

## 충남 보령지역의 폐석면 광산에서 산출하는 투각섬석 석면의 특성

### Characteristics of Tremolite Asbestos from Abandoned Asbestos Mines in Boryeong Area, Chungnam

윤 근 택(Keun Taek Yoon) · 황 진 연(Jinyeon Hwang)\* ·  
오 지 호(Ji Ho Oh) · 이 효 민(Hyomin Lee)

부산대학교 자연과학대학 지질환경과학과

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

**요약** : 국내에서 투각섬석 석면이 채굴되었던 충남 보령지역의 석면광산인 중앙(신석)광산과 대보석산 광산에 대해서 투각섬석의 산출상태, 수반광물, 광물학적 특성, 형성과정을 연구하였다. 이곳의 투각섬석은 아주 긴 섬유상과 함께 침상, 도변상, 주상의 여러 형태가 같이 공존하였다. 유해석면의 기준에 해당되는 투각섬석에 대해 편광현미경과 주사전자현미경으로 형태를 분석한 결과, 길이가 최대 210  $\mu\text{m}$ 에 해당되는 입자도 있으나 평균치로는 31.2  $\mu\text{m}$ 이고, 폭은 평균 1.6  $\mu\text{m}$ 이며 종횡비는 평균 19.9이었다. 투각섬석의 신장방향에 대한 소광각은 6.1~20.2°의 범위로 모두 사소광의 성질을 나타냈다. 석면상과 비석면상 투각섬석의 XRD 패턴도 약간의 차이를 나타냈다. EPMA의 분석 결과, 이곳의 투각섬석은 Mg성분이 Fe보다 월등히 높게 나타나서 Mg단종인 투각섬석에 가까운 것으로 확인되었다. 석면상과 주상의 투각섬석은 형성조건이 다소 다르며 석면상이 후기에 형성된 것으로 검토되었다.

**주요어** : 투각섬석, 석면, 섬유상, 종횡비, 편광현미경, 주사전자현미경

**ABSTRACT** : We studied the geological occurrence, associated minerals, mineralogical properties and formation process of tremolites from two abandoned asbestos mines, Jungang (Sinsuk) and Daebosuksan, located in Boryeong area, Chungnam. Morphologically different tremolites such as long fibrous, needle-like, bladed and prismatic forms coexisted. Fibrous tremolite, known for its high toxicity to human health, was systematically analyzed by polarized light microscopy and scanning electron microscopy. The average length of tremolite fibers was 31.2  $\mu\text{m}$  although the maximum length of some asbestos was 210.0  $\mu\text{m}$ . The average width and aspect ratio were 1.6  $\mu\text{m}$  and 19.9, respectively. Tremolite showed inclined extinction in the range of 6.1~20.2°. X-ray diffraction patterns were slightly different between fibrous (asbestiform) and prismatic (non-asbestiform) tremolites. EPMA analysis of tremolites in the study area indicated extremely high Mg content with very low Fe content, close to the composition of tremolite end-member in the tremolite-actinolite solid solution series. The formational conditions of asbestiform and non-asbestiform tremolite appear to be different. Asbestiform tremolite was estimated to have been formed in later stage.

**Key words** : Tremolite, asbestos, fibrous form, aspect ratio, polarizing microscope, scanning electron microscope

\*교신저자: hwangjy@pusan.ac.kr

## 서 언

석면(asbestos)은 ‘돌로 된 섬유’라는 뜻으로써 자연 상에서 산출되는 섬유상의 광물을 총칭하는 용어으로써 일정한 화학조성과 결정구조를 가진다. 석면은 유연성, 난연성, 내화학성, 열적 특성 및 전기절연성 등의 산업적으로 유용한 물리화학적 성질을 가지고 있어 폭넓게 사용되었으나 발암물질로 인정되어 현재는 산업적 이용이 법적으로 금지되어 있다. 석면 섬유가 인간에게 오랜 기간 호흡기를 통해서 노출이 되면, 잠복기(15~30년)를 거쳐 악성 종피종, 폐암 등을 유발할 수 있다. 세계보건기구(WHO) 및 국제노동기구(ILO) 등의 국제기관에서는 인체에 유해하며 섬유상을 가지는 6가지 광물에 대해서 유해 석면으로 지정하였다. 이 여섯 종의 유해 석면에는 사문석 계열의 온석면(chrysotile, 백석면)과 각섬석 계열인 양기석(actinolite), 청석면(crocidolite), 투각섬석(tremolite), 갈석면(amosite), 직섬석(anthophyllite)이 있다. 국내에서도 위와 같은 정의를 따르고 있으며, 노동부에서는 6가지 광물에 대해서 수입 및 사용 금지를 시켰다. 이 중에서 이번 연구의 대상이 되는 투각섬석 석면의 경우에는, 광물입자의 결정도가 좋고 입자 크기의 미세함으로 인해 일반적으로 유해성이 가장 큰 것으로 알려진 청석면 보다 유해성이 더욱 높은 것으로 알려지고 있다(Stanton *et al.*, 1981). 특히 영국 국립암센터의 동물실험 결과 투각섬석 석면의 암발생 확률이 다른 석면에 비해 크게 높은 것으로 나타나고 있다. 우리나라의 경우에는 투각섬석 석면의 경우 2003년 6월 개정된 노동부 산업 안전보건법 시행령에 따라 안소필라이트 석면, 양기석 석면과 함께 제조 및 수입이 전면 금지 물질로 추가되었다(노동부, 2003).

국내에도 충남 보령, 경북 영풍과 강원도 영월 지역에 과거 투각섬석을 생산한 석면광산이 존재하고 있다. 특히 충남 보령지역은 2009년 6월 발표된 건강영향평가 결과에서(환경부, 2009), 공기 중 및 토양 시료에서 석면이 검출되고, 일부 주민들이 석면폐증으로 의심되는 것으로 잠정 조사되어 석면 오염에 대한 문제가 크게 부각된 바 있다. 이 지역에는 석면광산인 중앙(신석)광산과 대보석산광산에서 투각섬석 석면이 산출되었다. 충남 지역의 활석에 대한 지질학적, 광상학적 연구는 이전에 이루어진 바 있으나, 보령지역에 위치한 이들 석면광산에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 특히, 투각섬석 석면광산에 대한 지질학적 및 광물학적 연구가 거의

이루어지지 않아 광체의 발달상태, 생성조건, 결정형태, 구조 등이 불명한 상태에 있다. 따라서, 본 연구에서는 이들 광산에 대하여 투각섬석의 지질학적 산출상태와 수반광물을 자세히 조사하고, 또한 투각섬석의 광물학적 특성을 분석하여, 이러한 연구 결과로부터 석면광상과 투각섬석의 형성과정을 고찰해 보았다.

## 연구방법

석면광산과 그 주변에 대한 지질조사를 실시하고 많은 시료들을 채취하였다. 지질조사에서 채취한 시료에 대해서 모두 X-선회절 분석을 실시하여 구성광물을 분석하였다. X-선 회절분석은 Rigaku사의 CuK $\alpha$  선과 Ni-filter에 의한 X-선을 사용하는 Geigerflex 2013의 X-선분말회절장치를 사용하였다. 측정시에 전압 30 KV, 15 mA, 주사속도 2° 2 $\theta$  /min, 시정수 1 sec, slit 1°~0.3 mm~1°의 조건으로 주로 정성분석을 행하였고, 정량적으로 자세한 분석을 위하여 40 KV, 30 mA으로 전압을 높이고 측정하였다. 석면광물의 식별과 광학적 성질을 분석하기 위해서, 국제적으로 알려져 있는 미국 환경청(EPA)과 일본의 일본공업규격(JIS) 등의 방법에 따라 편광현미경, 위상차현미경 등을 사용하였다. 일부 암석 시료는 박편을 제작하여 편광현미경을 통해 구성광물 및 조직을 관찰하였다.

분말시료를 이용하여 주사전자현미경(SEM)용 시편을 제작하여 관찰을 실시하였으며, SEM/EDS를 통한 정성분석을 실시하였다. 장치는 Hitachi S4800을 사용하였으며, 15 kV의 전압조건에서 주로 1,000배에서 5,000배까지의 관찰이 이루어졌으며, 에너지분산 분광장치(EDS)를 이용하여 정성분석을 행하였다. 그리고 미세 섬유부분의 정확한 화학조성을 검토하기 위해서 부산대학교 공동실험실습관에 전자현미분석(EPMA)을 수행하였다. 장치는 Cameca SX100을 사용하였으며, 전압 15 KeV, 검침 전류 20 mA, 빔크기 1  $\mu$ m의 조건에서 분석이 이루어졌다. 암석 및 광석의 주 화학분석은 부경대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 X-선 형광분광분석 장치(XRF)를 통해 bead 정량법으로 분석이 이루어졌다. 장치는 Philip PW2400 기종의 X-선형광분석기가 사용되었다.

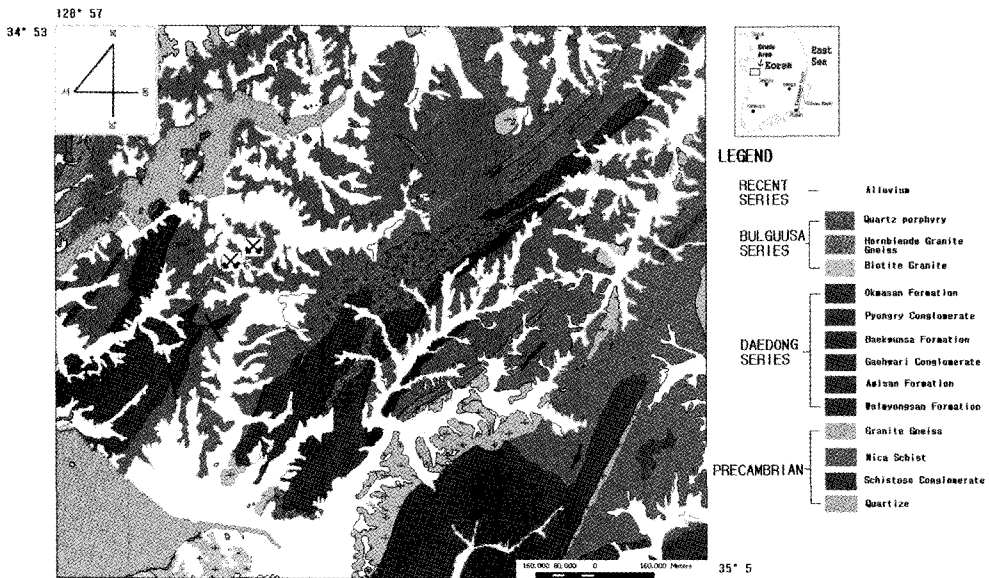


Fig. 1. Geological map of the Boryeong area modified from Woo and Seo (2000).

## 연구결과

### 광산지역의 지질과 석면광체의 배태상태

충남 보령지역의 지질은 그림 1에 나타냈으며, 이 지질도는 1:50000의 서천도폭(김봉균 외, 1963), 홍성도폭(이종혁과 김성수, 1963), 대천도폭(조선총독부, 1931)을 참고하여 종합한 우영균과 서만철(2000)의 지질도에 조사지역을 표시하였다. 이 지역의 주변에 선캄브리아기의 변성퇴적암이 넓게 분포하고 있으며, 그 상부층으로 대동층군의 퇴적암류와 백악기의 화강암류 및 석영반암으로 이루어져 있다. 선캄브리아기의 변성퇴적암으로는 규암, 변성역암, 운모편암, 화강편암이 포함되어 있으나, 이번에 조사하는 광산지역은 운모편암의 분포지역에 속한다. 실제로 광산 주변을 조사한 결과도 광산을 중심으로 운모편암이 널리 분포하고 있는 것으로 나타났다. 충남지역의 홍성 및 광천에 나타나는 사문석과 석면광상은 초염기성암이 존재하여 이들의 변성작용에 의해 형성된 것으로 보는 연구도 있다(우영균과 강희주, 1999; 서만철과 우영균, 2000; 우영균과 서만철, 2000).

보령지역의 석면광산은 일제시대부터 개발되어 노천채굴방식으로 운영되었으며, 2006년까지 일부 채굴한 기록이 남아있으나, 석면의 유해성이 널리 알려짐에 따라 현재는 폐광된 상태로 남아있다.

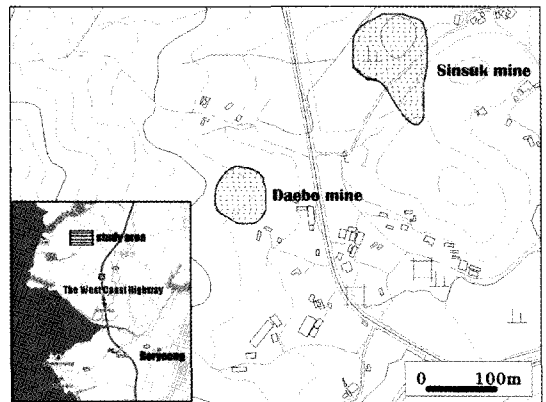


Fig. 2. Topographical map showing the location of two asbestos mines.

이번에 조사한 석면광산은 중앙(신석)광산과 대보 석산광산으로 알려져 있다(그림 2). 중앙(신석)광산은 대한광업진흥공사(1988)의 보고서에는 중앙광산이라 기재되어 있으나, 현지 주민들은 신석광산으로 부르고 있다. 이마 채광권자의 명의변경에 따라 광산 명이 바뀐 것으로 생각되며, 여기서는 주로 신석광산으로 기재하도록 한다. 신석광산과 대보석산광산은 약 200 m 정도로 가까운 것으로 나타나고 후술할 내용이지만 같은 지층 내에서 구성광물이 유사한 것으로 보아 생성조건도 유사할 것으로 생각된다. 신석광산은 석면광체를 주로 채굴했던 지역은 현재

저수지와 논과 밭으로 되어 있어 광산의 주 채굴 흔적은 나타나지 않아 조사할 노두를 찾기 어렵다. 그러나 중심부와는 떨어져 있는 곳에 검은 색의 암석이 나타나며 그 곳에 소규모로 시험적으로 채굴해 본 흔적이 약간 남아있다. 이곳의 노출된 암석에 대해 시료를 채취하고 광물성분을 분석해 보았는데, 약간 담색을 띠는 일부에서 투각섬석이 포함되는 것이 관찰되었다. 이곳은 운모편암이 주로 되어 있으나, 부분적으로 파쇄되고 각력화되고 변질된 암석이 나타나며, 전체적으로 검은 색을 띠고 있다. 이 부분은 일종의 단층대로서 주 석면광체의 외곽부에 해당되는 것으로 생각된다. 대보석산광산도 오래 전에 폐광되었기 때문에 광체를 주로 채굴한 곳은 묻혀서 밭과 가축농장으로 사용되고 있다. 그 주변의 소재곡에서 투각섬석 석면이 다량 포함된 담색의 암석노두가 나타났다. 이들 노두에 대해서 시료를 채취하여 분석하였다. 이들 투각섬석이 포함되는 암석은 석영과 사장석을 포함하는 암석과 혼재되어 나타났다. 대부분은 괴상이지만 부분적으로 맥상의 구조를 보이는 곳도 나타났다.

#### 광산지역의 구성광물 및 광물조합

광산에서 채취한 전 시료를 X-선 회절분석을 통한 구성광물을 조사하기 위해 분말상태로 시료를 제작하였으며, 제작한 시료로 X-선 회절분석을 실시하였다. 분석 결과, 주요 구성광물은 투각섬석, 석영, 사장석, 운모, 녹니석, 활석, 투회석 등으로 나타났다. 이들 구성광물의 광물조합을 검토한 결과, 표 1에 나타낸 바와 같이 크게 A, B, C, D 등의 조합으로 나누어졌다. A조합은 투각섬석을 다량 함유하며 주로 백색 내지 담회색을 띠는 시료로서 활석이나 투회석을 소량 함유하는 조합이다. 여기에 해당되는 조합이 주 석면광체에 해당되는 것으로 생각된다. 그리고 B조합은 투각섬석을 소량 함유하며, 석영, 장석, 운모, 활석, 투회석 등의 여러 광물을 포함하는 것이다. 이는 석면광체의 주변 변질암석에 해당되는 것으로 생각된다. C조합은 투각섬석은 포함되지 않고, 석영, 장석, 운모, 녹니석 등이 함유되어 있다. 이것은 이 지역에서 가장 많이 분포하고 있는 기반암인 운모편암의 광물성분에 해당되는 조합이다. D조합은 석영이 다량 함유되어 있고 카올린광물이 같이 수반되는 것으로 기반암이 풍화변질된 것으로 보인다. 간단하게 보면 A조합은 투각섬석이 다량 함유되어 석면광체에 가까운 것이고, B조합은 석면

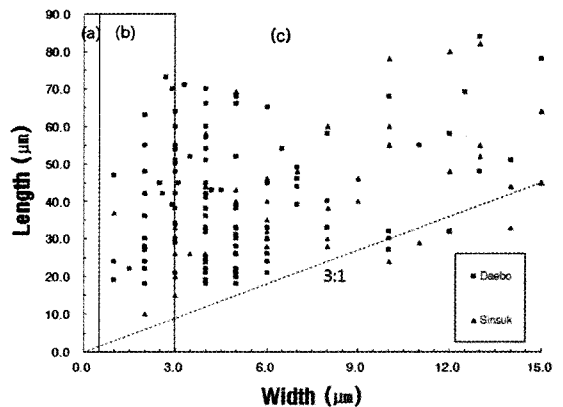


Fig. 3. Aspect ratio of tremolite in study area. (a) U.S. EPA standard asbestiform tremolite. (b) Tremolite in this study exceeding 3:1 in aspect ratio and less than 3  $\mu\text{m}$  in width. (c) Tremolite in this study exceeding 3  $\mu\text{m}$  in width.

광체의 주변 변질암에 해당되는 것으로 볼 수 있다. 그리고 C와 D조합은 변성퇴적암인 이 지역의 기반암에 해당되는 것으로 여러 광물성분이 포함되고 있다.

#### 투각섬석의 광학현미경 관찰

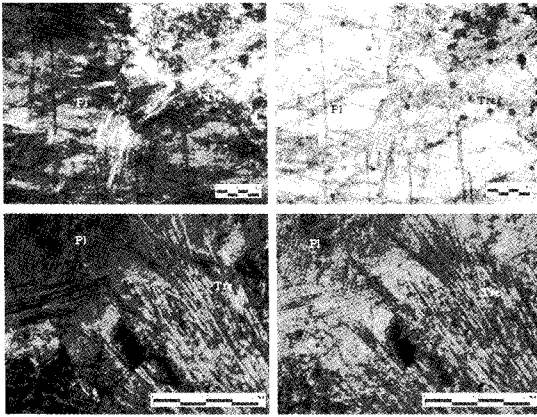
투각섬석은 단사정계로서, 편광현미경의 교차편광하에서 관찰 시 섬유상의 길이방향이 편광의 진동축에 일정한 각도를 이룰 때 소광되는 경사소광의 특성을 가진다. 이를 확인하기 위해 많은 섬유상 내지 침상의 결정에 대하여 소광각을 측정하였으며, 그 결과 모든 시료에서 소광각이 최소  $6.1^\circ$ 에서 최대  $20.2^\circ$ 의 범위로 나타나고 평균적으로  $10.8^\circ$ 의 경사소광을 하는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 알려진 투각섬석의 소광각과 유사하게 나타났다. 미국 EPA의 일반적인 석면형태의 기준인 종횡비 3 이상, 폭 3  $\mu\text{m}$  이하, 길이 5  $\mu\text{m}$  이상에 해당되는 석면입자를 판별하기 위해 편광현미경으로 길이와 폭의 크기를 정밀히 측정하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타났다. 일반적인 석면기준에 부합하는 종횡비가 3 이상이나 폭이 3  $\mu\text{m}$  이하인 시료의 범위를 그림 3에서 (b)영역으로 표시하였고, 미국 EPA에서 석면상으로 정의한 종횡비 20~100 또는 그 이상인 것과 폭 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 가는 섬유(EPA, 1993)에 해당하는 영역을 (a)영역으로 나타냈다. 그리고 폭이 3  $\mu\text{m}$  이상인 결정에 대해서는 (c)영역으로 구분하였다.

**Table 1.** The summary of XRD analyses of samples in study area

Sample No.	Tremolite	Kaolin	Mica	Chlorite	Quartz	Talc	Feldspar	Diopside	Type
DB-3	++++								A
DB-4	++++					+			A
BR-4	++++								A
KS-7	++++					+		+	A
KS-14	++++								A
HS-2	++++							+	A
HS-6	++++								A
HS-8	++++					+		+	A
KS-6	++				+++				B
KS-24	++				++++				B
DB-2	++				++++				B
HS-1	++		+			++++		+	B
HS-3	++				+++		+	++	B
HS-4	++		+		++		+++	+	B
HS-5	+++				++		+	++	B
BR-1			++	++	++++				C
BR-2			+	+	++++				C
BR-3			+		++++	+			C
BR-5				+	++++				C
KS-1			+		+++		++		C
KS-2			+		++++				C
KS-3			+		++++		++		C
KS-4			+		++++		+		C
KS-8				+	++		+++		C
KS-9			+		++		+++		C
KS-11			+	+	++++				C
KS-11-1			+	+	+++		+++		C
KS-13			++		++++				C
KS-15			++	+	++++				C
KS-16			++		++++				C
KS-17			++		++++				C
KS-18					++		++++		C
DB-1		++++							D
DB-6		++			++++				D
KS-5		++			++++				D
KS-12		++			++++		+		D
KS-21		++			+++				D
BR-5					++++				D
DB-5					++++				D

편광현미경을 관찰한 결과, 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 섬유상 기준에 드는 입자들은 거의 관찰되지 않았으며, 그

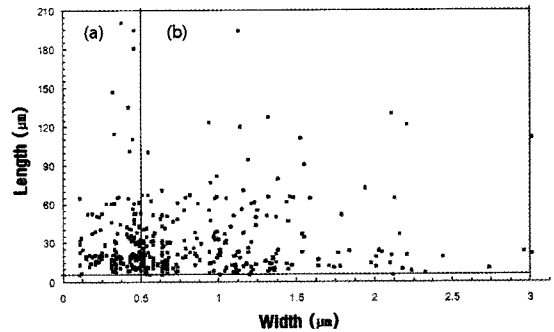
이상의 것들만 확인되었다. 이것은 폭이 너무 작아서 편광현미경의 분해력 한계이기 때문으로 생각된다.



**Fig. 4.** Photomicrographs of thin sections showing the occurrence of tremolite in rocks (left: cross nicol, right: open nicol). Tre: tremolite, Pl: plagioclase.

시료에 따라서 (b)영역과 (c)영역의 비율이 다르게 나타났으며, 전체적으로 보면 그림 3에 보는바와 같이 (b)영역이 (c)영역의 비율보다 적은 것으로 나타났다. 즉 침상내지 섬유상인 것보다는 주상에 가까운 결정 형태가 일반적으로 더 많이 함유하는 것으로 보인다. 그림 3에 나타난 것과 같이 많은 시료들에서 많은 입자를 관찰한 결과, 길이의 평균치는  $33.1 \mu\text{m}$ 이고 폭은 평균이  $5.0 \mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 일반적인 석면의 기준에 드는 폭  $3 \mu\text{m}$  이하의 것에 대한 입자들의 형태는 길이가 평균  $32.5 \mu\text{m}$ 이고 폭의 평균이  $2.4 \mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 그리고 대보광산과 신석광산의 시료에 대해서는 서로 범위가 겹쳐 큰 차이가 나타나지 않았다. 편광현미경에 의한 투각섬석의 침상과 주상에 대한 형태별 비율은 시료에 따라 다양하게 나타났다. 주상형태는 각섬석군의 특징인 벽개면이 잘 관찰되었다.

투각섬석을 소량 함유하는 B조합의 시료에 대해서 암석박편을 제작하였으며, 그 관찰 사진을 그림 4에 나타내었다. 관찰 결과, 주로 사장석 입자에 침상의 투각섬석이 침투하는 듯이 교대되어 있는 형태가 관찰되었으며, 사장석 입자가 변질을 받은 모습으로 관찰되었다. 이곳의 기반암인 운모편암에 해당되는 시료에 대해서 박편을 제작 관찰한 결과, 역시 석영을 주 구성광물로 가지고 있으며, 소량의 운모를 포함하고 있었다. 즉, 이 암석에는 투각섬석이 포함되지 않으며, 이를 생성시킬만한 성분을 가진 광물은 나타나지 않았다.



**Fig. 5.** Aspect ratios of tremolite in study area measured by SEM.

#### 투각섬석의 전자현미경 관찰

편광현미경 관찰시 미세한 석면형 투각섬석의 확인이 어렵기 때문에 EPMA와 SEM 등의 전자현미경을 이용하여 성분과 형태에 대한 정밀분석을 실시하였다. EPMA 분석 결과, 미세한 침상의 결정들이 많이 관찰되었으며, 이들 결정에 대해 주성분 원소의 정량분석을 실시하였다. 그 결과를 표 2에 나타냈으며, 여기서  $\text{SiO}_2$ 의 함량이 평균 59.4%에 해당하고  $\text{MgO}$ 의 평균함량이 24.1%,  $\text{CaO}$ 의 평균함량이 11.5%,  $\text{FeO}$ 의 평균함량이 0.85% 등으로 투각섬석의 이상적인 화학식과 유사하였다. 여기서 Fe의 함량보다 Mg의 함량이 아주 높은 것으로 나타나 Fe-Mg 고용체 광물인 투각섬석-양기석 계열에서 Mg 단종에 거의 근접하는 투각섬석의 성분과 일치하였다. 즉 양기석의 성분은 거의 없는 것으로 나타났다.

투각섬석의 성분 확인과 자세한 형태를 관찰을 하기위하여 SEM을 이용하였다. SEM하에서는 편광현미경하에서 관찰이 어려웠던 미세한 석면형 투각섬석도 잘 관찰할 수 있었다. 관찰 결과, 미국 EPA에서 섬유상 석면의 기준인 폭이  $0.5 \mu\text{m}$  이하인 입자들도 상당량 포함되는 것으로 나타났다. 그러나 곡선적으로 휘 긴 섬유형태의 결정은 거의 나타나지 않았으며, 좀 가늘고 긴 침상의 형태가 일반적으로 나타났다. 즉 섬유상이라고 하기보다는 침상으로 보는 것이 좋을 것으로 생각된다. 섬유상과 침상의 용어 정의가 잘 되어 있지 않아 혼용되어 사용되는 것 같다. 침상의 다발 혹은 엉켜진 형태도 잘 관찰되어 이들에 대한 개별 입자의 형태를 분석하여 그림 6에 나타냈다. 그림에서는 SEM으로 관찰한 섬유상 내지 침상의 입자들에 대해 길이와 폭의 크기를 모두

**Table 2.** Electron microprobe analyses of tremolite in study area (wt.%)

No.	DB4-P1	DB4-P3	DB4-P4	DB4-P5	DB2-P1	DB2-P2	DB2-P5
SiO <sub>2</sub>	59.37	58.30	58.87	60.84	56.93	59.51	55.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10	0.11	0.22	0.45	0.21	0.75	0.14
FeO	0.65	0.48	0.38	0.68	0.98	1.34	1.07
MnO	0.04	0.02	0.01	0.01	0.06	0.03	0.03
MgO	23.30	26.65	24.59	21.21	23.02	24.18	24.66
CaO	13.45	12.86	13.77	11.11	13.68	12.23	12.99
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.04	0.04
K <sub>2</sub> O	0.02	0.01	0.02	0.03	0.00	0.05	0.01
F	0.55	0.05	0.43	0.00	0.48	0.16	0.11
Total	97.51	98.51	98.32	94.36	95.39	98.29	95.03
Σ Numbers of ions on the basis of 23 oxygen							
Si	8.09	7.85	7.97	8.40	7.98	8.02	7.86
Al	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02
Σ Tet	8.09	7.87	8.00	8.40	8.00	8.02	7.88
Al	0.02	0.00	0.00	0.07	0.01	0.12	0.00
Fe	0.07	0.05	0.04	0.08	0.11	0.15	0.13
Mg	4.74	4.95	4.95	4.36	4.81	4.73	4.87
Σ M1, M2, M3	4.83	5.00	5.00	4.52	4.94	5.00	5.00
Mg	0.00	0.41	0.01	0.00	0.00	0.13	0.29
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Ca	1.96	1.86	2.00	1.64	2.05	1.77	1.95
Na	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Σ M4	1.98	2.26	2.01	1.65	2.06	1.91	2.24
Na	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Σ A	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

나타냈다. 편광현미경에서 관찰하지 못했던 0.5  $\mu\text{m}$  이하인 입자들도 많이 포함된 것으로 나타났다. 관찰한 총 입자들에 대하여 EPA에서 기준하는 섬유상 석면인 폭이 0.5  $\mu\text{m}$  이하인 입자들의 비율은 약 37%에 해당되었다. 관찰한 전체 입자들의 길이 평균치는 32.1  $\mu\text{m}$ 이고 폭의 평균은 0.9  $\mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 그리고 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 입자들 중에서 길이 평균은 32.15  $\mu\text{m}$ 이고 폭의 평균은 0.35  $\mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다. 여기서 전체와 미세한 입자의 비교에서 길이는 큰 차이가 없이 유사한 것으로 나타났다. 그리고 전술한 편광현미경에 의한 입자들의 전체

평균 길이가 33.1  $\mu\text{m}$ 인 것을 보면 길이의 평균치는 모두 유사한 값을 나타냈다. 즉, 폭의 차이는 있어도 길이는 평균적으로 비슷한 것으로 같은 조건에서 형성되어 결정성장에 길이에 대한 한계가 있는 것으로 생각된다.

SEM 관찰사진(그림 6)에서 보듯이 일반적으로 이곳의 시료들은 침상과 주상이 혼합되어 나타났다. 그리고 주상 결정의 외부에서도 침상 결정이 공존하는 형태도 관찰되었다. 투각섬석의 C축 방향의 벽개면이 잘 관찰되고 있고, 부분적으로 주상, 도변상, 침상의 결정들이 벽개면을 따라 생성된 모습을 나타

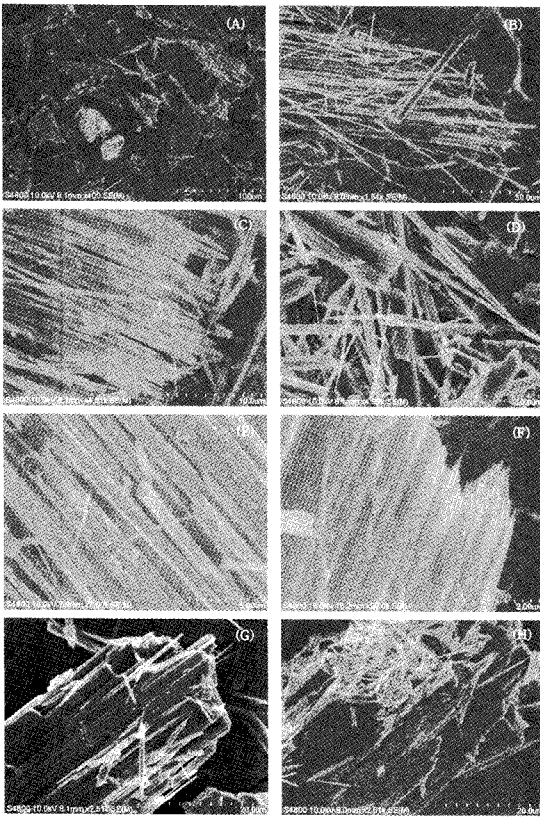


Fig. 6. SEM images of tremolite.

낸다. 그리고 사진에서 보듯이, 같은 방향으로 배열된 침상의 다발과 함께, 벽개면을 따라 도변상, 침상의 결정들이 생성된 모습을 나타낸다. 또한 주상 결정의 끝부분에 작은 침상이 생성되어 있는 모습도 나타난다.

#### 투각섬석의 X-선회절 특성

이곳의 투각섬석 시료를 대상으로 하여 JCPDS 내의 표준 투각섬석의 X-선 회절값과 비교하여 표 3에 나타냈다. 비교한 결과, 이곳의 투각섬석 시료의 회절선이 JCPDS 내의 표준시료와 회절선의 d치와 강도가 거의 유사하게 나타나서 투각섬석으로 판단된다. 그러나 자세히 보면 표준 투각섬석의 X-선 회절선인 (310)의 d값이 3.12 Å에 비해 약간 높은 3.13 Å을 보이고, 반면에 (110)의 d값이 8.38 Å에 비해 약간 낮은 8.37 Å을 보였다. 뿐만 아니라 다른 회절선에 대해서도 d치에 약간의 차이가 나타나는 것으로 보아 표준 투각섬석 물질과는 약간의 차이가

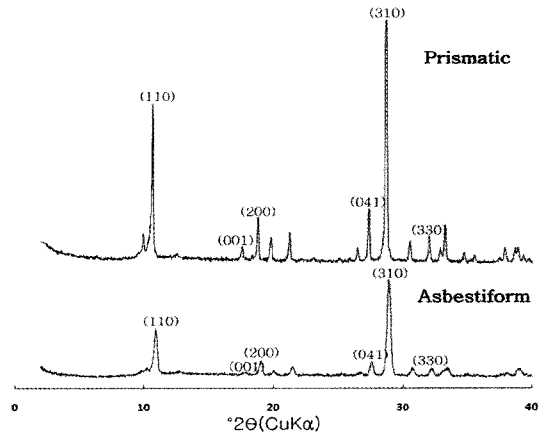


Fig. 7. X-ray diffraction patterns of prismatic and asbestiform tremolite.

나타났다.

투각섬석의 형태 중 섬유상내지 침상을 주로 나타내는 시료와 주상을 주로 나타내는 시료의 결정구조적인 차이를 알기 위해 대표적인 시료에 대해 X-선 회절 분석을 실시하여 자세히 비교하였으며 결과를 그림 7에 나타내었다. 주상의 시료는 회절선이 강하고 뾰족한 형태를 나타내었으나, 섬유상 내지 침상의 경우는 회절선의 강도가 약하게 나타났다. 또한 회절선의 반가폭(높이의 1/2에 대한 회절선의 폭)을 측정하여 비교해 본 결과, 섬유상 내지 침상형의 시료가 주상에 비해 약간 큰 수치를 나타냈다. 5.07 Å 위치의 (130), (001) 회절선 강도가 섬유상 내지 침상형의 시료에서 약간 작게 나타나서 섬유상의 방향성 배열에 따른 영향인 것으로 사료된다. 이에 대해서는 별도로 더 자세히 검토가 필요하다.

#### 주성분원소 분석

투각섬석 시료와 여러 암석의 광물조합별 시료의 주 화학성분 분석치를 표 4에 나타냈다. A조합인 투각섬석을 다량 함유하는 시료의 주 화학성분 중  $\text{SiO}_2$ 가 56.6~59.0 wt.%,  $\text{MgO}$ 가 21.8~24.8 wt.%,  $\text{CaO}$ 는 11.8~15.2 wt.%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 가 0.23~0.29 wt.%의 범위로 역시 순수 투각섬석의 성분에 가깝게 나타났다. B조합에서는 활석을 많이 함유하고 있는 DB-2 시료를 제외하고,  $\text{SiO}_2$ 가 56.8~58.6 wt.%의 범위를 나타냈으며,  $\text{MgO}$ 의 함량이 11.9~19.6 wt.%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 함량이 0.20~1.32 wt.%으로 나타났다. 투각섬석의 함량이 감소할수록  $\text{MgO}$ 의 함량이 적게 나타



**Table 3.** X-ray diffraction compare Boryeong tremolite with standard tremolite

JCPDS (13-437) Tremolite			KS-14		DB-4	
d(Å)	I/I <sub>1</sub>	hkl	d(Å)	I/I <sub>1</sub>	d(Å)	I/I <sub>1</sub>
8.98	16	020	8.99	7	8.98	7
8.38	100	110	8.37	30	8.37	71
5.07	16	130,001	5.10	8	5.08	9
4.87	10	$\bar{1}11$	4.90	5	4.88	7
4.76	20	200	4.77	23	4.75	20
4.51	20	040	4.53	10	4.52	18
4.20	35	220	4.22	10	4.21	21
3.87	16	$\bar{1}31$	3.89	4	3.88	6
3.38	40	150,041	3.39	5	3.38	11
3.27	75	240	3.28	15	3.28	25
3.12	100	310	3.13	100	3.12	100
3.03	10	$31\bar{1},24\bar{1}$	3.02	3	3.03	4
2.938	40	$\bar{1}51$	2.94	11	2.941	18
2.805	45	330	2.81	8	2.807	10
2.730	16	$42\bar{1}$	2.72	5	2.724	7
2.705	90	151	2.707	11	2.706	25
2.592	30	$\bar{1}12,061$	2.594	5	2.593	10
2.529	40	$\bar{2}02,002$	2.53	3	2.53	6
2.407	8	$\bar{1}32$	2.41	3	2.409	5
2.380	30	350,400	2.384	8	2.382	9
2.335	30	$35\bar{1}$	2.328	6	2.331	10
2.321	40	$42\bar{1}$	2.322	4	2.322	8
2.298	12	420,071	2.301	4	2.300	6
2.273	16	112	2.280	2	2.277	5
2.206	6	$\bar{2}42,042$	2.206	1	2.206	3
2.181	6	$44\bar{1}$	2.187	1	2.184	3
2.163	6	171,261	2.164	4	2.164	13
2.042	35	081,280	2.047	2	2.043	4
2.015	18	202	2.02	5	2.017	9
2.002	45	351,370	2.004	3	2.001	6

났다. B 조합에서 CaO는 5.6~20.6 wt.%까지 큰 폭의 범위를 나타냈는데, 여기서 CaO의 함량이 가장 높은 시료는 투회석과 Ca-장석이 상당량 포함되어 있기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 Ca를 포함하는 방해석과 같은 탄산염광물은 전혀 나타나지 않았다. 다른 광물조합을 가지는 여러 암석에 대한 화학성분에서는 CaO와 MgO의 성분은 매우 낮게 나타났다.

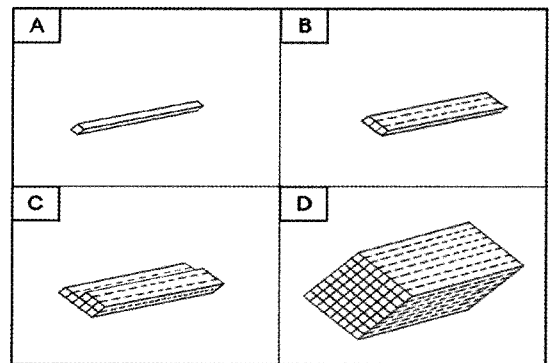
## 고 찰

전술한 내용과 같이 국내에서 투각섬석 석면광산으로 가장 큰 규모로 오래 전부터 생산한 바 있는 충남 보령지역의 중앙(신석)광산과 대보석산광산에 대해서 중점적으로 연구하였다. 이들 광산에 대하여 투각섬석의 지질학적 산출상대와 수반광물을 상세히

**Table 4.** Major element compositions of the rocks in the study (wt.%)

Type	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C	C	D	D	D
No.	DB-3	DB-4	HS-2	HS-8	DB-2	HS-1	HS-3	HS-5	BR-1	BR-2	BR-5	KS-3	KS-11	KS-15	KS-16	KS-12	KS-12-1	KS-21
SiO <sub>2</sub>	56.65	59.03	59.03	57.14	58.00	58.65	56.96	56.84	57.31	69.74	80.91	63.98	64.31	79.22	55.47	56.20	69.04	70.04
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.02	0.02	0.04	0.08	0.08	0.04	0.04	0.24	0.09	0.19	0.56	1.08	0.19	0.89	1.21	0.98	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.06	0.93	2.13	2.58	3.96	10.89	2.15	1.30	17.13	13.44	4.50	16.77	16.64	4.70	14.28	21.19	16.09	18.07
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.18	0.62	0.23	0.29	2.90	0.54	0.20	1.32	1.86	1.15	2.67	1.63	3.55	1.75	10.77	8.16	1.69	0.04
MnO	0.02	0.04	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.06	0.20	0.02	0.01
MgO	24.33	24.85	21.80	23.91	25.81	11.94	17.93	19.66	7.89	2.44	3.21	4.17	0.99	1.69	1.42	1.44	0.83	0.35
CaO	11.86	13.03	15.29	14.36	5.67	9.80	20.62	19.32	1.10	0.92	0.53	1.03	0.07	0.08	0.20	0.68	0.08	0.23
Na <sub>2</sub> O	0.04	0.03	0.09	0.03	0.11	2.02	0.18	0.10	0.35	0.15	0.04	0.16	0.02	0.00	0.46	0.20	0.05	0.00
K <sub>2</sub> O	0.14	0.07	0.69	0.08	0.16	3.83	0.97	0.10	6.70	6.39	0.89	6.36	2.92	1.10	4.17	3.63	5.34	1.55
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.10	0.59	0.57	0.22	0.03	0.11	0.03	0.16	0.21	0.26	0.03
LOI	2.45	1.09	0.55	1.29	2.74	2.00	0.64	1.09	6.77	4.96	6.69	5.02	10.08	9.52	11.34	6.38	5.03	7.83
Total	99.82	99.68	99.86	99.73	99.51	99.77	99.77	99.90	99.95	99.85	99.89	99.72	99.79	98.30	99.22	99.52	99.40	98.18

조사하였고, 석면으로서 투각섬석에 대한 광물학적 특성을 분석하여 새로운 자료를 제시하였다. 이곳의 투각섬석은 아주 긴 섬유상과 함께 침상, 도변상, 주상의 여러 형태가 공생하여 나타났다. 미국 EPA에서는 석면상의 기준으로 길이가 5  $\mu\text{m}$  이상이며, 종횡비가 20에서 100이나 그 이상의 것으로 폭(지름)이 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 가는 개별섬유이며 이들의 다발 및 집합체를 석면 형태로 규정하고 있으며(EPA, 1993), 벽개면을 보이는 것은 석면이 아닌 것으로 규정하고 있다. 전술한 바와 같이 폭 0.5  $\mu\text{m}$  이하의 가는 섬유는 일반적인 광학현미경으로는 잘 관찰되지 않았으며, 전자현미경으로만 관찰이 가능하였다. 크기는 일치해도 벽개면을 보이는 것은 석면이 아니라고 하는 것은 다소 납득하기 어렵다. 왜냐하면 투각섬석은 벽개가 많이 발달하는 광물이므로 높은 배율로 자세히 관찰하면 어떤 결정이라도 벽개면이 관찰될 것이기 때문이다. 따라서 단순히 크기와 형태로서만 석면을 규정하는 것이 좋을 것이다. 이곳에서 관찰된 투각섬석의 결정 형태들은 EPA에서는 규정한 폭이 0.5  $\mu\text{m}$  이하인 매우 가늘고 긴 “섬유상”과 일반적인 석면 기준인 길이 5  $\mu\text{m}$  이상, 종횡비 3이상, 폭 3  $\mu\text{m}$  이하인 “침상”형이 나타났다. 여기서는 이들을 모두 석면상으로 간주하였다. 그리고 얇고 긴 형태의 도변상 결정들도 많이 관찰되었다. 일부 이러한 도변상 결정들은 석면상의 기준에 포함되는 것도 있다. 그리고 석면의 형태에 속하지 않는 주상 혹은 불규칙 형태를 보이는 투각섬석이 다량 포함되

**Fig. 8.** Schematic diagram showing typical crystal forms of tremolite in study area.

어 있다. 광석 및 암석에 따라 투각섬석의 형태가 다양하게 조합되어 나타났다. 석면상의 형태가 많은 것에서부터 석면상이 거의 없이 주상 혹은 불규칙 형태를 보이는 시료들이 관찰되었다. 이와 같이 이곳에서 산출하는 투각섬석 결정의 형태를 나누어 보면 그림 8과 같이 4가지로 구분될 수 있다. 즉, 긴 단일 결정의 섬유상 혹은 침상인 A형태, 그리고 길고 얇은 도변상인 B형태, 복합된 얇은 주상인 C형태, 일반적인 주상인 D형태로 나누어진다고(그림 9). 이들 형태에 대하여 상호 관계를 검토해 본 결과, 투각섬석의 C축 방향과 수직으로 잘 발달하는 벽개면을 따라 분리되어 생성됨으로서 나타난 것으로 생각된다. 이들은 주상에서 단순히 물리적인 작용의

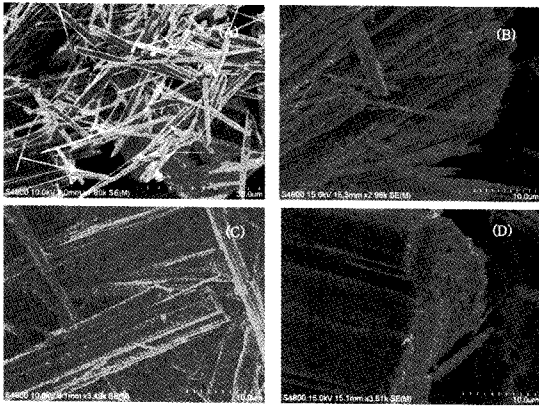


Fig. 9. SEM images showing typical crystal forms of tremolite in study area.

분리에 의해서 형성된 것도 포함될 수 있으나, 대부분은 본래 투각섬석의 형성 당시에 환경조건의 차이에 의한 것으로 생각된다. 주상 결정의 외부 일부분에서 침상의 결정이 생성되어 있는 것이 잘 관찰되는 것으로 보아 섬유상 혹은 침상의 투각섬석은 주상의 결정이 형성된 이후에 생성된 것으로 볼 수 있다. 따라서 섬유상 혹은 침상의 투각섬석은 주상의 것과는 생성시기와 조건이 약간 다른 것으로 생각된다.

일반적인 석면 기준인 길이  $5\ \mu\text{m}$  이상, 종횡비 3 이상, 폭  $3\ \mu\text{m}$  이하의 형태를 가진 투각섬석 결정에 대하여 편광현미경과 SEM으로 관찰한 결과, 길이는 최대  $210\ \mu\text{m}$ 에 해당되는 것도 있으나 평균치로는  $31.2\ \mu\text{m}$ 이고, 폭은 평균  $1.6\ \mu\text{m}$ 을 나타내었고 종횡비는 평균 19.9에 해당되었다. 편광현미경과 SEM에서 폭  $3\ \mu\text{m}$  이하의 입자에 대한 길이는 그리고 전술한 편광현미경에 의한 입자들의 전체 평균 길이가  $33.1\ \mu\text{m}$ 인 것을 보면 길이의 평균치는 모두 유사한 값을 나타냈다. 즉, 폭의 차이는 있어도 길이는 평균적으로 비슷한 것으로 같은 조건에서 형성되어 결정성장에 길이에 대한 한계가 있는 것으로 생각된다.

그리고 편광현미경에 의한 투각섬석의 신장방향에 대한 소광각은  $6.1\sim 20.2^\circ$ 의 범위로 사소광의 성질을 나타내었다. 석면상과 비석면상의 투각섬석에 대한 X-선회절분석의 결과에서도 회절선의 강도비와 반가폭에서 약간의 차이를 나타냈다. 이상과 같은 투각섬석에 대한 광물학적 자료는 국내 투각섬석의 특성에 대한 새로운 자료로 사료된다.

연구지역 투각섬석 석면광상의 성인에 대하여

대한광업진흥공사의 한국의 광상(1988)에 따르면 백운암질 석회암의 열수변질작용에 의해 생성되었다고 기재되어 있다. 그러나 이 지역에 대해 광역적으로 조사한 결과, 백운암질 석회암을 발견하지 못했으며 지질도폭에서도 언급되어 있지 않다. 이곳에서 채취한 많은 광석 및 암석시료를 분석한 결과에서도 탄산염광물은 거의 나타나지 않았다. 이와 같이 백운암질 석회암에서부터 형성되었다면 과잉의 Ca은 주변에 침전되어 남아있을 것으로 생각되지만 실제로 방해석과 돌로마이트 등의 광물들은 나타나지 않았다. 충남지역의 홍성 및 광천에 나타나는 사문석과 석면광상은 초염기성암의 변성작용에 의해 형성된 것으로 보는 연구도 있다(우영균과 강희주, 1999; 서만철과 우영균, 2000; 우영균과 서만철, 2000). Veblen and Ribbe (1982)에 따르면 초염기성암의 관입 시 모암과의 경계부에 “blackwall zone”이 존재하며 이 zone에 녹니석 또는 흑운모 등이 존재할 때에 변성교대작용을 통하여 투각섬석이 생성될 수 있다고 한다. 투각섬석이 생성되는 곳에서는 하나 또는 다른 광물들(Mg-각섬석류, 활석, 녹니석, 투휘석, 금운모, 스피넬, 석류석, 사장석 등)이 수반되어 나타날 수 있다. 이곳 광산에서 투각섬석과 함께 염기성 내지 초염기성암에 주로 포함되는 투휘석이 수반되어 나타났다. 이번에 조사한 충남 보령시 오천면의 두 광산지역에서는 사문암과 같은 초염기성암이 관찰되지 않았다. 그러나 이번 조사에서 보령시 청소면에 위치하는 진죽(보령)광산에서 투각섬석이 산출되었으며 바로 그곳에서 초염기성암인 사문암체가 나타났고, 광천광산에서도 사문암체가 나타나고 있다. 그리고 중앙(신석)광산에서는 석면광석을 채굴한 주변부에 해당되는 곳에 전술한 바와 같이 흑색의 암석이 나타났는데, 이것이 혹시 “blackwall”에 해당되는 것은 아닐지 의심이 든다. 그러나 이 광산 주변에 노두가 많지 않아 광상의 성인에 대해서는 이번 연구로서는 결론을 말할 수 없다. 이에 대해서 모암이 돌로마이트질 석회암인지 초염기성암인지에 대한 검토를 포함하여 더 자세한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

앞에서 검토한 투각섬석의 형태로 보아 주상의 큰 결정들은 섬유상내지 침상의 결정보다도 먼저 형성된 것으로 사료되며, 아마 상대적으로 약간 높은 온도와 압력의 조건이 아닐까 생각된다. 일반적인 광물의 성장조건을 생각해 보면, 높은 온도와 압력이 일정하게 오래 지속되는 조건에서 3차원적으로 성장한 큰 결정의 투각섬석이 형성되었을 것으로

생각된다. 그러나 섬유상내지 침상의 투각섬석은 액상의 비율이 높은 열수환경에 해당되는 조건에서 자유롭게 고유의 정벽으로 성장된 것으로 추정된다. 그러나 이에 대해서는 관련 연구자료가 거의 없고 충분한 연구가 이루어지지 않아, 차후 더 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.

## 결 언

충남 보령지역의 투각섬석 석면광산인 중앙(신석) 광산과 대보석산광산에 대해서 투각섬석의 산출상태와 수반광물을 상세히 조사하였고, 석면으로서 투각섬석에 대한 광물학적 특성을 분석하여 새로운 자료를 제시하였다. 그리고 석면광상의 성인과 형태별 투각섬석의 형성과정도 약간 고찰해 보았다.

이곳의 투각섬석은 활석, 석영, 운모, 장석, 녹니석, 투회석 등과 수반되어 나타나며, 투각섬석이 다량 함유되는 시료에서는 활석이 소량 수반된다. 투각섬석은 아주 긴 섬유상과 함께 침상, 도변상, 주상의 여러 형태가 같이 공존하였다. 유해석면의 기준에 해당되는 투각섬석에 대해 편광현미경과 SEM으로 형태를 분석한 결과, 길이는 최대 210  $\mu\text{m}$ 에 해당되는 것도 있으나 평균치로는 31.2  $\mu\text{m}$ 이고, 폭은 평균 1.6  $\mu\text{m}$ 을 나타내었고 종횡비는 평균 19.9에 해당되었다. 투각섬석의 신장방향에 대한 소광각은 6.1~20.2°의 범위로 사소광의 성질을 나타내었다. 석면상과 비석면상의 투각섬석의 XRD 패턴도 약간의 차이를 나타냈다. EPMA의 분석 결과, 이곳의 투각섬석은 Mg성분이 Fe보다 월등히 높게 나타나서 Mg단종인 투각섬석으로 확인되었다. 형태상으로 석면상과 주상의 투각섬석은 형성조건이 서로 다소 다른 것으로 보이며, 주상의 투각섬석이 먼저 형성되고 그 이후에 섬유상 및 침상의 투각섬석이 형성된 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구지원사업의 연구(과제번호 2009-0073549)이며, 이에 감사한다. 본

논문을 심사하여 주신 윤혜은 박사님과 익명의 심사위원께도 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김봉균 (1963) 한국지질도 1:50,000 서천지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 노동부 (2003) 석면관련 규정.
- 대한광업진흥공사 (1988) 한국의 광상, 11호, 비금속편.
- 서만철, 우영균 (2000) 충남지역 초염기성암체의 지구 물리학적 특성 : 탄성과 속도 특성. 한국지구과학회지, 21, 349-358.
- 우영균, 강희주 (1999) 충남 홍성군 월현사문석광상 사문암의 변질작용. 한국지구과학회지, 20, 189-198.
- 우영균, 서만철 (2000) 충남지역 초염기성암체의 암석학적 연구. 지구과학회지, 21, 323-336.
- 이종혁, 김성수 (1963) 한국지질도 1: 50,000 홍성지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- 조선총독부 (1931) 조선지질도 제 13집, 대천도폭, 조선총독부 지질조사소.
- 환경부 (2009) 석면공장 및 광산 등의 인근 주민 석면노출로 인한 건강영향조사를 위한 기초연구, 국립환경과학원.
- EPA (1993) Method for the determination of asbestos in bulk building materials.
- Langer, A.M., Nolan, R.P., and Addison, J. (1991) Distinguishing between amphibole asbestos fibers and elongate cleavage fragments of their non-asbestos analogues. In: Brown, R.C., Hoskins, J.A., Johnson, N.F. (Eds.), Mechanisms in Fiber Carcinogenesis, Plenum Press, New York, 253-267.
- Stanton, M.F., Layard, M., Tegeris, A., Miller, E., May, M., Morgan, E., and Smith, A., (1981) Relation of particle dimension to carcinogenicity in amphibole asbestoses and other fibrous minerals. J. Natl. Cancer Ins., 67, 965-975.
- Veblen, D.R. and Ribbe, P.H. (1982) Amphiboles: petrology and experimental phase relations. Reviews in Mineralogy 9B, Mineralogical Society of America, Washington, 372p.

접수일(2010년 2월 19일), 수정일(1차 : 2010년 3월 25일), 게재확정일(2010년 3월 25일)