

충남 광천지역 석면의 산출 유형 및 광물학적 특징

송석환 · 황정환¹ · 황범구² · 김현욱^{1†}

중부대학교 환경보건학 · ¹가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실 · ²한국화학시험연구원

Occurrence types and mineralogical characteristics of asbestos for the Kwangcheon area, Chungnam

Suckhwan Song · Jung Hwan Hwang¹ · Byum Goo Hwang² · Hyunwook Kim^{1†}

*Dept. of Environmental Health, Joongbu University, Dept. of Preventive Medicine,
¹Coll. of Med., The Catholic University of Korea, ²Korea Testing & Research Institute*

This study is to characterize the occurrence types and mineralogical characteristics of asbestos for the Kwangcheon areas, Chungnam. The mine areas had been exploited as asbestos mines for several decades since 1930. Host rocks of the asbestos are serpentinites and altered rocks of the ultramafic rocks.

Representative samples of the host rocks and minerals were sampled and were examined with microscopes. To confirm for the existences and compositions of the asbestos, the rock samples were analysed with EPMA, XRD and EDS.

Chrysotile, tremolite and actinolite were found as asbestos and non-asbestos forms in these areas. Chrysotiles, as non-asbestos forms, occur in the host rocks with mesh and hourglass

textures. They, as asbestos forms, are mainly found as the veins. The tremolite and actinolite, as asbestos types, occur as alteration products of the olivine and pyroxene within the host rocks. They, as asbestos types, are also found following the cracks and fractures.

Overall results suggest that three types of the asbestos are found in the Kwangcheon and Kaewol mine areas. Based on the occurrence types for the asbestos, additional studies are required for the asbestos in the top soil and air.

Key Words: Kwangcheon, asbestos, chrysotile, tremolite, actinolite

I. 서론

석면(asbestos)은 사문석 및 각섬석 광물에서 채취된 섬유 모양의 규산화합물 총칭이다. 이 광물은 인장내력과 유연성이 뛰어나고, 불연성과 내마모성, 절연성 등의 특성 때문에 일상 생활에 대단히 유용한 물질로 사용되어 왔다. 이 광물은 전 세계의 사문석 및 석회석 분포지역 토양 및 암석 모두

에서 발견이 되고, 석면제품을 이용했던 건축물을 해체 및 제거하는 과정에서 노출되며, 지하철 등의 폐쇄 공간에서도 사용되어 공기 중으로 비산되므로, 인간은 석면으로부터 영향을 피할 수 없다(Klerk 등, 1989, 1996; Meurman 등, 1999; 한국산업안전공단, 2006, 2007).

석면 섬유에 장기간 호흡기를 통해 노출되면 15~40년의 잠복기를 거쳐 석면폐증(asbestosis), 폐암(lung cancer), 악성 중피

접수일: 2008년 8월 12일, 채택일: 2008년 12월 12일

† 교신저자: 김현욱 (가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실, 서울 서초구 반포동 505 번지 137-701
Tel: 02-590-1237, E-mail: hwkim@catholic.ac.kr)

종(mesothelioma) 등을 유발하며, 섭취 시에는 장관계의 암과 인후두암, 신장암, 췌장암, 임파선암 등을 유발 할 수 있다(Artvinii 등, 1979). 이런 이유들로 국내 및 세계 여러나라들은 석면으로부터 오는 피해에 대해 경계심을 늦추지 않고 있다(한국석면공업협의회, 1989; 한국산업안전공단, 2006).

석면의 주요 생산국은 러시아, 중국, 캐나다 등으로 연간 200만 톤 정도이며, 세계 각국으로 수출되고 있다. 이들의 99% 정도는 백석면이다. 이 백석면이 청석면에 비하여 인체 유해성이 낮다는 이유로 아직도 여러 나라에서 사용을 허가하고 있기 때문이다(최정근, 1998).

우리나라도 1930년대 중반 전국에 걸쳐 석면광산이 개발되었고 이때 생산된 석면의 대부분은 일본으로 수출되었다. 해방당시 전국의 석면광산은 총 28개에 이르렀고, 대표적인 백석면 광산인 광천광산은 1984년 폐광될 때까지, 총 145,000 톤이 생산된 것으로 추정되고 있다(최정근 등, 1998). 하지만 1984년 이후 광맥의 빈약과 인건비 상승으로 생산은 중단되고 국내의 석면은 전량 수입에 의존해 왔다(한국산업안전공단, 2006).

현재 전 세계에서 1억 2,500만 근로자가 석면에 노출되어 있고, 매년 약 9만 명의 근로자가 석면 노출과 관련된 석면폐증, 폐암, 악성중피종 등의 질병으로 사망하는 것으로 추정된다(Driscoll 등, 2005). 석면 노출과 폐암 발생과의 관계에 대한 많은 연구들도 석면에 노출되면 석면의 종류에 상관없이 모두 통계적으로 유의하게 폐암 사망위험을 증가시킨다고 보고하고 있다(Amands와 Wheeler, 1987; Klerk 등, 1996; Enterline 등, 1987; Meurman 등, 1994; Seidman 등, 1979). 한국의 경우도 홍성과 광천 지역에 석면이 함유된 사문석, 활석 광산(Wee 등, 1994; 송석환과 송윤섭, 2001; 우영균과 서만철, 2000)등이 분포하고 있고, 광산주변 거주자는 석면 노출이 가능하다고 보고 있다(최정근 등, 1998).

실 예로 외국에서도 토양이나 광물에 석면섬유가 함유된 특정 지역에서 폐암이나 중피종암 발생률이 높았고(Artvinii 등, 1979), 국내에서도 17년 동안 사문석 광산에서 근무한 56세의 남자가 노출환경은 알 수 없으나 중피종암이 발생했다고 보고된 바 있다(한국산업안전공단, 2006). 이런 이유로 한국에서는 석면을 산업안전보건법에 특별한 관리가 요구되어 제조·수입·양도·제공 또는 사용이 금지되는 유해물질로 지정하고 있다(한국산업안전공단, 2006).

따라서 본 연구에서는 기존에 석면광산으로 기록된, 광천 및 계월 광산을 선택, 기존의 자료를 조사, 석면광산을 재고해 보고, 광산 주변에 대해 상세한 지질 조사를 실시하였으며, 모암에 대한 암석학적, 광물학적 연구를 진행하였다. 이를 근거로 두 석면 광산 내에 다양하게 산출되는 석면의 산상을 알아보고, 이들에 대해 물리, 화학적 특성을 알아보았다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 연구 지역의 지질

연구 지역의 지질은 다수의 연구자들에 의해 언급된바 있으므로 여기에서는 약술하겠다(이종혁과 김성수, 1963; 송석환과 송윤섭, 2001; 송석환 등, 2004). 연구 지역은 하부의 선캄브리아기 편마암류 및 변성 퇴적암류와 이를 관입하는 중생대의 화성암류로 구성되어 있다.

편마암류는 호상 및 안구상 편마암으로 층리면 주방향은 N30-40° E, 30-50° NW이다. 호상 편마암은 우백대와 우흑대의 광물조합 차이가 두드러지며, 안구상 편마암은 0.5-4 cm 크기의 안구형 알칼리 장석이 두드러진다. 이 편마암류는 균열을 따라 후기에 침투한 열수에 의해 형성된 질석을 다량 포함하고 있다. 주 구성광물로 흑운모, 각섬석, 석영, 사장석 및 알칼리 장석을, 부 구성광물로 석류석, 규선석, 녹리석, 불투명광물을 포함한다(이상헌과 최기주, 1994).

변성퇴적암류는 함 흑운모 또는 함 흑운모-각섬석 편암으로 구분되고, 암석의 층리면 방향은 N20-30° E, 70-90° NW이다. 이 편암들 사이에 변성 염기성암이 협재되어 산출된다. 일반적으로 변성퇴적암류는 주 구성광물로 흑운모, 각섬석, 석영, 사장석, 알칼리 사장석을, 부 구성광물로 석류석, 녹리석, 불투명광물을 포함한다. 반면 변성 염기성암은 각섬석을 주로 포함하며, 흑운모, 녹리석, 사장석, 불투명광물 등을 부 구성광물로 포함한다.

중생대의 관입암체로는 홍성 화강암류, 창곡리 섬록암과 반 화강암질암, 우백질 화강암 등이 있다. 홍성 화강암류는 중립에서 조립의 알칼리 장석과 흑운모가 두드러지며, 사장석, 석영, 흑운모, 백운모, 자철석, 녹리석, 인회석 등을 포함하기도 한다. 창곡리 섬록암은 편마암류 및 변성퇴적암류를 포획하거나, 초염기성암을 관입하기도 한다. 각섬석, 흑운모, 사장석을 주 구성 광물로, 알칼리 장석, 석영, 각섬석, 녹리석 등을 부 구성광물로 포함한다.

반 화강암질암은 세립의 우백질이고, 우백질 화강암은 중립에서 세립의 입상 구조를 보인다. 이 두 암체들은 주 구성광물로 석영, 사장석, 알칼리 장석을 부 구성 광물로 흑운모, 백운모, 견운모 등을 포함한다. 이 외에도 산성에서 염기성 조성의 맥암류가 다수 분포하고 있다.

2. 모암의 야외 산상

광천 및 계월의 초염기성암은 각각 N17-25° E, N20-30° E 방향으로 주변암인 변성 퇴적암류와 단층관계로 접하고 있다(Fig. 1). 부분적으로 단층 접촉부에 단층점도를 형성시키

거나 단층 활면을 보여 초염기성암이 지표면에 정치된 후 이동되었고 초염기성 암체 내에 수차례에 걸친 단층작용을 받았음을 암시한다(송석환 등, 2004). 두 암체는 일제시대 때 석면 광산으로 많은 양이 채굴되었던 대표적인 지역이고, 특히 광천 지역의 광상은 1980년대 초까지 채굴이 진행되었던 곳이다.

각각을 살펴보면 계월 암체는 각각 70-80 m 폭과 100-120 m 길이의 안구상 형태로 북북동-남남서 방향으로 신장되어 산출된다. 현재는 광산이 폐업 한 후 폐석더미가 쌓여 있던 공터 지역은 논과 밭으로 사용되고 있고, 이를 경작하는 민가가 기존 광산 지역 내와 인접 마을에 위치하고 있다.

광천 지역은 두 암체가 분리되어 남북 방향으로 신장되어 나타는데 북쪽 암체는 수년전에 복원되어 상부 지역은 나무가 식재되어 있고, 평탄 작업을 한 하부는 민가 및 공장이 위치하고 있다. 남쪽 암체는 20-30 m 폭과 90-120 m 길이의 북북동 방향으로 신장되어 나타난다. 이곳 남쪽 암체는 폐광 후 방치 되어 있어 야외 지질학적 특징 및 모암 내 석면의 산상을 명확히 볼 수 있는 곳이다.

두 광산 지역에서 석면유형의 광물로 균열(Crack) 및 열극(Fracture)를 따라 수 cm에서 수 십 cm 폭으로 액티노라이트 및

트레몰라이트가, 세맥(vein)을 따라 열수에 의해 수 mm에서 cm의 두께로 형성된 백석면이 산출되고 있다. 두 지역은 세맥을 따라 백석면 및 트레몰라이트가 같이 공존하며 산출되거나, 인근 지역들과 같이 액티노라이트 및 트레몰라이트가 균열 및 열극을 따라 버미큐라이트와 누대구조를 이루며 산출된다. 또한 대부분의 균열, 열극 및 세맥에 다수의 버미큐라이트가 산출된다.

현재 두 광산 중 광천 광산의 북쪽 부분은 폐광에서 나온 토양으로 복토 후 식재하여 복원을 하였다. 또한, 광천 광산의 경우는 사문암체가 노출된 능선에 다량의 백석면이 토양 중에 노출되어 있다.

3. 시료 채취

지난 수 십여 년간 한국의 대표적 석면광산으로 개발되었던 폐광된 충남 홍성군의 계월 및 광천 광산, 두 곳을 선정하여 2007년 중반부터 2008년까지 초반 까지 7개월 동안 기존 연구를 근거로 상세한 야외 조사를 실시하였다. 야외 조사로서 석면의 모암과 인접 주변 암과의 관계를 규명하고, 모암의 시료와 더불어, 사문암체내에서 석면 시료를 채취하였다.



Fig. 1. Photographs of the mine areas(upper) and outcrops(lower) for the serpentinites, Chungnam. A, C) Kaewol and B, D) for Kwangcheon areas.

기 연구 된바와 같이 모암시료 내에서도 사문석 및 각섬석이 기재된 바 비석면 사문석계열인 크리소타일, 리자다이트 및 안티고라이트와 각섬석 계열인 액티노라이트 및 트레몰라이트를 확인하기 위해 변질 정도에 따라 모암 시료를 채취하였다. 또한, 암석의 틈을 따라 산출되는 석면 계열 광물의 산상을 알아보기 위해 암석의 균열(Crack), 열극(Fracture), 세맥(vein)을 고려하여 시료를 채취 하였다.

4. 측정 및 분석 방법

광물의 광학적 특성 및 화학조성을 알아보기 위해 편광 현미경 및 주사전자현미경을 통한 관찰과 화학적 분석이 진행되었다.

첫째 편광현미경을 통하여 모암 및 광물시료를 관찰하였고, 이를 위해 박편을 제작하였다. 박편은 입자박편과 연마박편으로 구분이 되는데 단단하고 쉽게 부서지지 않는 시료는 연마박편을, 연약한 시료는 접착제를 이용하여 굳게 한 후 연마 박편과 동일한 과정으로 입자박편을 제작한다. 이 박편을 편광현미경(Polarized Light Microscopy, PLM)은 BX51, Olympus(Japan)을 이용하여 재물대 위에 올려놓고 광물 조합을 관찰하고, 현미경 상부에 있는 카메라를 이용하여, 대표적인 부분에 한해 사진 촬영을 하였다.

둘째 석면계열의 사문석 및 각섬석으로 판명된 섬유상 형태를 가진 결정을 핸드밀(Mill)로 100 μ m 이하로 분쇄하여 편광현미경을 이용하여 광학적 특성을 파악하였다. 이에 미국 환경보호청(Enviromental Protection Agency, EPA)의 600/R93-116 방법이 적용되었고, 광물의 형태, 굴절률, 분산염색의 색상, 교차편광, 복굴절, 소멸각, 신장부호를 확인하여 석면의 여부 및 종류를 파악하였다(Perkins 등, 1993).

셋째 모암시료를 100 μ m 이하로 분쇄하여 15 nm로 Pt 코팅된 시료를 만 배 확대하여 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)은 FNOVA NANOSEM 400FEI(USA)을 이용하여 섬유조직의 형태를 확인하였다. 분석 조건은 가속전압 20 kV, working distance 5 mm이다.

넷째 연마 박편으로 제작된 광물 및 암석 시료를 전자탐침 미세분석기(Electron Probe Micro Analyzer, EPMA)를 이용하여 주 원소 분석을 실시하였다. 측정된 결과값은 ZAF 보정법으로 보정하고 화학 조성비를 계산하였다. 이 결과를 광물 구조식에 맞게 재계산하여 각섬석 분류표(Amphibole Classification)에 도시하여, 트레몰라이트와 액티노라이트로 구분하였다.

이 연구에서 사용된 전자탐침 미세분석기는 JEOL Superprobe, JXA-8600SX와 CAMECA SX-50 EDS 였다(분석조건은 각각 가속전압 15 kV, 15 kV, 시료전류 3 nA, 20 nA, 측정시간 100 sec, 10 sec).

다섯째 핸드밀로 100 μ m 이하로 분쇄된 분말 시료를 X-선 회절분석기(X-ray powder diffraction, XRD)를 이용하여 광물의 종류를 파악하였다.

이 결과 고유의 각에서 나타나는 d값을 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 표준참고물질(Standard Reference Materials, SRM)과 비교하여 규제 대상인 석면의 여부와 종류를 판명하였다. 이 연구에서 사용된 X-선 회절분석기는 LabX XRD-6000, SHIMADZU (JAPAN)이다(분석 조건은 X -선;Cu K α 선 40kV-40mA), 단색화;Graphite, Monochromator, 주사범위;5~60° 2 θ), 주사속도;1° 2 θ /분, 0.02° 스텝, 시료회전;60 RPM).

여섯째 에너지 분산 분광장치(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, EDS)를 이용한 화학 분석이 있다. 에너지 분산 분광장치는 전자빔을 물질에 주사할 때 발생하는 2차 전자를 이용하여 물질의 표면을 관찰하고, 또한 이때 발생하는 특성 X-ray를 확인하여 점, 선, 면 분석을 할 수 있어 미세조직의 특성영역을 분석한다. EDS는 WDS에 비하여 peak의 분해능과 정량분석시의 정밀도가 떨어지는 단점이 있으나, 조작이 매우 간단하여 초보자도 쉽게 사용할 수 있다. 현재 EDS는 Si(Li) detector가 널리 사용되어 지고 있으며 이는 20 keV 범위까지 검출이 가능하다. Window를 통하여 받아들인 X-ray는 Si(Li) 검출기를 거쳐 X-ray에 의해서 유발되는 전류만큼 그 X-ray가 존재하는 동안 지극히 작은 전류인 펄스로 흐르게 되고 이를 증폭하여 적절한 계량장치로 X-ray 광자의 양을 측정한다. 이 연구에서 사용된 에너지 분산 분광장치는 NORAN system SIX, THERMO(USA)이다. 필터탈진주기는 사실상 모두 9분으로서 같아지게 된다.

III. 결과 및 고찰

1. 모암의 광학적 특성

두 지역은 석면 광산으로 개발되었던 지역이나, 변질 정도에 따라 암석의 광물 조합 및 조직은 두드러진 차이를 보인다(Fig. 2).

일반적으로 사문암화가 덜 진행된 계월의 암체는 감람석, 사방회석, 각섬석을 주 구성광물로, 침정석, 자철석, 운모류 등을 부 구성광물로 포함하며, 광물 조성상 듀나이트 또는 하즈버자이트에 해당된다. 사문암화가 진행됨에 따라 유색 광물의 함량이 감소하고 각섬석, 사문석 및 자철석의 양이 증가한다.

또한 이 암석은 수회에 걸친 사문암화, 활석화, 녹리석화 작용과 같은 변질의 흔적을 보이고, 변성작용에 의해 재결정

작용 및 잔쇄반상 조직을 보인다. 잔쇄 반상 결정은 대부분이 사방회석이고, 이를 둘러싸고 있는 주변의 기질에는 감람석, 사방회석, 각섬석이 있다.

이와는 반대로 광천 지역의 암체는 대부분이 수회애 걸쳐 심하게 사문암화 및 활석화되었고, 따라서 원암의 특성은 사문암화 된 감람석 및 회석의 가상으로서 가능하다. 다만 일부 암체만이 트레몰라이트 및 액티노라이트를 보이고 있으나, 이들조차도 대부분이 녹리석화 되었다.

계월 및 광천 지역에서 석면은 균열(Crack) 및 열극(Fracture)을 따라 형성된 수 cm에서 수 십 cm 폭으로 나타나는 액티노라이트 및 트레몰라이트와, 균열을 따라 유입된 열수에 의해 수 mm에서 cm의 두께로 형성된 백석면이다(Fig. 1). 사문석 모암 자체에도 약한 담녹색을 띠는 액티노라이트 및 트레몰라이트가 존재하며, 백석면이 발견되고 있고. 비석면 광물인 리자다이트 및 안티고라이트도 산출되고 있다(Fig. 2). 편광현미경 하에서 이들 석면광물의 존재가 확인 되었다.

2. 편광현미경(PLM)에 의한 광학적 분석

EPA 600/R92-116 방법으로 석면 여부를 동정한 결과 광천 광산과 계월광산에서 석면 유형의 백석면, 트레몰라이트와

액티노라이트가 동일하게 검출되었다(Table 1, Fig. 3).

즉 광천 광산의 경우 크리소타일은 망상, 물시계, 리본 조직을 보이며, 굽이치는 형태를 보였고, 트레몰라이트와 액티노라이트가 공존하는 형태는 침상(Acicular) 조직을 보였으며, 직선 및 곡선 형태를 보였다. 한편, 버미큐라이트는 판상(Platy) 및 침상(Acicular) 조직을 보였고, 전자는 석면을 포함하지 않았으나, 후자는 석면을 포함하였다.

계월광산의 크리소타일은 망상, 물시계, 리본조직을 보이며, 굽이치는 형태를 보였고, 트레몰라이트와 액티노라이트가 공존하는 형태는 침상 조직을 보였으며, 직선 및 곡선 형태를 보였다. 한편 버미큐라이트도 판상 조직을 보였고, 석면을 포함하지 않았다.

3. 전자탐침미세분석기(EPMA)를 이용한 광물 분석

각섬석 및 사문석의 존재를 확인하기 위해 EPMA 분석을 실시하였다. 각섬석의 결과치는 각섬석 분류표에 도시하였다. 두 광물 공히 모암에서 산출되었고, 암석의 깨진 틈을 따라서 산출되었다. 하지만 명확한 차이가 두 모암에서 나타났다. 광천의 모암은 거의 대부분이 사문암화 및 활석화 되어

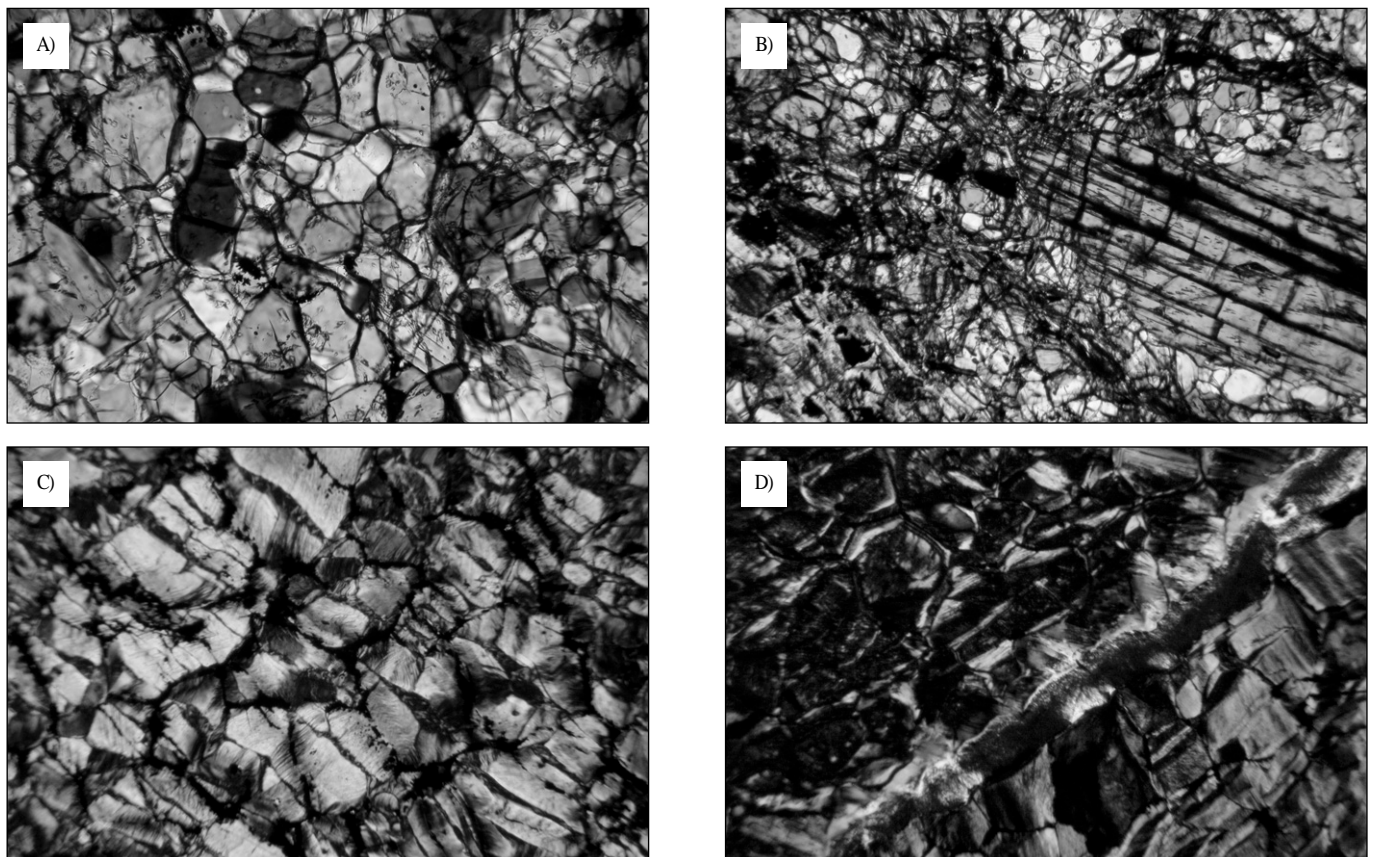


Fig. 2. Photomicrographies for the serpentinites. A, B), C) Kaewol and D) for Kwangcheon areas.

Table 1. Morphologies of minerals from Kwangcheon and Kaewol mines analysed by PLM

Area(mine)	Type	Crystal habit	Shape	Color	Detected
KC	CT	Mesh Texture, Hourglass Texture, Ribbon Texture *	wavy	magenta, blue	*
	TL/AL	Acicular *	straight, curve	orange, blue	*
	VL	Platy(†), Acicular(*)	†	†	*, †
KW	CT	Mesh Texture, Hourglass Texture, Ribbon Texture *	wavy	magenta, blue	*
	CT	Acicular *	straight, curve	orange, blue	*
	CT	Platy(†)	†	†	*, †

KC:Kwangchun, KW:Kaewol

CT:Chrysotile, TL/AL:Tremolite/Actinolite, VL:Vermiculite

*: asbestos form †: Non asbestos form

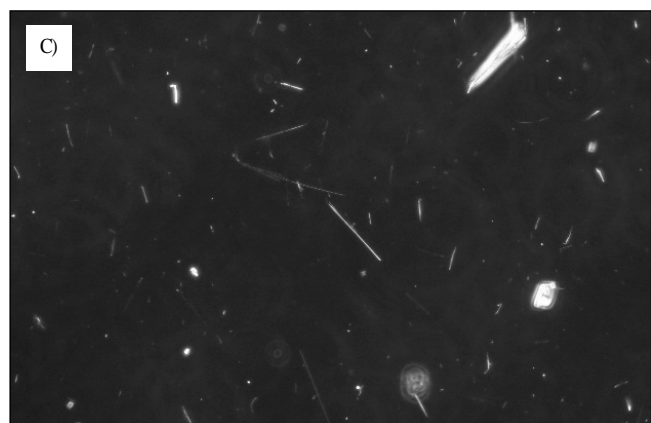
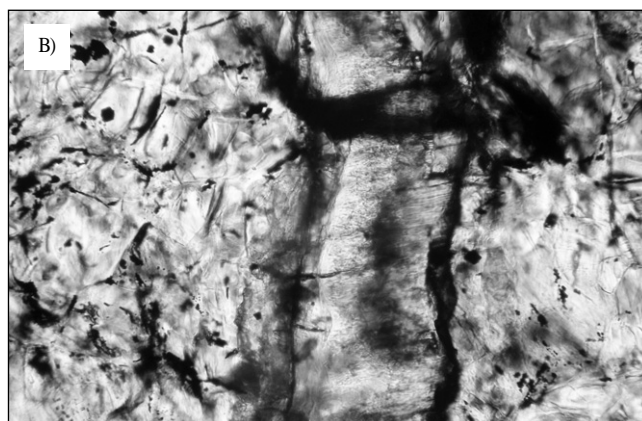
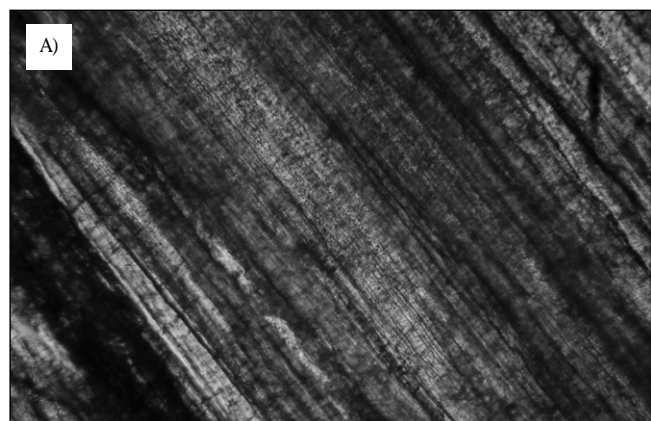


Fig. 3. Photomicrography and PLM for the serpentinites. A, C) Kaewol and B, D) for Kwangcheon areas.

각섬석의 존재가 드물게 발견 되었고, 대부분이 변질에 의해 섬유상 결정으로 산출되며, 트레몰라이트에서 액티노라이트 조성을 보였다(Table 2, Fig 4).

반면, 계월 모암은 변질 및 변성 정도에 따라 다양한 조직 및 화학조성을 보인다. 변질을 덜 받은 부분의 각섬석은 자형 및 반자형의 격리된 결정으로 또는 변성작용에 의해 형성된 거정질의 결정 주변의 재결정 광물로, 하지만 변질의 영향을 크게 받은 결정은 섬유상 형태를 보였다. 이 각섬석들은 모두 Ca-각섬석이나, 전자 두 형태는 진한 자색에서 청색, 녹색을 띄고, 트레몰라이트 각섬석에서 마그네시오 각섬석 조성을 보이고, 비석면의 유형에 해당되나, 마지막 형태는 연녹색을 띄고, 트레몰라이트에서 액티노라이트 조성을 보이고, 석면 유형에 해당된다.

한편 석면 계열의 각섬석인 트레몰라이트와 액티노라이트가 섬유상으로 암석의 깨진 틈에서 다량 산출된다. 이 광물들은 흔히, 균열 및 열극에서는 버미큘라이트와 누대 구조를 보이며 산출되고, 작은 세맥에서는 크리스타일과 공존하며 산출된다.

사문석은 모암에서 감람석 및 휘석의 변질물로서, 격자형 망상, 물시계, 리본 조직과 같은 다양한 조직을 보인다. 광물 조성상 크리스타일, 리자다이트 및 안티고라이트에 해당되고, 비사문석에 해당 된다(Table 2). 한편 사문석 중 석면 계열의 크리스타일은 작은 세맥을 따라 산출되거나, 균열에서 트레몰라이트와 공존하며 산출된다. 하지만 광물 분석 결과 원소함량에서 석면 및 비석면 계열의 사문석은 구분이 되지 않았다.

Table 2. Elemental contents of amphibole(A) and serpentine(B) from Kwangcheon and Kaewol mines analysed by EPMA (Unit:Wt%)

A)	KC1	KC2	KC3	KC4	KW1	KW2	KW3
SiO ₂	57.05	57.14	56.53	56.59	58.06	53.18	50.66
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.32
Al ₂ O ₃	0.17	0.63	0.80	0.95	3.91	3.91	6.76
FeO	3.83	2.45	2.21	3.05	3.47	3.47	3.83
MnO	0.27	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.33
MgO	21.10	23.64	23.31	22.75	21.95	21.95	20.30
CaO	13.07	12.10	12.49	12.28	11.93	11.93	12.83
Na ₂ O	0.00	0.24	0.33	0.28	0.74	0.74	1.11
K ₂ O	0.00	0.14	0.00	0.00	0.13	0.13	0.34
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.56	0.76	0.76	1.03
Total	95.49	96.34	95.67	96.46	96.34	96.34	97.17
B)	KC5	KC6	KC7	KC8	KC9	KW4	KW5
SiO ₂	40.34	42.46	43.69	44.15	43.46	42.74	39.38
TiO ₂	0.00	0.12	0.05	0.10	0.00	0.03	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.27	0.27	0.29	0.69	0.40	0.27
FeO	3.06	2.16	1.19	1.19	1.50	3.56	3.19
MnO	0.00	0.04	0.21	0.05	0.09	0.52	0.24
MgO	38.68	38.01	38.26	37.27	38.23	36.43	38.65
CaO	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.05	0.13
Na ₂ O	0.00	0.06	0.09	0.18	0.04	0.01	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.07	0.04	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.16	0.00	0.04	0.21	0.06	0.00
NiO	0.00	0.51	0.25	0.07	0.03	0.02	0.04
Total	82.08	83.79	84.08	83.41	84.29	83.56	81.89

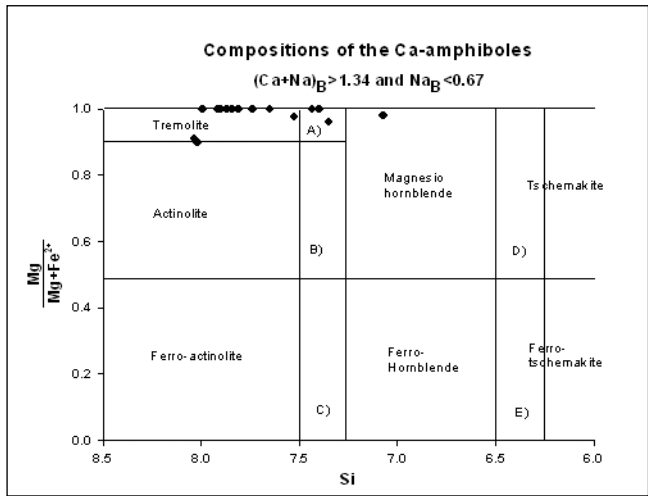


Fig. 4 . Compositions of the Ca-amphiboles for the serpentinites from the Kaewol and Kwangcheon areas, western part of Chungnam. A)for Tremolitic hornblende, B)for Actinolitic hornblende, C)for Ferro-actinolitic hornblende, D)for Tschermakitic hornblende and E) for Ferrotschermakitic hornblende.

4. X-선 회절분석기(XRD)를 이용한 정성분석

PLM 및 EPMA 분석을 통해 광천 및 계월 광산에서 백석면, 트레몰라이트, 액티노라이트로 확인된 시료를 100 μm 이하로 분쇄하여 XRD로 분석하였다.

분석 결과 두 광산에서 백석면, 트레몰라이트와 액티노라이트가 동일하게 검출되었으며, 일부 버미큐라이트 시료는 트레몰라이트와 액티노라이트가 공존하며 검출되었다. 분석 결과를 미국표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST)의 표준참고물질(Standard Reference Materials, SRM)과 비교를 하였다(Table 3). 측정된 대표적인 시료의 결과치가 Fig. 5, 6에 있다. 즉 광천 및 계월 광산에 균열, 열극 및 작은 세맥에서 산출되는 백석면, 트레몰라이트와 액티노라이트가 석면 유형의 광물로 판명되었다.

5. 주사전자 현미경(FESEM)에 의한 광학적 특성

주사전자 현미경의 관찰 결과 사문석 및 각섬석 광물은 침상과 판상으로 산출 되었다. 즉, 일부의 각섬석 및 사문석이 섬유조직을 보이는 석면이고, 일부는 석면이 아님을 암시한다. 대부분의 암석 틈을 따라 발견되는 각섬석 및 사문석은 석면이고, 모암에서 발견되는 각섬석 중 트레몰라이트 및 액티노라이트만이 석면이다.

따라서 FESEM으로 2만배 확대하여 섬유조직의 형태인 것에 대해 석면으로서 백석면, 트레몰라이트와 액티노라이트를 확인 하였다(Table 4).

6. 에너지 분산 분광장치(EDS)를 이용한 화학적 분석

FESEM으로 확인된 시료를 EDS 를 이용, 각 원소들이 지니고 있는 고유에너지를 정성 분석하여 백석면, 트레몰라이트와 액티노라이트를 판명하였다(Table 4). 두 결과에서도 버미큐라이트와 석면 유형의 백석면, 트레몰라이트와 액티노라이트들이 같이 발견되었다.

7. 야외에서 석면의 산출

광천 및 계월 광산에서는 다양한 산상의 석면 유형 광물이 산출된다. 석면 유형 광물인 각섬석, 사문석 대부분은 암석의 틈을 따라 산출되고, 이들은 버미큐라이트와 같이 공존하며 나타나는 경우가 많다. 일반적으로 수 mm 두께의 방향성이 없는 작은 세맥에는 백석면이 우세하고, 1~10 cm의 균열(Crack) 및 10 cm 이상의 열극(Fracture)에는 트레몰라이트와 액티노라이트가 우세하다. 또한 이런 균열 및 열극에는 트레몰라이트 및 액티노라이트가 버미큐라이트와 누대 구조를 이루며 산출되는데 주로 모암인 사문석 쪽에는 각섬석류가 모암의 균열 및 열극 방향과 수직 방향으로 산출되고, 멀어지는 쪽으로 수평방향에 질석이 산출된다. 즉 후자 결과는

Table 3. SRM principal lattice spacing of NIST.

Asbestos	d-spacings (Å)		reference
Chrysotile	7.24	3.62	NIST*SRM 1867b
Amosite	8.23	3.06	NIST*SRM 1867b
Crocidolite	8.31	3.10	NIST*SRM 1867b
Anthophyllite	3.03	8.13	NIST*SRM 1867a
Actinolite	3.10	8.26	NIST*SRM 1867a
Tremolite	3.10	8.23	NIST*SRM 1867a

질석광산 시료에서 질석 뿐만 아니라 석면이 산출될 가능성이 있음을 암시한다.

광천과 계월 광산의 분석 결과, 광천광산이 계월광산보다 트레몰라이트와 액티노라이트가 60%로 높게 검출되었으며, 계월광산은 광천광산보다 백석면이 70%로, 많이 검출되었다. 또한, 광천광산의 버미큘라이트 시료에서 트레몰라이트와 액티노라이트가 검출되었다(Table 5, 6).

IV. 결 론

기존 석면 광산으로 개발되었던 충남 서부의 광천 및 계월

사문석 광산의 모암 특성과 석면의 산상을 확인하였고, 모암의 광학적 특성을 알기 위해 광학현미경 및 주사전자현미경의 관찰을 실시하였으며 최종적으로 확인하기 위해 EMPA, XRD, EDS로 분석을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 석면의 모암이 계월의 암석은 분류상 듀나이트와 하즈버자이트에 해당된다. 이 암석은 다양한 비율의 감람석, 휘석, 침정석을 포함하고, 외에 사문석, 녹리석, 각섬석, 방해석, 자철석 등을 포함한다. 하지만 광천 암석은 완전히 사문암화되어 광물조합이 파악되지 않는다.

2) 석면 유형으로서 광천 및 계월 사문암체에서는 크리소타일(백석면), 트레몰라이트, 액티노라이트가 산출되고 있다. 석면 유형의 크리소타일은 수 mm 이하 두께의 방향성 없

Table 4. XRD and FESEM/EDS analyses of minerals from Kwangcheon and Kaewol mines.

Area(mine)	XRD			FESEM/EDX		
	CT	TL/AL	VL	CT	TL/AL	VL
KC	*	*	§	*	*	§
KW	*	*	†	*	*	†

KC:Kwangcheon, KW:Kaewol

CT:Chrysotile, TL/AL:Tremolite/Actinolite, VL:Vermiculite

*: asbestos form †: Non asbestos form

§ Tremolite and Actinolite in Vermiculite

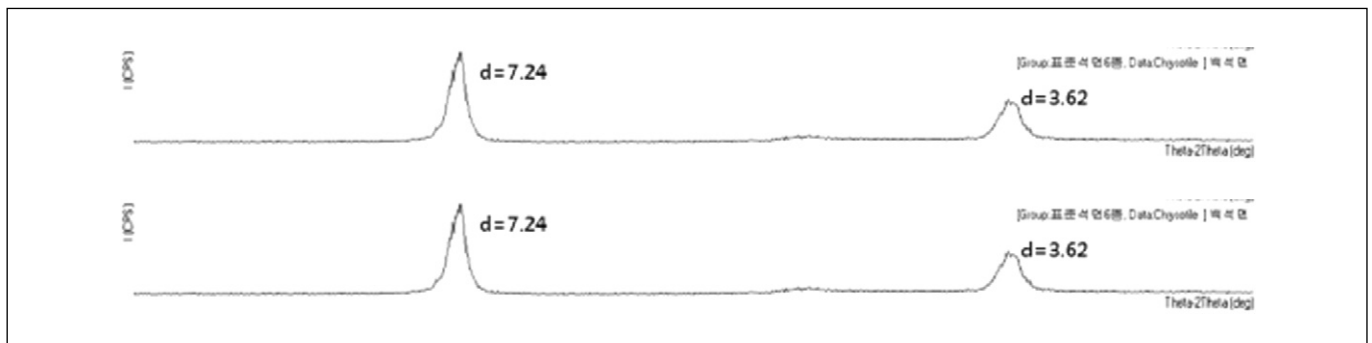


Fig.5. Tremolite of Kaewol mine analysed by XRD.

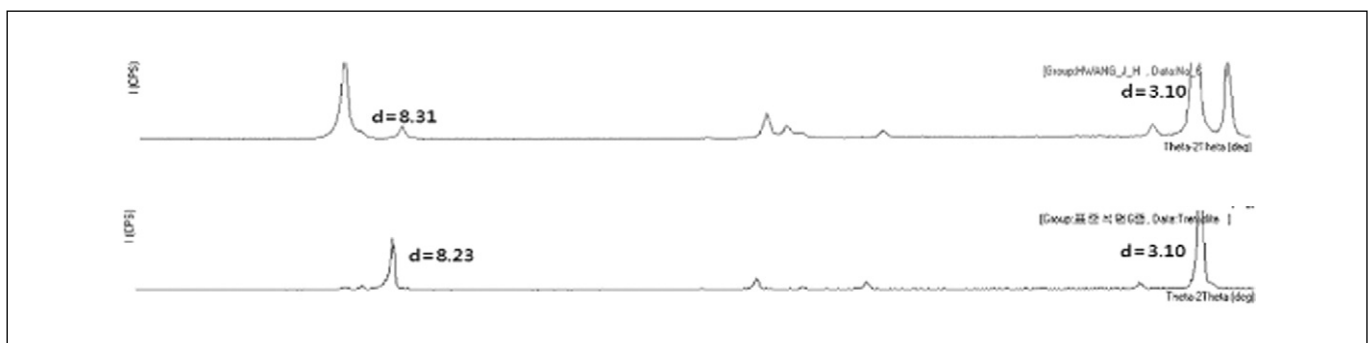


Fig.6 . Chrysotile of Kwangcheon mine analysed by XRD.

는 세맥으로서 산출되는 반면 트레몰라이트 및 액티노라이트는 수 cm 에서 수 십 cm 폭의 균열 및 열극에서 흔히 산출된다. 두 광물 역시 경하에서 보통 석면이 갖는 광물학적 특징을 보이고, 이런 결과가 FESEM에서 파악이 되고, XRD, EPMA, EDS 분석을 통해 확인 되었다.

3) 비석면으로서 두 광산 지역에는 크리스타일, 리자다이트, 안티고라이트, 트레몰라이트, 액티노라이트가 산출된다. 사문석 광물들은 보통 감람석 및 휘석의 가상이며, 망상 조직으로 나타나고, 물시계 및 리본 조직을 보이기도 한다. 계월의 암석이 다양한 열수 변질을 보여, 함 마그네슘 각섬석

에서 트레몰라이트 및 액티노라이트 조성을 보이는 반면 광천의 각섬석은 대부분이 트레몰라이트 및 액티노라이트 조성을 보이고, 많은 광물이 사문암화 되었다.

위 결과에서와 같이 광천 및 계월 사문석 광산에서는 세 가지 유형의 석면이 산출됨을 알 수 있었다. 따라서 이 지역은 사문석과 각섬석 계열의 석면이 함유된 광물이 모암에서 발견이 되고, 현재 폐광된 광산은 주변에서 나오는 자체 토양을 이용하여 복원을 하였으며, 또한 토양 중에 석면이 외부로 노출되어 있는 정황을 보아 주변으로 석면이 비산될 우려가 있다. 그러므로 추가적인 연구를 통해 토양내 석면존재

Table 5. Asbestos types outcrops found from Kwangcheon and Kaewol mines.

Area(mine)	Type	Vein	Crac	Fracture	Color
KC	CT	*	†	†	green, white
	TL/AL	†	*	*	green, brown, gray, white
	VL	†	†	*	gray, black
KW	CT	*	†	†	green, white
	TL/AL	†	*	*	green, brown, gray, white
	VL	†	†	*	gray, black

KC:Kwangcheon, KW:Kaewol

CT:Chrysotile, TL/AL:Tremolite/Actinolite, VL:Vermiculite

*: asbestos form †: Non asbestos form

Table 6. Analytical results of the host rocks from Kwangcheon and Kaewol mines.

Sample no.	Mine(Area)	
	KC	KW
1	CT	†
2	CT	CT, TR/AL
3	CT	CT
4	TL/AL	CT
5	TL/AL	CT, TR/AL
6	§	†

KC : Kwangcheon, KW : Kaewol

CT:Chrysotile, TL/AL:Tremolite/Actinolite, VL:Vermiculite

†: Non asbestos form

§: Tremolite and Actinolite in Vermiculite

와 범위, 공기 중으로 비산 여부를 조사할 필요가 있다.

REFERENCES

- 송석환, 최선규, 오창환, 서지은, 최성호. 충남 홍성 및 광천 지역 초염기성암의 암석 및 지구화학. *자원환경지질* 2004;37:477-497
- 송석환, 송운섭. 충남 서부 신곡 지역에 분포하는 초염기성암의 광물 조성 및 지구화학. *자원환경지질* 2001;34:395-415
- 우영균, 서만철. 충남지역 초염기성암체의 암석학적 연구. *지구과학회지* 2000;21: 323-336
- 이상현, 최기주. 대흥 활석 광상 주변의 편마암류의 지화학적 특징과 공존 광물의 화학적 평형. *암석학회지* 1994;3:138-155.
- 이종혁, 김성수. 한국지질도 1: 50,000 홍성지질도폭 및 설명서. 국립지질조사소 1963
- 최정근, 백도명, 백남원, Naomi Hisanaga, Kiyosho Sakai. 우리나라 일부 광물 중 석면섬유의 함유에 대한 조사. *한국산업위생학회지* 1998;8(2):254-263
- 한국산업안전공단. 석면에 의한 건강 장해예방1. 2006
- 한국산업안전공단. 석면 취급근로자의 흉막비후 조사를 통한 직업병 조기진단 및 향후 석면 직업병 발생량 예측 2007
- 한국석면공업협회. 석면과 건강에 관한 최신 학술정보 1989
- Amandus HE, Wheeler R. The morbidity and mortality of vermiculite miners and millers exposed to tremolite-actinolite: Part II. Mortality. *Am J Med* 1987; 11:15-26.
- Artvinli M, Bais YI. Malignant mesotheliomas in a small village in the Anatolian region of Turkey; An epidemiologic study *JNCI* 1979;63:17-22
- Klerk NH, Armstrong BK, Musk AW, Hobbs MS. Cancer Mortality in relation to occupational exposure to crocidolite at Wittenoom Gorge in Western Australia. *Br J Ind Med* 1989;46(8):529-536
- Klerk NH, Musk AW, Williams V, Filion PR, Whitaker D, et al. Comparison of measures of exposure to asbestos in former crocidolite workers from Wittenoom Gorge, W. Australia. *Am J Ind Med* 1996;30: 579-587
- Driscoll T, Nelson DI, Steenland K, Leigh J, Concha-Barrientos M, Fingerhut M, Pruss-Ustun A. The global burden of disease due to occupational carcinogens. *Am J Ind Med* 2005;48(6):419-439
- Enterline PE, Hendeson VL. Geographic patterns for pleural mesothelioma deaths in the United states, 1968-81. *J Natl Cancer Inst* 1987;79:31-37
- Meurman M, Ozdemir N, Hillerdal G, et al. Environmental asbestos exposure and malignant pleural mesothelioma. *Resp Med* 1999; 93:349-355
- Perkins RL, Harvey BW. U.S. Environmental Protection Agency. Test Method for the Determination of Asbestos in Bulk Building Materials. EPA/600/R-93/116. 1993
- Seidman H, Selikoff IJ, Hammond EC. 1979. Short-term asbestos work exposure and long-term observation. *Ann NY Acad Sci* 1979;330:31-89
- Wee SM, Choi SG, So CG. Preliminary Study on Ultramafic Rocks from the Chungnam Province, Korea. *Econ Environ Geol* 1994;27:171-180