제작하여 구성광물 및 조직을 편광현미경으로 관찰하였다. 사문석을 다량 함유하는 사문암의 현미경 사진에서는 직교 니콜 하에서 강한 색채의 간섭색을 가지는 입상의 감람석과 결정이 잘 관찰

Fig. 6. Photomicrographs of serpentinite: (A: close) and (B: open) showing relics of unaltered olivine, (C) showing fine serpentine crystals and (D) showing radical growth of tremolite.

된다(그림 6A). 이들 결정 주위와 바탕은 사문석으로 형성되어 있다. 일부분에서는 감람석의 가상을 남겨둔 채로 사문석화가 진행되어 감람석의 입상 결정이 모두 사문석으로 치환 변질되어 있어 있기도 하며, 감람석의 결정이나 가상의 주위나 간극 부분에 사문석화가 진행되어 있는 망상조직(mesh texture)도 잘 관찰되었다. 이것으로 보아 주로 감람석으로 구성된 초염기성암이 변질되어 사문석화가 진행된 것을 알 수 있다. 사문암화작용이 강하게 진행된 시료에서는 감람석의 결정이나 가상이 잘 관찰되지 않으며, 사문석들의 불규칙적인 외곽이 서로 직접 결합되어 나타나는 결합조직(interlocking texture)이 우세하게 나타났다(그림 6C). 사문암의 일부 박편시료에서는 사문암 내의 간극을 충전한 방해석이나 돌로마이트가 관찰되기도 하였다. 그리고 대부분의 사문암 박편 하에서 자철석으로 보이는 불투명광물이 다수 관찰된다. 이것은 X-선회절분석의 결과와 같이 자철석의 존재와 일치한다. 이들은 초염기성암의 본래 포함되었던 광물 이든지 아니면 감람석이 사문석화 작용을 거치면

서 남은 Fe에 의하여 형성된 것으로 사료된다. 투각섬석을 포함되는 시료에서는 사문암 내에서 투각섬석이 방사상의 결정형태로 잘 나타나며, 결정 사이의 간극에서 성장하는 모습도 보였다(그림 6D). 이러한 형태로 보아 사문석의 형성 후에 투각섬석은 2차적으로 생성된 것으로 사료된다.

사문석의 결정형태 관찰

사문암을 구성하는 Mg형 사문석 광물로는 안티고라이트(antigorite), 리자르다이트(lizardite) 및 크리소타일(chrysotile)의 3가지가 있으며, 이들은 결정구조가 다소 다르지만 화학성분이 유사하여 구분이 어려울 경우가 많다. 이들을 구분하기 위해서 여러 가지 방법이 있지만 결정형태의 차이로도 구분할 수 있는 경우가 있다. 즉, 운석면 혹은 백석면이라 부르는 크리소타일은 얇은 판상체가 원형으로 말리면서 가늘고 긴 관의 형태를 띠는 섬유상으로 나타난다. 그러나 리자르다이트와 안티고라이트는 판상의 형태를 나타내어 크리소타일과 형태적

Fig. 7. SEM images of samples: (A) and (B) showing platy or sheet serpentine, (C) showing the chrysotile formed in vein, (D) showing chrysotile in cracks, (E) showing prismatic tremolite and (F) showing acicular tremolite.

으로 다르다. 안티고라이트는 장주기의 초구조에 의해 리자르다이트와는 판상의 형태가 다를 수가 있으나 이를 구분하기는 쉽지 않다.

따라서 편광현미경과 주사전자현미경으로 사문석의 형태를 조사하였다. 우선 사문석 시료의 미세 분말을 특정 굴절액에 침액하여 편광현미경으로 관찰하였다. 뚜렷한 영상을 위하여 직교니콜에 석고검판을 사용하여 400배 배율로 관찰하였다. 그

결과, 괴상의 사문석시료에서는 모두 입상, 주상, 판상과 같은 형태를 보였으며, 섬유상이나 침상의 형태는 나타나지 않았다. 일부 육안상 섬유상의 세맥을 보이는 부분에 대해서는 역시 섬유상의 결정이 잘 관찰되었다. 투각섬석을 포함하는 시료에 대해서 편광현미경으로 관찰한 결과, 주상 혹은 침상의 결정 형태들이 다수 관찰되었다.

더 자세한 결정형태를 검토하기 위해 주사전자

Table 1. X-ray fluorescence analysis of the rocks of the Bibong area

Sample No.	BB-37	BB-40	BB-13	BB13-3-1	BB13-3-2	BB-17	BB-31	BB-39	BB-44-2	BB-27	BB-35	BB-44-1	Average
TYPE	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	
SiO ₂	39.23	38.90	37.79	39.26	39.82	40.56	38.79	38.18	33.34	40.37	39.31	37.30	38.57
Al ₂ O ₃	1.54	1.04	1.11	0.92	1.21	1.58	1.19	1.34	1.68	1.49	1.43	1.36	1.32
TiO ₂	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03
Fe ₂ O ₃	7.75	8.66	12.07	8.46	7.79	6.68	7.21	7.97	10.67	7.85	7.29	2.60	7.92
MnO	0.07	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.09	0.10	0.09	0.11	0.08	0.06	0.07
MgO	39.16	38.11	37.19	38.89	38.56	38.79	39.89	39.15	34.43	38.32	39.65	39.53	38.47
CaO	0.26	0.08	0.07	0.07	0.09	0.43	0.09	0.07	3.33	0.63	0.20	2.57	0.66
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.05	0.03	0.08	0.03	0.01	0.03
P ₂ O ₅	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
LOI	11.88	13.09	11.62	12.19	12.29	11.77	12.65	12.99	16.24	11.01	11.92	16.41	12.84
Total	99.95	99.96	99.93	99.89	99.85	99.94	99.95	99.88	99.85	99.90	99.93	99.86	99.91
Mg value	89	90	86	92	91	92	91	88	87	91	92	97	90

Mg-value =100*[Mg/(Mg+ Fe²⁺)] molecular ratio.

현미경(SEM)을 이용하여 시료를 관찰하였다. EDS 분석도 동시에 행하여 정성분석을 실시하였다. 거의 순수한 사문석으로 구성된 여러 시료에 대해서 결정형태를 조사한 결과, 평행한 층상을 보이는 판상이 주로 나타났으며, 매우 얇은 판상의 형태가 잘 관찰된다(그림 7A, B). 많은 부분에 대해서 다양한 배율로 관찰하였으나 침상 내지 섬유상의 결정은 잘 관찰되지 않았다. 따라서 이들 사문석은 리자르다이트와 안티고라이트에 해당되는 것으로 나타났다. 이것은 전술한 X-선회절분석의 결과와도 일치한다. 노두에서 아주 드물게 육안적으로 관찰되는 2~3 mm 두께의 섬유상 세맥이 나타나는데, 이에 대해 관찰해 본 결과 역시 섬유상의 형태를 잘 나타내었다(그림 7C). 사진에서 보듯이 세맥의 방향에 수직하게 미세한 섬유들이 다발로 발달되어 나타나며, 요곡성이 발달된 유연한 섬유로서 크리스탈라이트에 해당되는 것으로 볼 수 있다. 그리고 사문암의 표면에 뱀 껍질 모양의 망상으로 분포하는 세맥에 대해서도 관찰해본 결과, 세맥 중심부의 빈틈의 표면에 미세한 섬유가 나타나는 것이 확인되었다(그림 7D). 이러한 결과로 볼 때, 이곳의 사문석 광물은 주로 판상의 형태를 보이는 리자르다이트와 안티고라이트에 해당되며, 섬유상의 크리스탈라이트는 세맥이나 사문구조의 일부분에서 세맥상의

로만 일부 국한되어 산출되는 것으로 나타났다.

사문암체에서 산출하는 투각섬석에 대해서도 주사전자현미경을 통하여 결정형태를 관찰하였다. 투각섬석도 섬유상으로 산출할 경우에는 석면에 해당되기 때문에 주의가 필요하다. 투각섬석을 다량 함유하는 여러 시료에 대해 관찰한 결과, 주로 주상 내지 판상의 형태를 나타냈으며, 일부 시료에서 침상의 형태를 나타냈다(그림 7E, 7F).

주성분원소의 화학분석(XRF와 EPMA)

비봉광산에서 산출하는 사문암의 주성분원소를 분석하였으며, 구성광물의 화학성분을 알기 위하여 전자현미분석을 실시하였다. 사문석을 포함하는 대표 시료들에 대해 화학성분의 분석결과는 표 1에 나타났다. SiO₂는 33.3~40.6%의 범위로 평균 38.6%이고, MgO는 34.4~39.9%의 범위로 평균 38.5%으로 모든 시료의 주성분이 거의 유사하게 나타났다. 그 다음으로 Fe₂O₃가 평균 7.9%이며 그 외의 성분은 상당히 낮은 값은 가진다. 광물조합에 따른 차이는 거의 없이 모두 유사한 화학성분을 가지고 있다. 따라서 이것은 같은 모암에서 화학성분의 이동이 적은 변질작용에 의해 형성된 것으로 생각된다. 또한 이들 사문암에서의 철과 마그네슘의

Table 2. Electron microprobe analysis of serpentine minerals

	BB13	BB14	BB15	BB17	BB30	BB31	BB33	BB44	GN2
SiO ₂	43.65	42.75	41.23	42.85	43.30	42.19	43.61	43.23	41.98
TiO ₂	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	0.32	0.17	0.36	0.97	0.62	0.31	0.08	1.49	0.65
FeO	1.99	2.34	3.45	2.50	2.50	2.77	2.64	2.18	3.02
MnO	0.03	0.05	0.10	0.04	0.07	0.10	0.06	0.04	0.08
MgO	40.56	40.66	39.72	38.95	39.32	39.90	39.24	38.43	39.34
CaO	0.03	0.02	0.02	0.05	0.04	0.02	0.05	0.03	0.20
Na ₂ O	0.04	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
K ₂ O	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
NiO	0.04	0.01	0.08	0.19	0.08	0.02	0.02	0.17	0.09
Cr ₂ O ₃	0.25	0.34	0.22	0.23	0.28	0.35	0.46	0.15	0.27
Total	86.95	86.37	85.20	85.84	86.24	85.70	86.19	85.75	85.67
Numbers of ions on the basis of 14 (O,OH)									
Si	4.063	4.023	3.959	4.045	4.070	4.012	4.107	4.067	3.997
Al	0.000	0.002	0.008	0.019	0.002	0.008	0.000	0.009	0.014
ΣTet.	4.063	4.025	3.967	4.064	4.072	4.020	4.107	4.077	4.011
Ti	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Al	0.009	0.008	0.010	0.027	0.022	0.007	0.002	0.040	0.017
Fe	0.156	0.185	0.280	0.199	0.198	0.221	0.211	0.172	0.241
Mn	0.003	0.004	0.008	0.003	0.006	0.008	0.005	0.003	0.006
Mg	5.628	5.704	5.696	5.482	5.510	5.657	5.509	5.390	5.585
Ni	0.001	0.000	0.002	0.004	0.002	0.001	0.000	0.004	0.002
Cr	0.003	0.005	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.002	0.004
ΣOct.	5.800	5.907	5.999	5.719	5.742	5.900	5.735	5.611	5.855
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.003	0.002	0.002	0.005	0.004	0.002	0.006	0.003	0.021
Na	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
ΣInt.	0.005	0.003	0.002	0.006	0.005	0.003	0.006	0.003	0.022

함량에 대한 마그네슘의 수는 86~96% (평균 90%)의 값을 나타내며, 이는 McDonough (1990)가 제시한 감람암의 평균값과 비교적 잘 일치한다.

사문암에 포함되는 사문석, 감람석, 휘석에 대한 전자현미분석을 실시하였다. 사문석의 분석결과는 표 2에 나타내었으며, 많은 포인트에서 분석한 평균치를 시료별로 나타냈다. SiO₂가 41.9~43.6%이

고 MgO가 38.4~40.6%으로 서로 유사하게 높은 값을 보였고, FeO는 1.9~3.4%의 낮은 값을 나타내었다.

사문암에 포함되는 감람석의 화학조성은 전체적인 평균 범위는 SiO₂가 41.3~41.5%, MgO가 49.3~49.9%, FeO가 8.2~9.0%으로 거의 같은 성분을 나타냈다. 이들의 마그네슘 수는 0.91으로 높은 값

Table 3. Electron microprobe analysis of olivine and pyroxene

	Olivine				Pyroxene			
	BB13	BB14	BB31	BB33	BB13	BB17	BB31	GN2
	Average	Average	Average	Average	Average	Average	Average	Average
SiO ₂	41.43	41.37	41.50	41.33	57.73	56.85	57.58	57.65
TiO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.00	0.03
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	0.02	0.00	1.21	2.30	1.12	1.86
FeO	9.02	8.95	8.29	8.83	5.95	5.78	5.45	5.76
MnO	0.15	0.16	0.13	0.12	0.18	0.12	0.14	0.13
MgO	49.95	49.73	49.82	49.33	35.39	33.85	34.46	34.57
CaO	0.03	0.02	0.01	0.02	0.18	0.29	0.24	0.20
Na ₂ O	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.02	0.04
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
NiO	0.00	0.02	0.02	0.01	0.10	0.30	0.17	0.34
Cr ₂ O ₃	0.43	0.41	0.38	0.38	0.07	0.08	0.05	0.08
Total	101.05	100.68	100.19	100.06	100.87	99.65	99.23	100.66
Numbers of ions on the basis of 4(O,OH)					Numbers of ions on the basis of 6(O,OH)			
Si	1.00	1.00	1.01	1.01	1.97	1.96	1.99	1.96
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02
ΣTet.	1.00	1.00	1.01	1.01	1.98	1.98	2.00	1.98
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	1.80	1.80	1.80	1.79	1.80	1.74	1.78	1.76
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Cr	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
ΣOct.	1.99	1.99	1.98	1.98	1.98	1.92	1.94	1.94

을 가지며 광물화학 조성으로 보아 포스터라이트의 함량이 90% 이상인 것으로 나타났다(표 3).

드물지만 사문암 내에 휘석의 결정이 포함되어 있으며 이들에 대한 분석 결과, SiO₂가 56.8~57.7%, MgO가 33.8~35.3%, FeO가 5.4~5.9%로 나타났다. 이러한 조성으로 판단해 볼 때 포함된 휘석류는 엔스타타이트(Enstatite)에 해당한다.

미량원소 및 희토류 원소의 분석

사문암 시료에 대해 미량원소와 희토류 원소를 분석하여 표 4와 5에 나타났다. 미량원소의 분석 결과, 모든 시료에서 Cr과 Ni이 가장 많은 함량을 나타내고 있으며, 그 다음으로 Co와 Zn 등이 다소 많이 포함되어 나타난다. 이러한 원소의 함량이 높은 것은 초염기성암의 기원에 의한 특징으로 생각된다. Ba과 Sr 등의 일부 원소들은 시료에 따라 함량의 차이가 다소 나타나지만, 전체적으로 볼 때

Table 4. Chemical compositions of the Trace Elements (ppm) of serpentinite from Bibong area corresponding to the mineral group

NO.	BB2-15	BB2-20	BB2-39	BB2-41	BB13	BB13-3-2	BB17	BB31	BB34-1	BB35	BB37	BB39	BB40	BB44-1	BB44-2
Group	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C
Ba	8.602	19.36	18.69	< 1	67.27	79.09	46.13	8.504	544.2	72.48	58.98	61.75	3.289	2.017	1.934
Cr	1858	1289	1528	1639	1995	2136	1986	1703	1739	1908	1577	1732	61.72	16.74	2137
Ni	1689	1782	1472	1691	1597	1620	1791	1870	1739	1731	1726	1821	1123	872	1636
Sr	9.304	22.26	< 1	< 1	< 1	< 1	5.187	< 1	< 1	12.113	6.319	< 1	< 1	5.648	9.475
Zn	50.38	45.68	31.92	44.50	46.92	43.62	45.39	42.70	36.53	39.91	37.91	40.35	23.22	9.481	37.90
Sc	7.724	7.743	5.291	6.408	6.592	6.591	8.707	5.731	5.899	6.950	7.851	6.317	4.450	3.429	7.735
V	31.42	32.52	20.81	21.36	27.14	25.78	29.83	22.18	27.78	25.42	29.87	22.82	11.61	13.31	34.03
Zr	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Be	<0.02	0.861	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.788	0.394	<0.02	0.234	<0.02	<0.02	<0.02
Co	95.828	96.934	49.710	95.201	68.084	63.811	88.085	95.421	96.751	90.049	87.677	94.877	59.646	39.996	62.589
Cu	2.761	5.855	0.660	3.368	3.284	0.576	2.058	2.074	6.049	3.364	1.264	6.837	0.936	1.664	2.446
Ga	0.981	1.207	1.505	0.331	2.998	3.872	2.335	1.122	21.885	3.770	3.067	2.950	0.770	1.030	0.932
Rb	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.217	0.956	0.272	2.011	0.319	0.232	1.058	0.298	<0.02	<0.02
Y	0.406	3.741	0.388	<0.02	0.578	0.998	0.781	0.655	2.422	1.848	0.708	1.254	0.556	0.966	1.366

Table 5. Chemical compositions of the Rare Earth Elements (ppm) for the serpentinite of the Bibong area corresponding to the mineral group

NO.	BB 2-15	BB 2-20	BB 2-39	BB 2-41	BB 13	BB 13-3-2	BB 17	BB 31	BB 34-1	BB 35	BB 37	BB 39	BB 40	BB 44-1	BB 44-2
Group	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	B	C	C	C	C
La	1.422	8.955	0.253	0.158	0.453	0.598	0.939	3.143	4.491	4.992	1.017	2.971	2.098	0.656	0.746
Ce	2.379	22.468	0.400	0.329	1.018	1.416	1.404	6.349	8.649	11.036	1.420	7.425	2.984	1.041	1.517
Pr	0.231	2.834	0.062	0.036	0.127	0.165	0.160	0.693	1.082	1.339	0.110	0.943	0.391	0.160	0.191
Nd	1.252	14.369	0.308	0.203	0.679	0.920	0.812	3.474	5.732	6.768	0.633	4.749	1.853	0.765	1.056
Sm	0.141	2.202	0.069	0.029	0.156	0.216	0.114	0.352	1.388	1.003	0.065	0.758	0.207	0.160	0.231
Eu	0.071	0.553	0.015	0.009	0.037	0.050	0.043	0.135	0.320	0.308	0.045	0.293	0.094	0.025	0.040
Gd	0.130	1.932	0.071	0.027	0.151	0.216	0.132	0.316	1.252	0.876	0.085	0.639	0.200	0.191	0.271
Tb	0.015	0.240	0.010	0.001	0.021	0.033	0.019	0.030	0.158	0.102	0.012	0.069	0.021	0.024	0.041
Dy	0.079	0.985	0.063	0.019	0.115	0.173	0.131	0.137	0.657	0.445	0.107	0.300	0.113	0.168	0.238
Ho	0.015	0.149	0.011	0.002	0.020	0.032	0.030	0.022	0.097	0.070	0.026	0.047	0.018	0.032	0.047
Er	0.051	0.379	0.039	0.013	0.064	0.108	0.100	0.069	0.217	0.193	0.098	0.130	0.063	0.095	0.145
Tm	0.007	0.042	0.004	0.001	0.007	0.014	0.013	0.008	0.023	0.021	0.015	0.014	0.006	0.012	0.021
Yb	0.055	0.260	0.031	0.020	0.058	0.111	0.115	0.066	0.139	0.149	0.118	0.101	0.054	0.086	0.153
Lu	0.010	0.034	0.004	0.003	0.008	0.017	0.017	0.009	0.019	0.020	0.019	0.015	0.007	0.012	0.024

미량원소는 거의 유사한 것으로 보인다.

희토류의 경우에는 원소에 따른 함량의 변화 패턴이 유사하게 나타났다. 분석한 시료 중 BB2-20

시료에서 모든 원소에 대해 비교적 높은 함량을 나타냈다. 이 시료는 감람석의 함량이 상대적으로 가장 많은 시료에 해당된다. 이것은 사문암화가 되기

전의 원암에 제일 가까운 것으로도 볼 수 있다. 모든 시료에서 LREE가 HREE에 비하여 보다 부화된 경향을 나타내었다.

사문암의 형성에 관한 고찰

사문석은 일반적으로 초염기성암이 지하심부에서 주위의 물을 취입하여 감람석, 휘석 등이 사문석으로 변질되며(Deer *et al.*, 1992), 드물게는 석회암이나 백운석으로부터 변성 및 열수변질에 의해 생성되기도 한다(Bowen and Tuttle, 1949; Bates and Jackson, 1980).

전술한 바와 같이 비봉광산의 사문암체는 선캠브리아기 변성암층 내에 소규모의 관입형태로 분포하고 있다. 이 사문암에는 Mg-감람석인 포스터라이트가 포함되어 있다. 사문암의 박편 관찰에서는 이러한 감람석이 사문석으로 교대 변질되는 결정이나 가상의 형태가 잘 관찰되었다. 또한 미량원소의 분석에서도 사문암에 Cr과 Ni이 다량 함유되어 초염기성암의 기원을 암시하였다. 이러한 여러 결과로 볼 때 감람암을 주성분으로 하는 초염기성암이 변질되어 사문암이 형성된 것으로 볼 수 있다. 사문암체 내에는 소단층, 절리, 파쇄대, 암맥 등이 복잡하게 발달하여 있다. 이는 울산광산의 사문암체와 안동 문암광상의 연구(최수용 외, 1990; 황진연 외, 1993)와 같이 초염기성암인 감람암이 지각 하부에서 상승하면서 열수변질을 받아 사문암체가 형성된 것으로 생각된다. 이러한 암체의 상승은 단층과 같은 약대를 따라 일어났으며, 열수변질에 따른 부피팽창과 단층운동 등에 의해 복잡한 형상의 암체를 보이는 것으로 생각된다.

비봉광산의 사문암체를 구성하는 광물조합은 A) 사문석-포스터라이트, B) 사문석, C) 사문석-녹니석(버미쿨라이트), D) 사문석-투각섬석-녹니석(버미쿨라이트), E) 투각섬석-녹니석의 5가지로 나누어졌다. 이들 광물조합들은 각기 분산되어 분포하기 때문에 분포지역을 분대하기는 어렵지만, 대체적으로 A, B, C 조합은 남동부 채굴장에 많고, 반면에 D, E 조합은 북동부의 사문암체에 주로 나타났다. 투각섬석과 녹니석을 수반하는 D, E 광물조합은 채굴장의 북동부 사문암체에 주로 나타나며, 반면에 본래 모암의 구성광물로 보이는 포스터라이트는 이 곳 북동부에는 남동부에 비해 극히 일부에서만 나타나고 있다. 투각섬석과 녹니석은 맥상이나 국부적으로 변질된 부분에 잘 나타나고 있다.

박편 상으로도 투각섬석은 2차적으로 형성된 방사상의 형태를 나타냈다. 이러한 산상과 광물조합의 분포상태로 보아 사문석이 형성된 이후에 재차 열수변질을 받아서 투각섬석과 녹니석이 형성된 것으로 생각된다. 이러한 광물조합의 분포는 울산사문석 광상의 연구(최수용 외, 1990)와 유사한 결과를 나타낸다. 즉 울산광산에서도 사문석이 우세한 변질대에 비교하여 투각섬석-녹니석 변질대는 2차 열수변질에 의한 것으로 나타났다. 이러한 여러 가지 검토의 결과로 보아 이번 연구에서 구분된 광물조합 A, B, C, D, E의 순서에 열수변질이 일어나 광물의 조성이 변화된 것으로 생각된다.

결 언

충남 청양군 비봉광산의 사문암체는 선캠브리아기 변성암층 내에 소규모의 관입체로 나타나며, 다양한 암맥들이 관입하고 있고 소단층, 절리, 파쇄대 등이 복잡하게 발달하여 있다. 이 사문암체에는 사문석, 포스터라이트, 투각섬석, 자철석, 활석, 돌로마이트, 녹니석, 버미쿨라이트 등의 광물이 나타났다. 이들 구성광물들의 특성과 조합으로부터 A) 사문석-포스터라이트, B) 사문석, C) 사문석-녹니석(버미쿨라이트), D) 사문석-투각섬석-녹니석(버미쿨라이트), E) 투각섬석-녹니석의 5가지 광물조합으로 구분되었다.

XRD, FT-IR, SEM 등으로 분석한 결과, 사문석 광물은 주로 판상의 형태를 보이는 리자르다이트와 안티고라이트로 구성되며, 섬유상의 크리스타일은 세맥이나 사문구조의 일부분에 국한되어 산출되는 것으로 나타났다.

이 사문암체의 구성광물과 조직, 미량성분 등으로 보아 Mg-감람석을 주성분으로 하는 초염기성암이 열수변질작용을 받아 사문암이 형성된 것으로 나타났다. 초염기성암이 하부에서 상승하면서 열수변질과 함께 그에 부피팽창과 단층운동 등에 의해 복잡한 형상의 사문암체를 만든 것으로 사료된다.

이러한 산상과 광물조합의 분포상태로 보아 사문석이 형성된 이후에 재차 열수변질을 받아서 투각섬석과 녹니석이 형성된 것으로 생각된다. 따라서 전체적으로 볼 때, 광물조합 A, B, C, D, E의 순서에 따라 열수변질이 일어나 광물의 조성이 변화된 것으로 생각된다.

사 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0073549)을 밝힙니다. 세심하게 논문을 잘 검토해 주시고 유익한 지적을 해 주신 두 심사위원님께 감사드립니다.

참고문헌

김건영, 김수진 (1997) 충남 예산-공주-청양지역의 초염기성암의 사문암화 작용, 한국광물학회지, 10, 126-138.
 우영균, 박성덕, 김영태 (2005a) 충남 비봉 사문석 광상 사문암의 기원암과 사문석화작용, 과학교육연구, 36, 201-221.
 우영균, 박진규, 김영태 (2005b) 충남 월림-광시-비봉 사문석광상 사문암의 기원암과 사문석화작용, 과학 교육연구, 36, 223-245.
 이종혁, 김성수 (1963) 1/5만 홍성지질 도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 엄상호, 이교성 (1963) 1/5만 대흥지질 도폭 및 설명서, 국립지질조사소.
 최수용, 황진연, 김정진, 이윤종 (1990) 울산사문암체의 광물학적·지구화학적 연구, 대한지질학회, 26, 105-118.
 下田右 (1985) 점토광물연구법. 창조사.
 황진연, 김정진, 옥수석 (1993) 안동지역 사문암광상의 구성광물 및 성인에 관한 연구, 광산지질, 1-10.
 황진연 (2002) 사문석의 특성과 활용, 한국광물학회지 (광물과 산업), 15, 48-54.

Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1980) Glossary of Geology, 572.
 Bowen, N.L. and Tuttle, O.F. (1949) The system MgO-SiO₂-H₂O. Geol. Soc. Am. Bull., 60, 439-460.
 Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J. (1980) An introduction to the rock-forming minerals. Longman, 528.
 Deer, W.A., Howie, R.A., and Zussman, J. (1992) An introduction to the rock-forming minerals. Longman, 696.
 McDonough (1990) Constraints on the composition of the continental lithospheric mantle, Earth Planet. Sci. Lett., 101, 1-18.
 Nemecz, E. (1981) Clay minerals. Akademiai Kiado, Budapest, Hungary.
 Rucklidge, J.C. and Zussman, J. (1965) The crystal structure of the serpentine mineral, lizardite Mg₃SiO₅(OH)₄. Acta crystallogr., 1e, 381-389
 Russell, J.D. and Fraser, A.R. (1994) Infrared methods. In: Wilson, M.J. (ed.), Clay mineralogy: Spectroscopic and chemical determinative methods, Chapman & Hall. 11-67.
 Whittaker, E.J.W. and Zussman, J. (1965) The crystal structure of the serpentine minerals by X-ray diffraction. Mineral. Mag., 31, 107-126.

접수일(2012년 2월 21일), 수정일(1차 : 2012년 3월 24일),
 게재확정일(2012년 3월 27일)