

가평 사문암 광산의 석면 산출의 산상과 모암의 특성

송석환* · 강준구

충부대학교 대학원 환경보건학과

Occurrences of Asbestos within Gapyeong Serpentinite Mines and Characteristics of Host Rocks

Suckhwan Song* · Joongu Kang

Graduate school, Department of Environment and Health, Joongbu University

ABSTRACT

Objectives: This study is for characteristics of asbestos occurrence (NOA, naturally occurring asbestos) from the Gapyeong area and its host rocks, serpentinites.

Methods: Representative samples are collected from the serpentinite bodies, following degrees of hydrothermal alteration and metamorphism, after about 2 year field trips. Mineralogical, morphological and optical characteristics of the asbestos and host rocks are confirmed by PLM, XRD EPMA and SEM results.

Results: The serpentinites are dunites and harzburgites, and host asbestos, including chrysotile, tremolite and actinolite. The asbestos chrysotiles are found as veins ranging from several millimeters to several centimeters in thickness, while asbestos-tremolite and -actinolite occur along cracks and fractures ranging up to ten centimeters in thickness. The chrysotiles occur mainly as cross and slip fibers, while the amphibole asbestos is found as vein, slip and oblique fibers. More tremolitic grains are colorless and commonly show elongated or fiber shapes, whereas the magnesio hornblende grains mainly show light green and occur as subhedral to euhedral diamond grains.

Conclusions: Overall characteristics of serpentinites from the Gapyeong area are similar to worldwide orogenic-related Alpine type ultramafic rocks serpentinized and serpentinites in South Chungcheong-do Province, Korea, and occurrences of asbestos are similar to those of the ultramafic bodies in South Chungcheong-do Province.

Key words: Gapyeong, serpentinites, asbestos

I. 서 론

석면은 자연계에서 존재하는 섬유상 규산광물의 총칭으로서 사문석이나 각섬석이 섬유 형태로 변화한 천연 섬유이다(Clinkenbeard et al., 2002; Higgins & Clinkenbeard, 2006). 섬유상 또는 석면형을 갖는 6개 상업적으로 주요한 규산염광물이며 인장력, 유연성, 내구성, 내열성, 내약품성, 전기 절연성을 가지고 있다. 경하에서 관찰할 때 길이 5 μm 이상이고, Aspect Ratio

(길이 대 폭의 비) 3:1 이상인 입자상 물질이다.

석면 섬유는 호흡기를 통하여 체내에 흡입되면 폐포에 침착되어 20년에서 40년의 잠복기를 거쳐 석면폐, 악성중피종을 일으킬 수 있어 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)는 석면을 1급 발암물질로 규정하고 있다(Agency for Toxic Substances and Disease Control, 2001; Higgins & Clinkenbeard, 2006).

미국은 제2차 세계대전 이전까지 전 세계 30%의 석면을 소비하는 최대의 소비국이었지만 1991년부터 석

*Corresponding author: Suckhwan Song, Tel: 031-8075-1613, E-Mail: shsong60@naver.com

Graduate school, Department of Environment and Health, Joongbu University, 305 Dongheon-ro Goyang-si Kyeonggi-do 10279

Received: June 7, 2016, Revised: August 4, 2016, Accepted: September 23, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

면 사용량을 해마다 감소하며 1994년 실내 공기질 새 기준 등 세워 석면에 대한 규제를 계속되고 있다. 또한 유럽에서도 2006년부터 석면 채광 및 석면 함유제품의 생산 가공이 금지 되었다.

석면 형성은 특정한 화학조건(유용한 Si, Mg, Ca, Fe, Na, H₂O)과 물리적 조건(적합한 온도, 압력, 가능한 응력)이 요구된다(Clinkenbeard et al., 2002). 이런 조건은 다양한 지질학적 환경에서 가능하다. 위 6개 석면 광물 외에도 석면형태의 각섬석계 광물인 Richterite Winchite 등도 건강상의 위해성이 있다고 의심되거나 알려져 있다(Wylie & Verkouteren, 2000).

한국에서는 석면을 다수 배회하는 모암인 사문암 및 백운암이 도처에 분포하고 있어 지역 주민들에게 건강상의 피해를 주고 있다(Woo et al., 1991; Wee et al., 1994).

본 연구는 사문암체가 모암인 가평광산 및 인근 지역에서의 석면 산출과 모암에 대한 암석학적, 광물학적 접근이다. 이를 위해 암체내에서 산출되는 석면의 특성, 모암과의 관계, 광학적인 특성에 대해서 확인해 보았다. 이들 연구들을 기존의 국내, 외 자연 발생 석면 지역의 연구들과 비교, 검토해 보았다.

II. 연구 지역의 지질

연구지역의 지질(Figure 1)은 크게 선캄브리아기의 편마암류를 기반암으로 하여 이와 관입 및 부정합

관계에 있는 변성암 및 변성퇴적암류, 이를 관입하는 전기의 화성암체, 그리고 중생대의 관입암체들로 구성되어 있다(Kim et al., 1974; Lee et al., 1974).

선캄브리아기암체로 용문산 호상편마암류, 장락층군, 의암층군이 있고 화성암류로는 고기 화성암류로 각섬암류 및 사문암이 있다. 이들 모두를 관입하는 중생대의 화강암류 및 섬록암류 등이 있다.

용문산 호상편마암은 호상구조가 뚜렷하고, 유백색 내지 황갈색 규암층이 신장되어 분포하기도 한다. 하부로부터는 석영-장석질 편마암류, 흑운모 편마암 및 편암층, 장락층군, 의암층군으로 구성 되어 있다. 각섬석 편암이 협재되어 있고, 이 분포지에 사문암체를 포함하고 있다. 호상 편마암류의 유색광물로는 흑운모 및 각섬석, 무색광물로 석영, 미사장석, 사장석을 포함한다. 각섬석 편암은 방향성을 따라 신장되어 있는 자형의 각섬석이 주이며, 무색광물로 사장석이 나타난다.

장락층군은 용문산 호상 편마암류와 부정합으로 놓여 있고, 하부로부터 장락규암층, 삼산리층, 석산리층, 길곡리층으로 구성되어 있다. 장락규암층에는 규암이 연속적으로 분포하고, 여러 층의 규암 및 편마암층이 호층으로 나타난다. 상부로 갈수록 흑운모 석영편암으로 전이되기도 하고, 석회암을 협재 하기도 한다. 주 구성 광물로 변성반아 신장된 형태로 나타나는 석영이 확인되고, 부수적으로 운모류 및 자철석류도 나타난다.

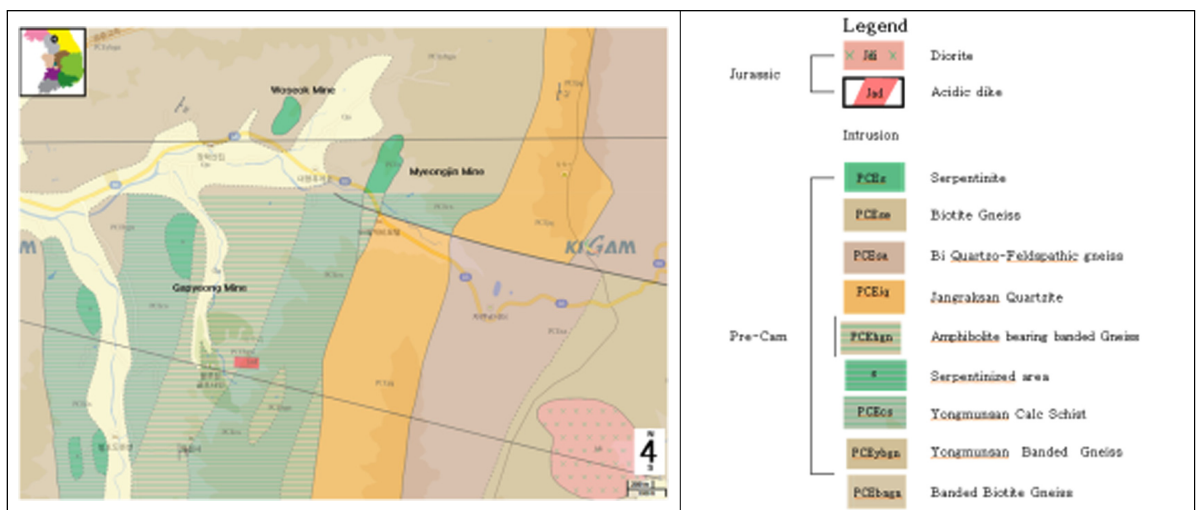


Figure 1. Geological map of the Gapyeong area. Based on Gapyeong(1974) and Yongduri(1974) map.

삼산리층은 장락규암층 위에 정합적으로 놓이고, 주 구성 암체는 함 흑운모, 석영, 장석 편마암 층이다. 호상 편마암, 흑운모 편마암, 흑운모 녹리석 편암, 견운모 녹리석 편암, 녹리석 편암, 슬레이트 등이 협재 되기도 한다. 삼산리층 위에 밑으로부터 석산리 및 길곡리층 순으로 정합적으로 놓인다. 전자는 흑운모 편마암, 후자는 호상 편마암으로 주로 구성되어 있다.

의암층군은 변성 퇴적암층으로, 하부로부터 유백색 내지 담녹색의 규암으로 이루어진 의암규암층, 최하부는 석영질 안구상 편마암과 암녹색 내지 흑색 각력암이, 상부는 담회색 석회암, 우백질 및 우흑질 편마암, 흑운모 편암 등이 호층을 이루는 강층층이 있다.

이어서 주로 안구상 편마암인 구곡리층, 우백질 또는 우흑질 입상 변성암인 방곡리층, 석영, 장석, 흑운모로 구성된 호상편마암이 주 인 창촌리층, 우백질 또는 우흑질의 입상 변성암이 주인 추곡리층, 하부는 안구상 편마암이, 상부는 호상 편마암층이 우세하게 나타나는 동산층으로 구성되어 있다.

고생대 화성암류로 암녹색을 띄며 의암층군을 관입하는 각섬암류가 있다. 그 외의 중생대 화성암류로

중립 내지 조립질 흑운모 화강암인 춘천화강암이 있으며, 다수의 섬록암류와 관입암들이 연구지역을 관입하고 있다. 춘천 화강암은 부분적으로 반화강암질 암화 된 부분이 나타나고 한다.

연구지역은 기존의 가평, 명진, 우석 광산 등으로 불리워졌고, 1939년부터 일본 잔야 슬레이트 회사가 온석면 광산으로 개발했으며, 해방 이후에는 한때 한국 슬레이트 공업 주식회사가 노천 채광을 하였던 곳이다(Kim et al., 1974; Lee et al., 1974).

광구 지적은 가평 120, 130, 140호 및 용두리 121, 131, 141호에 해당되고(Figure. 2, Table 1), 1970년 이후에도 석면, 사문석, 활석의 등록광종으로 개발되었으며, 대부분은 폐광 되었으나, 일부 광구는 석면 및 석면 함유 광종으로 등록되어 있다.

III. 연구 지역 내의 사문암체

연구 대상 사문암체는 용문산 호상편마암층의 남쪽인 설악면 위곡리에서 산출된다(Kim et al., 1974; Lee et al., 1974). 암녹색, 담녹색을 띄며, 초염기성암이 사문암화 되어 생성된 것으로 생각된다. 사방 2 km 범위 안에서 노천채굴 방식으로 개발된 가평, 우

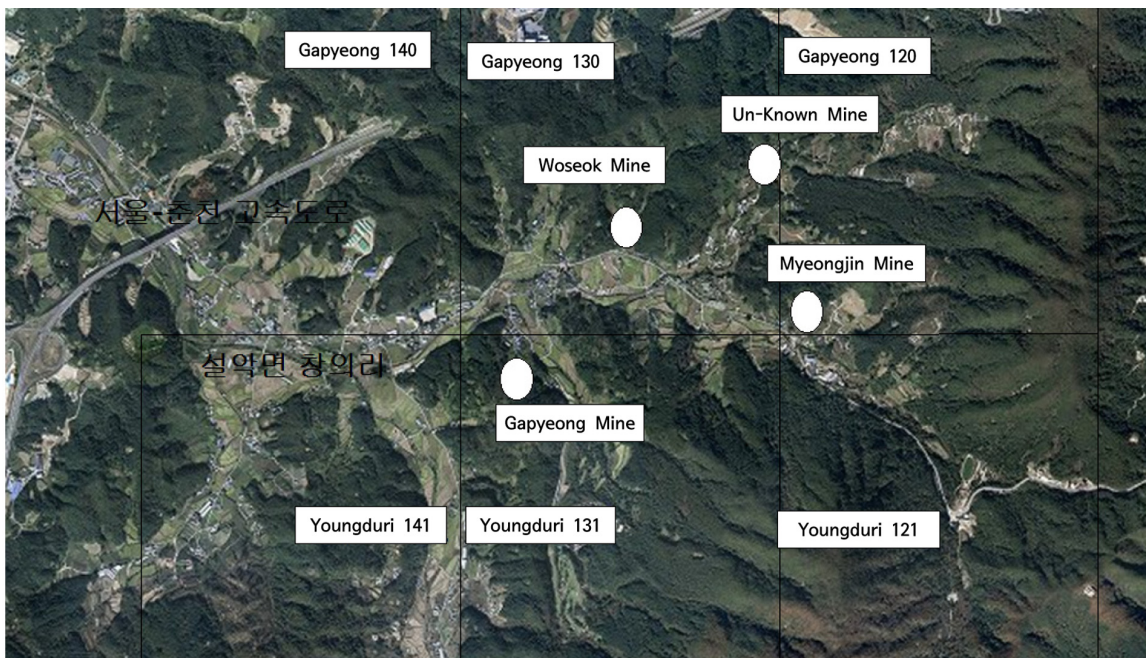


Figure 2. Mine localities of the studied area. Four mine fields are shown.

Table 1. A summary of registration for the mineral species of the studied area

Land Register	Number	Register Mineral Species	Register Day	Expired Day
Gapyeong	130	Asbestos, Serpentine	2002.12	2022.12
Gapyeong	140	Serpentine	2003.12	2008.05
	140	Asbestos, Serpentine	1977.07	1997.09
	140	Serpentine, Talc	2008.10	2028.10.
Yongduri	121	Asbestos, Serpentine	2002.12	2022.12
Yongduri	131	Asbestos, Serpentine	1977.07	1997.09
	131	Serpentine	2000.06	2004.04
	131	Serpentine	2004.09	2024.09
Yongduri	141	Serpentine	1994.07	1999.12
	141	Serpentine	2004.03	2006.08
	141	Serpentine	2008.07	2028.07
Yongduri	142	Serpentine	2001.07	2003.12
Yongduri	144	Talc	1979.09	1992.12
	134	Talc	1980.09	1992.12

석, 무명, 명진광산이 위치하며 이 암체들은 수 십 m에서 백 여 m 길이와 폭을 갖고 흩어져 있다(Figure 2). 명진광산 인접부에 동남동 방향의 단층대가 분포한다. 무명광산은 광산의 이름이 확인 불가하여 붙은 이름이다.

가평광산으로 개발된 암체는 민가 인접부에 위치하고 있고, 상부바닥 및 능선을 따라 사문암 전석들이 흩어져 있다. 광산지역은 부분적으로 평탄 작업 및 복구가 되어 일부는 창고와 축사로 이용되고 있다. 우석광산은 86번 지방도로로부터 임도로 들어가 안쪽에 위치한다. 10여m 폭의 작은 암체로 활석화 및 사문암화로 변질 되어 산출된다. 폐광 후 골재채취장으로 사용되어 상당량의 쇠골재가 과업구간에 퍼져 있다.

명진광산은 설악면에서 서면으로 넘어가는 86번 지방도 도로 변에 위치하고 있다. 도로 쪽에는 민가 2채가 위치하고 민가 뒤편에 폐석 더미와 갯도가 그대로 방치되어 있다. 사문석 전석은 능선을 따라 도로 쪽으로 흘러 내려오고 있으며, 광산 일부는 밭으로 사용되어 있다. 4개의 광산 중 제일 큰 광산으로 70 m 폭의 광맥을 6단의 노천채굴방식으로 연장 200 m까지 작업하였고 탐굴을 위한 6개의 탐갱이 존재한다.

본 연구는 이들 광산 중 비교적 광산 개발현황이 제대로 유지된 가평 및 명진광산 지역의 사문암체에 대해 접근해 보았다.

IV. 시료 채취, 관찰 및 분석방법

2014년부터 2015년까지 2년여 동안 광산 주변의 노두에서 시료 채취를 하였고, 야외조사 통하여 주변 경기 편마암과의 관계 및 가평 암체 분포지역을 확인하였다. 사문암화 정도를 파악하기 위해 감람암 조성을 보이는 암체에서 변질 정도에 따라 시료 채취를 하였다. 석면으로 예측되는 광물의 산상을 확인하고 석면의 산출 차이를 고려하여 채취하였다. 시료채취는 자연발생석면 지질도 작성법(환경부 고시 2015-13)에 근거하여 표적 시료로 채취하였다.

본 연구는 모암에 대한 부분과 산상별 석면 특성에 대한 부분으로 분리하여 접근하였다. 모암은 편광현미경(Polarized Light Microscopy)으로 암석, 주광물 및 부광물 특성을 확인하였고, 전자현미분석(Electron Micro Probe Analyzer, EPMA)으로는 광물의 조성을 확인하였다. 석면의 특성을 분석하기 위해 산상별로 석면으로 추정되는 시료에 대하여 편광현미경법(Polarized Light Microscopy analysis, PLM), X-선 회절분석(X-Ray Powder Diffraction, XRD), 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, SEM)을 적용하였다.

일반적으로 석면의 특성을 확인하는데 각각의 분석 방법은 각기 다른 장점을 갖고 있는 바 다양한 분석 방법을 통하여 보완이 가능하다. 즉 PLM 분석 방법은 광물의 섬유상 여부를 광학적 특성으로 파악이 가능하

고, XRD 분석 방법은 원자내의 회절 현상을 파악하여 석면 광물의 종류를 파악 가능하며, EPMA 분석 방법은 광물 화학적 조성을 파악하여 석면 광물의 종류를 파악할 수 있다. SEM은 석면 광물의 형태 및 화학 조성의 확인이 가능하다.

측정 및 분석 방법은 기존 연구(Song et al., 2008; Song et al., 2013)에 언급 되어 있는 바 본 과제에는 전자현미분석, X-선 회절분석, 주사전자현미경법에 대해서만 약술 하겠다.

전자현미분석은 광물의 화학성분을 분석하는 분석 기의 한 종류로, 전자빔을 탄소 코팅된 연마 박편 또는 광물 표면에 조사시켜 발생하는 2차 X선 스펙트럼을 분석하여 정량·정성을 알아내는 방법이다. 육안으로는 관찰되지 않는 지름이 1 μm 인 점을 분석할 수 있을 뿐만 아니라 광물입자 전체에 걸친 원소들의 분포변화도 분석할 수 있고 시료가 파괴되지 않게 분석이 가능하다.

CAMECA SX-50 EDS기기를 연구에 사용하였고, 결과값을 ZAF 보정법으로 보정하여 시료 화학조성을 규명하였다. 분석조건은 가속전압 15 kV, 시료전류 20 nA, 측정시간 10 sec이다.

X-선 회절분석은 X-ray tube에서 방출된 X-선을 시료에 조사함으로써, 시료의 원자구조에 기인하여 방출되는 회절 X-선을 검출기로 측정하여 재료의 결정 구조를 해석하는 방법이다. 암석시료 일부(약 10g)를 파쇄하여 75 μm (200 mesh)체로 체질한 후 통과된 분말 시료(<75 μm)를 이용하여 XRD 분석을 실시하였다. 시료의 비중에 따라 1-2 g 정도의 시료를 취하여 알루미늄 홀더에 넣고 수평이 되도록 유리 슬라이드로 다듬은 후, 준비된 홀더를 X-선 회절기의 고니오미터에 장치하여 X-선 회절 분석을 실시한다. 연구에 사용된 분석기기는 X-PertPRO X-Ray Diffractometer, (PANalytical사, 네덜란드)이다(분석 조건은 Cu K α (알파)선, Ni-Filter, 가속전압 40 kV, 전류 30 mA, scab speed 0.13°/s, step size 0.026° 2 θ).

PLM 분석에서 석면으로 확인된 섬유상 결정들을 주사전자현미경을 이용하여 섬유조직을 파악하고, 에너지 분산 분광장치(EDX)를 이용한 화학분석을 실시하였다. 시료를 100 μm 이하로 분쇄하여 15 nm로 Pt 코팅된 시료를 주사전자현미경(FNOVA NANOSEM 400, FEI, 미국)에서 일 만배 확대하여 확인하였다(분석조

건, 가속전압 20 kV, working distance 5 mm). 섬유의 주 원소를 에너지 분산 분광장치(NORAN system SIX, THERMO, USA)를 이용하여 분석 하였다.

V. 실험 결과 및 고찰

1) 야외 산상

연구지역에는 노천채굴 방식으로 개발된 사문암체들이 사방 2 km 범위 안에 분포 되어 있다(Figure 3). 이 암석은 부분적으로 소 단층 접촉부에 단층 활면(slickenside)을 보여 암석이 지표면에 정치된 후 이동되었고 암체내에서도 수차례에 걸친 단층작용을 받았음을 암시한다.

수 cm 폭으로 변질을 받아 검은색 및 연녹색의 반 복되는 띠의 변화를 보이기도 한다. 사문암화가 미약한 부분은 연녹색을, 완전히 사문암화 된 경우는 짙은 흑색을 띤다. 활석화가 진행된 부분은 암회색을, 녹리석화 진행된 부분은 녹색을 띠는 경향을 보이고 있다.

연구지역의 사문암체가 지표면에서 정치 및 지중에서 상부로 이동 중 생긴 다양한 균열과 소단층 접촉부에서 사문석계 석면과 각섬석계 석면이 같이 산출된다. 발견되는 석면 대부분은 백석면으로, 세맥 및 벽개에서 산출되고, 섬유 장축이 세맥 벽에 수직인 교차섬유 형태이거나, 섬유 장축이 세맥 벽에 일정한 각도를 이루는 미끌림 섬유 또는 경사 섬유 형태로 산출된다. 섬유상 조직은 가늘고 쉽게 분리되어, 쉽게 부유되어 대기 중으로 비산되는 특성을 보이고, 쉽게 풍화되어 토양 중에 노출되어 있다.

각섬석계 석면은 소단층면 접촉부, 수 cm에서 수십 cm 규모의 벽개 및 단구에서 산출이 되고, 미끌림 섬유 또는 경사 섬유 형태로 산출된다. 열수의 유입 통로로 추정되는 파쇄면 중 비교적 폭이 큰 단구에서 산출되는 석면은 대부분이 각섬석계 석면이다.

수회의 열수 유입을 보이는 벽개에서는 미끄럼 섬유 또는 경사 섬유 형태로서 백석면 및 각섬석계 석면이 반복해서 방해석과 공존하며 발견이 되기도 한다. 이런 단구에는 트레몰라이트 및 악티노라이트가 버미큐라이트와 누대 구조를 이루고 한다. 즉 주로 모암인 사문석 쪽에는 각섬석류가 모암의 벽개 및 단구방향과 수직 방향으로 산출되고, 멀어지는 쪽으

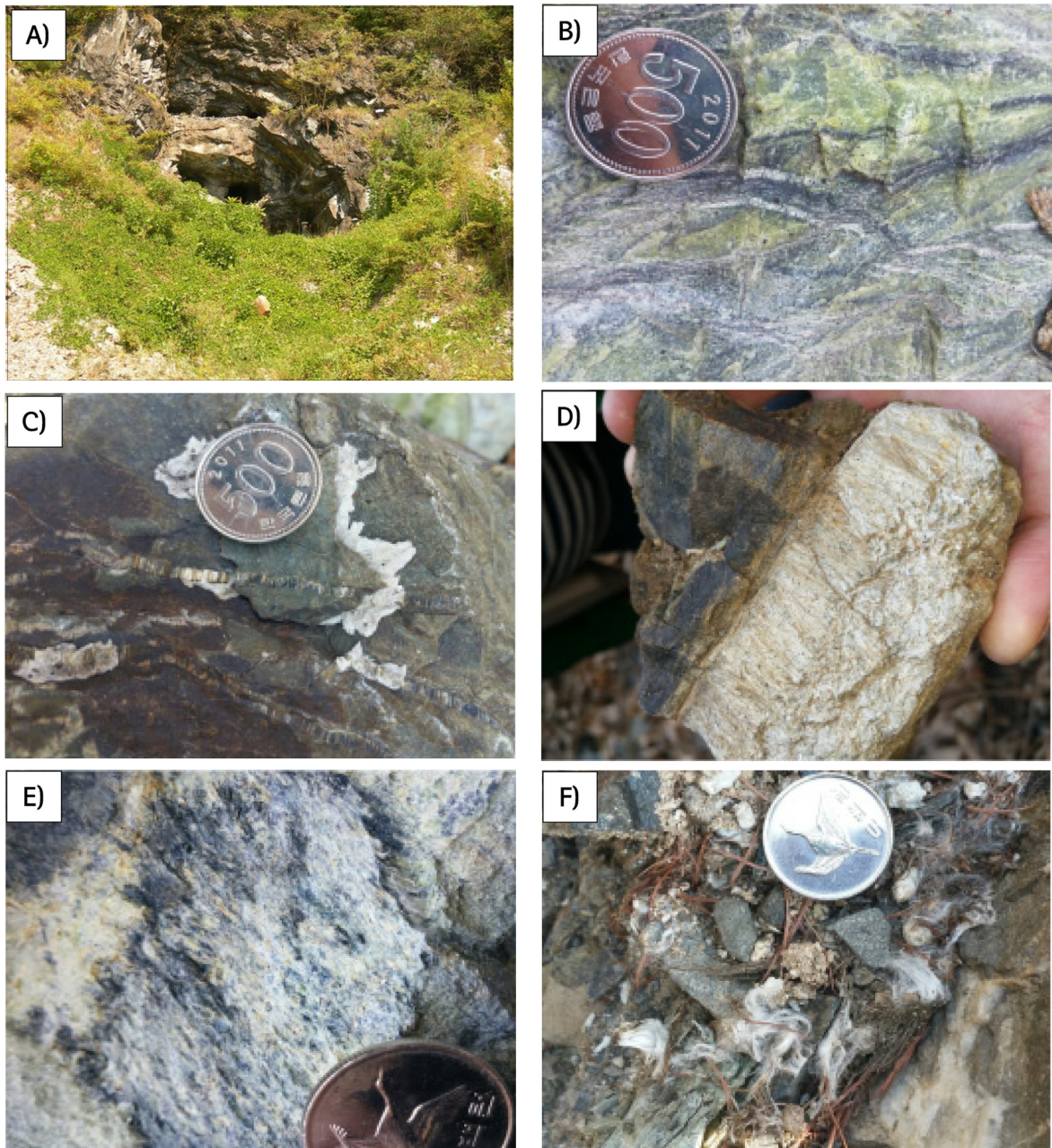


Figure 3. A) Myeongjin mine site image. B) Serpentinite outcrops showing repeated influx of hydrothermal waters, C) Serpentinite outcrops of the Gapyeong mine area showing cross fibers, D) Serpentinite outcrops of the Gapyeong mine area showing rim of the tremolite fibers, E) Serpentinite outcrops of the Gapyeong mine area showing slip fibers and F) Gapyeong mine scenery showing asbestos fibers.

로 질석이 산출된다.

캘리포니아 사문암 지역의 단층 및 전단대에서도 미끄럼 섬유 또는 경사 섬유 형태의 석면이 산출 되

었고(Churchill & Hill, 2000) 충남 보령의 사문암체 (Song et al., 2013)에서도 유사한 산상의 사문석계 및 각섬석계 석면이 산출되고 있음이 기록되어 있다.

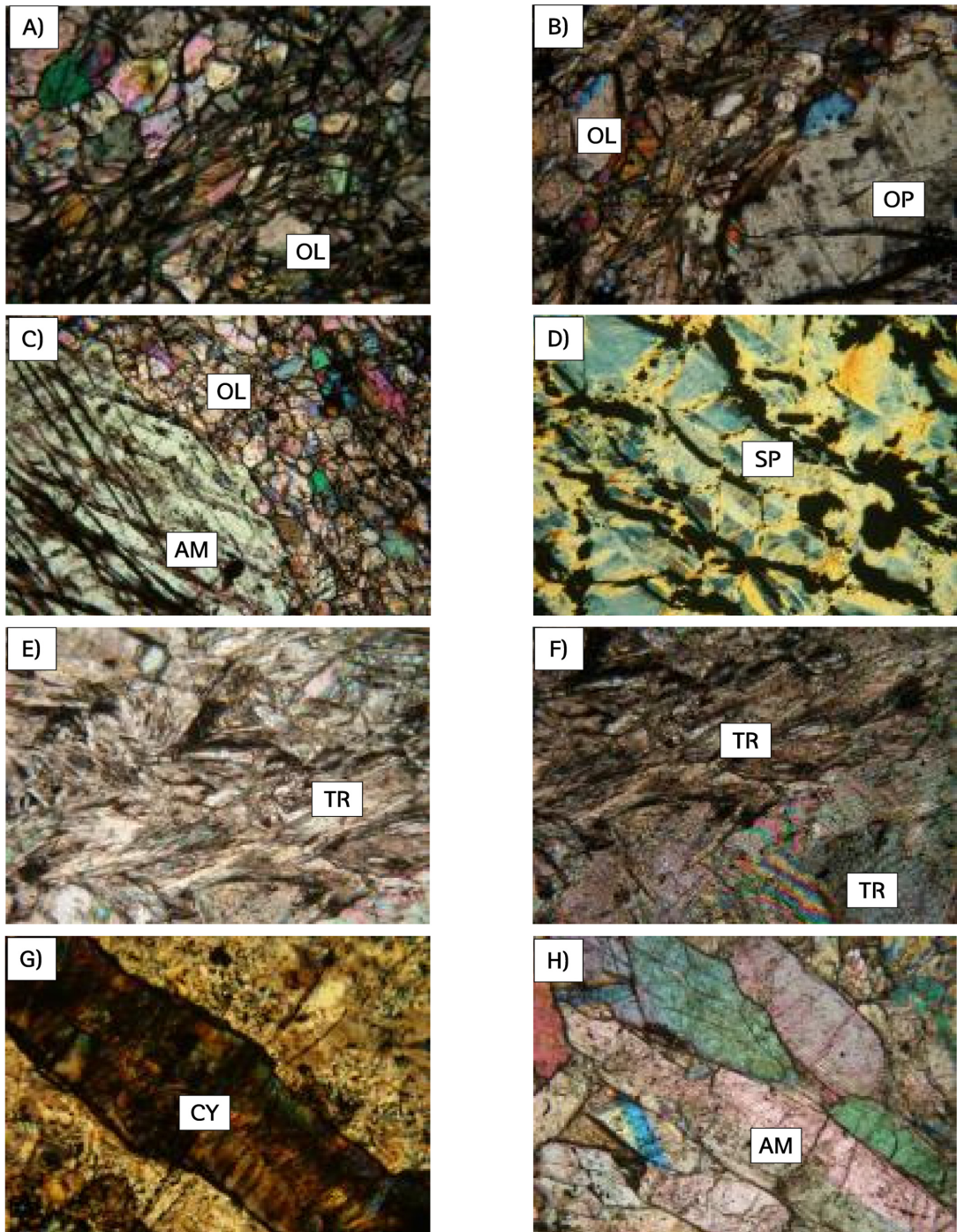


Figure 4. Representative photomicrographies for the serpentinites from the Gapyeong area. Showing A) recrystallization, protogranular and porphyroblastic textures, B) orthopyroxenes rimmed by olivine, C) amphiboles rimmed by olivine, D) serpentinization, E) acicular tremolites, F) acicular tremolites with anhedral tremolites, G) serpentine vein and H) amphibolites showing euhedral amphiboles.

* Abbreviation : olivine(OL), orthopyroxene(OP), amphibole(AM), serpentine(SP), chrysotile(CY) and tremolite(TR).

2) 경하의 특징

연구 지역의 사문암체는 광물 조합 상(Streckeisen, 1976) 듀나이트에서 하즈버자이트에 해당된다. 이 암석은 재결정 작용 및 잔쇄반상 조직 등과 같은 변성작용의 흔적을 보인다(Figure 4). 적어도 2회 이상에 걸친 사문암화 작용을 보이고 있다. 이는 사문암체에서 산출되는 석면이 적어도 2 회 이상의 열수 유입과정에서 형성되었음을 암시한다.

감람석은 등립질 결정형태 또는 재결정에 의해 입상형태로 산출된다. 등립질 결정은 부분적 또는 일부가 사문암화 되었으나, 재결정에 의해 형성된 입상 결정은 거의 변질을 받지 않았다. 각섬석은 격리된 자형 및 반자형 결정, 거정질 또는 섬유상 결정으로 산출되며 경하에서는 백색면은 열수의 유입 통로를 따라 침상으로 산출되고(Figure 4G) 각섬석계 석면은 침상의 덩어리 또는 자형의 비석면계 각섬석과 공존하며 산출된다 (Figure 4E, 4F).

이 결과는 충남 서부의 비봉, 광시, 홍성, 광천 초염기성암체와 광물 조합 및 조직 부분과 유사하다 (Song et al., 1997; Song et al., 2004).

3) 시료의 분석

분석결과 가평 사문암 분포지에서는 백색면 및 각섬석계 석면이 확인 되었다.

PLM 분석: 일반적으로 백색면은 굵이치는 파도형태로 산출되었고, 각섬석계 석면인 트레몰라이트 및 악티노라이트는 침상형태를 보였다(Figure 5).

EPMA 분석: 분석결과 감람석, 휘석, 각섬석, 그 외에 녹리석, 방해석, 자철석, 활석, 금운모 등이 확인되었고 대표적인 분석 결과가 Table 2, 3에 있다.

감람석은 등립질 결정 형태 또는 재결정에 의해 입상 형태를 보이나 형태 차이에 관계없이 높은 포스테라이트 ($Fe_{0.90-0.96}$) 조성을 보였고, 비교적 높은

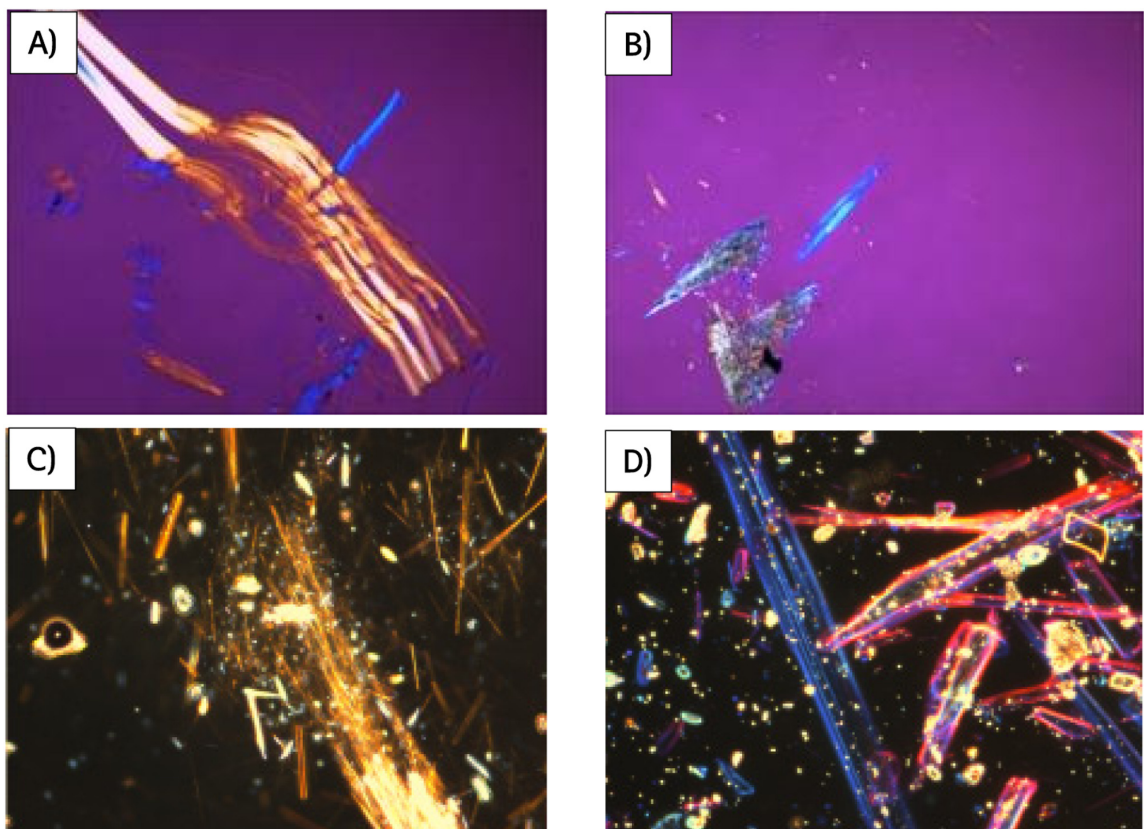


Figure 5. Representative photomicrographs of PLM analyses for asbestos within the serpentinites. A) and C) chrysotile and B) and D) actinolite

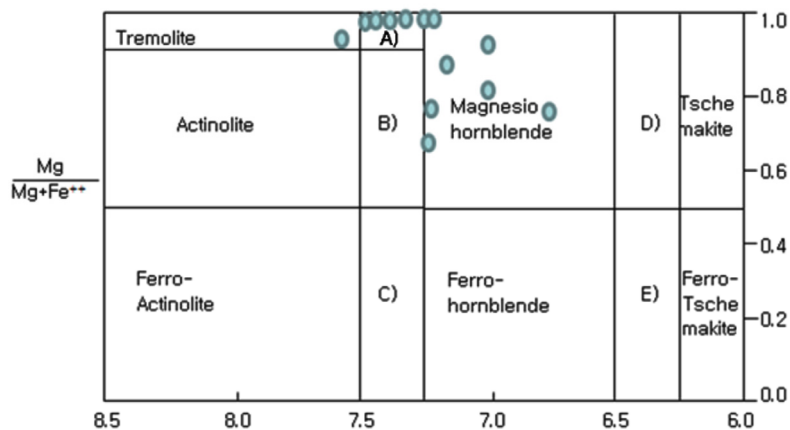


Figure 6. Representative EPMA results for Ca-amphibole asbestos within the Gapyeong serpentinites. A) Tremolitic hornblende, B) Actinolitic hornblende, C) Ferro-actinolitic hornblende, D) Tschermakitic hornblende and E) Ferro-Tschermakitic hornblende.

Table 2. Representative analyses of olivines for the serpentinites from the Gapyeong area

	GPAS 1	GPAS 2	GPAS 5	GPAS 6	GPAS 7	GPAS 12	GPAS 17	GPAS 18	GPAS 19	GPAS 20	GPAS 25
SiO ₂	40.45	41.06	42.04	41.79	42.38	40.75	41.75	42.14	42.26	40.93	40.59
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.10	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.17	0.19	0.31	0.40	0.87	0.30	0.49	0.38	0.38	0.21	0.13
FeO*	8.70	8.90	4.33	4.14	4.56	8.12	4.65	4.14	4.75	9.24	8.66
MnO	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.08	0.10	0.00	0.00	0.03	0.20
MgO	49.61	49.46	52.13	52.16	52.38	49.53	52.78	52.78	53.17	48.84	49.33
CaO	0.07	0.00	0.00	0.00	0.08	0.07	0.01	0.00	0.00	0.08	0.02
Cr ₂ O ₃	0.09	0.18	0.24	0.00	0.07	0.10	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00
NiO	0.58	0.60	0.17	0.42	0.16	0.15	0.22	0.12	0.20	0.57	0.74
Total	99.67	100.39	99.22	99.02	100.50	99.20	100.00	99.57	100.77	100.03	99.67
Si	0.991	0.999	1.011	1.007	1.006	0.999	0.998	1.008	1.003	1.006	0.995
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	0.005	0.006	0.009	0.011	0.024	0.009	0.014	0.011	0.011	0.006	0.004
Fe(2)	0.166	0.181	0.087	0.083	0.091	0.166	0.093	0.083	0.094	0.190	0.172
Fe(3)	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.001	0.004
Mg	1.811	1.795	1.869	1.874	1.854	1.810	1.882	1.882	1.882	1.771	1.804
Ca	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001
Cr	0.002	0.004	0.005	0.008	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000
Ni	0.011	0.012	0.003	0.008	0.003	0.003	0.004	0.002	0.013	0.011	0.014
Mg	0.92	0.91	0.96	0.96	0.95	0.92	0.95	0.96	0.95	0.90	0.91

FeO is total iron. Fe(2) and Fe(3) contents are calculated with stoichiometry. *Mg* is equal to 100 * Mg/(Mg+Fe(t)) (molecular proportions)

NiO(0.11-0.74 wt %) 조성 및 매우 낮은 Al₂O₃(<0.87 wt %)조성을 보였다(Table 2). 각섬석은 산상에 관계 없이 조성상 Ca-각섬석 조성을 보였다(Table 3, Figure 6).전체적인 함량은 tremolite에서 magnesio

hornblende 조성을 보인다. 하지만 차이를 보이는데 단일의 자형 결정 및 거정질 형태는 tremolitic hornblende에서 magnesio hornblende 조성을 보이고 섬유상 형태 대부분은 tremolite, tremolitic hornblende

Table 3. Representative analyses of amphiboles for the serpentinites from the Gapyeong area

	GPAS 1	GPAS 2	GPAS 5	GPAS 6	GPAS 7	GPAS 12	GPAS 17	GPAS 18	GPAS 19	GPAS 20
SiO ₂	53.80	47.71	50.86	50.43	53.33	54.06	52.81	53.70	53.64	54.27
TiO ₂	0.76	0.93	0.41	1.31	0.25	0.28	0.17	0.05	0.01	0.18
Al ₂ O ₃	5.09	14.18	7.02	8.41	5.98	4.95	7.27	5.20	7.32	4.06
Cr ₂ O ₃	0.08	0.00	0.14	0.04	0.52	0.63	0.60	0.57	0.58	0.62
FeO*	1.98	7.84	15.10	12.66	2.26	2.56	1.37	2.24	1.03	2.91
MnO	0.00	0.29	0.00	0.27		0.02	0.18	0.00	0.00	0.00
MgO	24.57	13.04	13.57	12.55	22.32	22.53	23.23	22.76	23.28	21.97
CaO	9.69	9.48	9.40	10.33	11.21	11.32	9.81	11.46	9.54	12.05
K ₂ O	0.17	0.93	0.40	0.72	0.15	0.10	0.05	0.19	0.22	0.15
Na ₂ O	0.45	2.88	0.59	1.16	0.89	0.61	1.20	0.48	1.15	0.53
Total	96.59	97.28	97.49	97.88	96.91	97.06	96.69	96.65	96.77	96.74
Si	7.362	6.782	7.155	7.219	7.335	7.415	7.247	7.396	7.325	7.488
Ti	0.082	0.103	0.042	0.138	0.024	0.033	0.017	0.008	0.000	0.016
Al4	0.638	0.218	0.845	0.781	0.665	0.585	0.753	0.604	0.675	0.512
Al6	0.185	1.157	0.322	0.639	0.302	0.214	0.426	0.240	0.507	0.152
Cr	0.008	0.000	0.017	0.009	0.058	0.066	0.058	0.066	0.066	0.066
Fe(2)	0.000	0.913	0.441	1.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe(3)	0.230	0.018	1.335	0.224	0.256	0.297	0.157	0.257	0.115	0.340
Mn	0.000	0.034	0.000	0.034	0.000	0.000	0.025	0.000	0.000	0.000
Mg	5.018	2.767	2.851	2.676	4.576	4.606	4.747	4.675	4.741	4.520
Ca	1.423	1.443	1.421	1.585	1.652	1.664	1.443	1.687	1.394	1.785
K	0.033	0.171	0.068	0.129	0.024	0.016	0.008	0.033	0.041	0.025
Na	0.124	0.795	0.161	0.318	0.240	0.165	0.321	0.124	0.314	0.141
Total	15.10	14.40	14.66	15.04	15.13	15.06	15.20	15.09	15.18	15.05

* FeO* is total iron. Fe(2) and Fe(3) contents are calculated with stoichitometry.

Table 4. Representative PLM, XRD and SEM results for asbestos of the Gapyeong area

Area	Sam. Num	PLM	Morphology	XRD	SEM
Gapyeong	GPAS-1	Chrysotile	Wave, Twist	Chrysotile	Chrysotile
	GPAS-2	Chrysotile	Wave, Twist	Chrysotile	Chrysotile
	GPAS-5	Chrysotile	Wave, Twist	Chrysotile	Chrysotile
	GPAS-6	Chrysotile	Wave, Twist	Chrysotile	Chrysotile
	GPAS-7	Chrysotile	Wave, Twist	Chrysotile	
	GPAS-12	Chrysotile	Wave, Twist	Chrysotile	
	GPAS-17	Tremolite-asbestos	Straight, Acicular	Chrysotile	ND
	GPAS-18	Tremolite-asbestos	Straight, Acicular	Tremolite/Actinolite	
	GPAS-19	Actinolite-asbestos	Straight, Acicular	Tremolite/Actinolite	Actinolite-asbestos
	GPAS-20	Actinolite-asbestos	Straight, Acicular	Tremolite/Actinolite	
	GPAS-25	Actinolite-asbestos	Straight, Acicular	Tremolite/Actinolite	Actinolite-asbestos

* ND means non-detected.

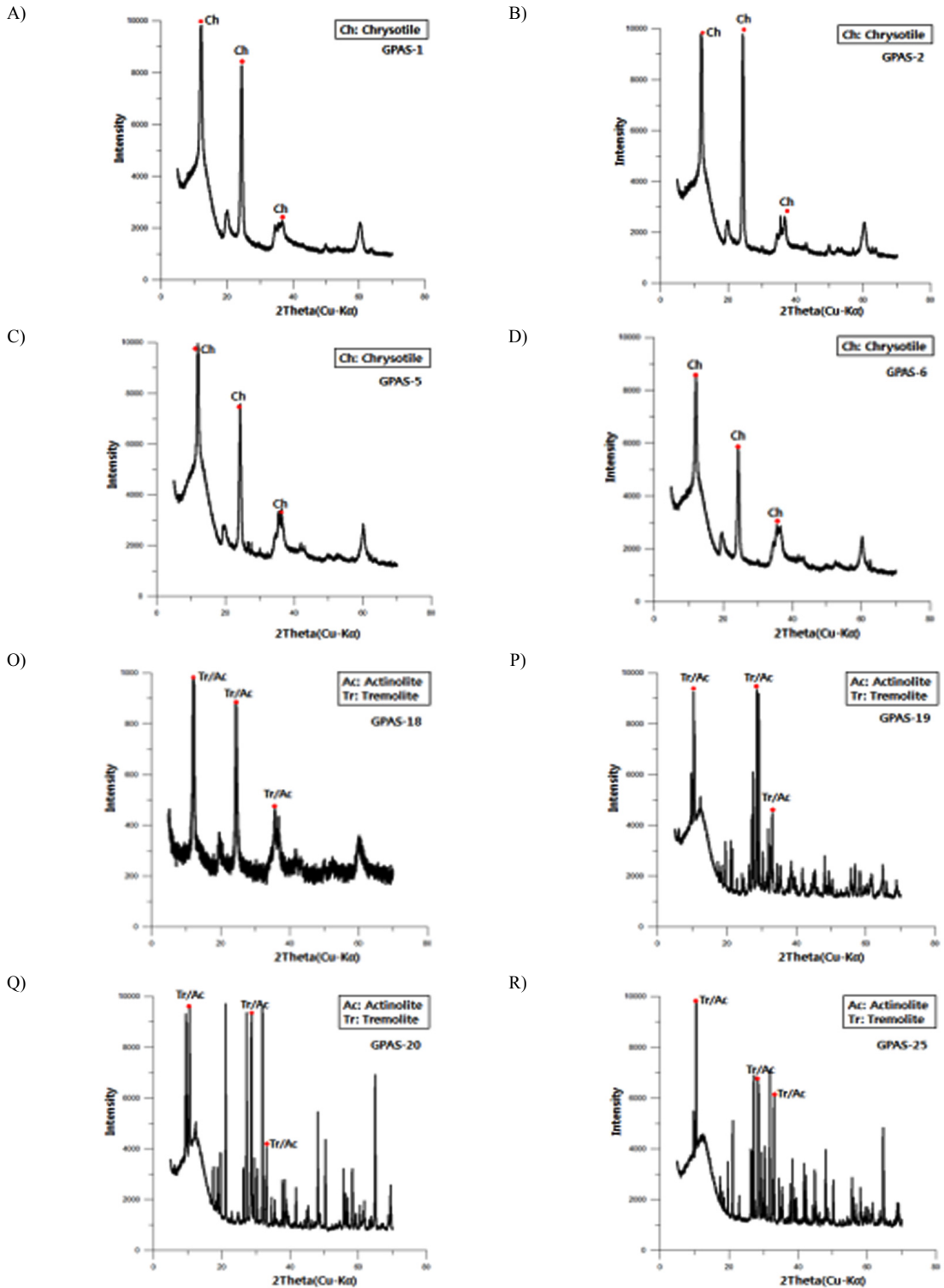


Figure 7. Representative XRD analyses of the asbestos for the serpentinites from the Gapyeong area

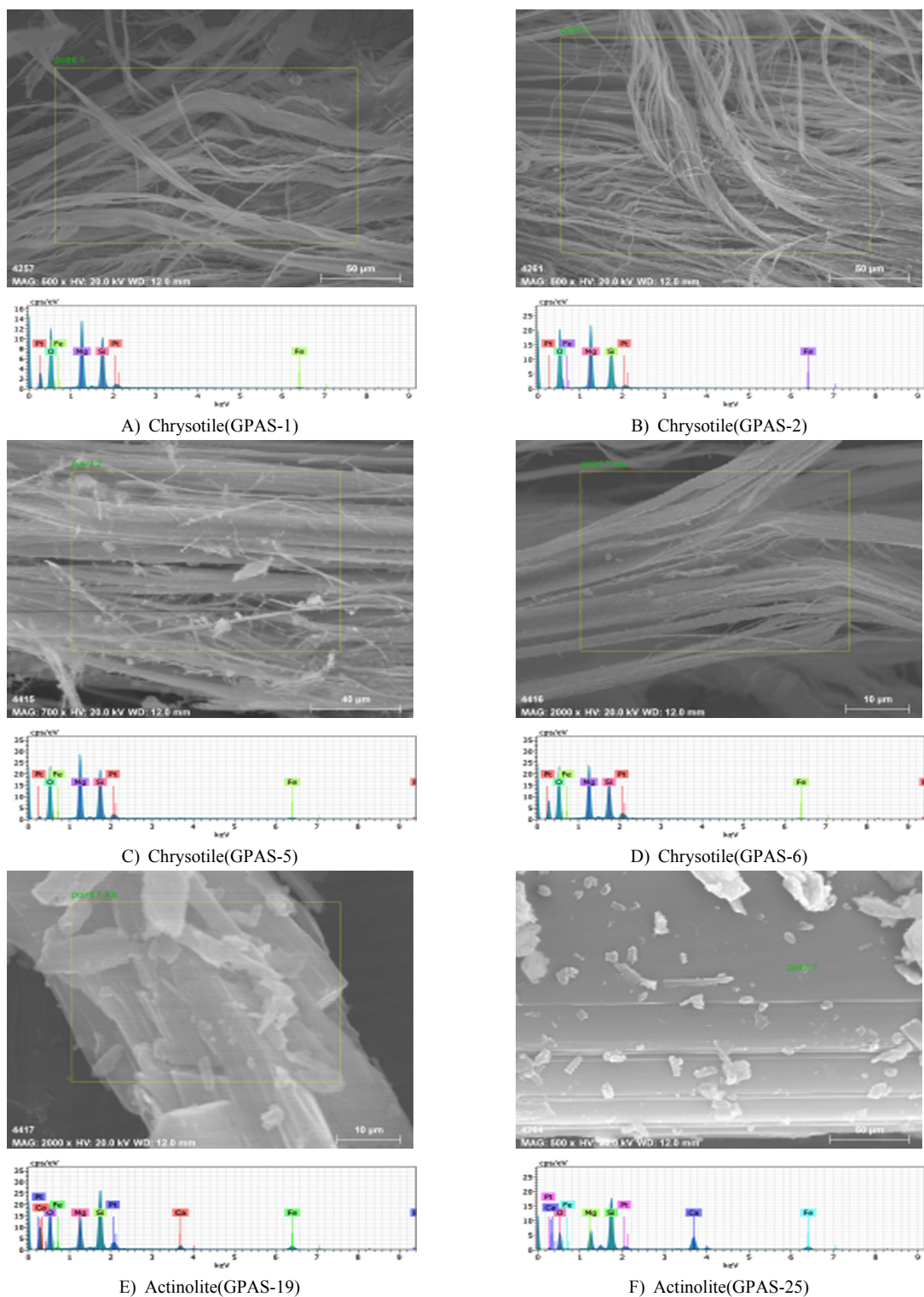


Figure 8. Representative SEM analyses of asbestos for the serpentinites from the Gapyeong area

조성을 보였다(Figure 6).

위 각섬석 결과는 홍성 사례(Song et al., 2004)와 유사하다. 홍성 지역 암석도 재결정 및 변질 흔적을 보이며 단일의 자형 및 거정질 형태는 tremolitic hornblende에서 magnesio hornblende 조성을, 섬유상 형태는 tremolitic 조성을 보인다.

XRD 분석: PLM분석을 통해 백석면, 트레몰라이트, 악티노라이트로 확인된 시료를 100 μm 이하로 분쇄하여 XRD로 분석하였다(Figure 7). 이 분석 결과치를 미국 표준기술연구소(NIST)의 표준참고물질(SRM)과 비교를 하였다. 분석결과 두 광산 모두에서 백석면, 트레몰라이트 석면, 악티노라이트 석면이 검출되었다.

SEM 분석: PLM 분석을 통하여 백석면, 트레몰라이트 석면, 악티노라이트 석면이 확인된 시료에 대해 주사전자 현미경을 이용하여 관찰하였다(Figure 8). 관찰 결과 백석면, 트레몰라이트 석면, 악티노라이트 석면이 확인 되었다. 백석면은 대부분 세맥 및 벽개에서 확인되었다. SEM으로 확인 된 시료를 EDS를 이용하여 주원소를 분석하였고, 그 결과 백석면, 트레몰라이트 석면, 악티노라이트 석면을 판명하였다.

그 외에 사문석은 감람석 및 휘석의 변질물로 산출되고, 일부 결정들은 감람석 및 휘석류의 가상을 보존하기도 한다. 일부는 격자형 망상구조, 아우어글래스, 리본 구조를 보이기도 한다.

VI. 토 의

가평의 사문암체는 수회에 걸친 변성 및 변질작용을 받았다. 많은 알파인형 초염기성암의 연구들도 이 암석들이 지표면에 정치 또는 관입 과정 또는 후에 많은 변성 및 변질 작용을 받았음을 언급하고 있다 (Pakdung, 1984; Dymek et al., 1988; Raymond, 1995).

이런 변성 및 변질 과정 중 사문암 지역에서는 석면이 산출이 된다. 가평 사문암체 분포지에는 다양한 크기의 산성 화성암류가 분포한다. 기 국외 연구들도 석면의 산출에 영향을 주는 요소로 열수가 있고 이 열수의 근원은 화성암체, 특히 산성암체임을 언급하고 있다(Churchill et al., 2000).

가평지역의 사문암체에서는 사문석계 및 각섬석계 석면이 산출 되고 있다. 백석면은 수 mm 폭의 세맥,

수 cm 폭의 벽개에서 교차 섬유 형태로 산출이 된다. 하지만 트레몰라이트 및 악티노라이트 석면은 수 cm-수 십 cm 폭의 소 단층면, 벽개, 단구 지역에서 미끌림 또는 경사섬유 형태로서 산출된다. 그 결과들은 실험 연구 (PLM, X-선 회절분석, 주사전자현미경 분석결과)에서 확인되었다(Table 4).

이런 유형의 석면 산상은 충남 광천의 사문암체 (Song et al., 2008)와 유사하다. 이 연구에서는 열수의 유입통로로 고려되는 수 cm에서 수 십 cm 폭의 벽개와 단구를 따라 악티노라이트와 트레몰라이트 석면이 산출되고, 세맥 및 벽개와 같은 작은 균열을 따라 수 mm에서 수 cm 두께로 백석면이 산출되었음을 암시한다. 유사한 석면 산상이 보령의 정전 지역 (Song et al., 2013)에서도 확인이 된다.

캘리포니아 엘도라도 사문암 지역에서도 교차섬유, 미끌림섬유 또는 경사섬유 형태로 백석면이, 각섬석계 석면이 단층 및 전단대에서 경사섬유로 산출되고 있음이 보고되고 있다(Churchill et al., 2000). 가평 지역의 전체적인 석면 산상은 충남 광천 및 미국 서부 엘도라도의 사례와 유사하다는 것을 보여준다.

VII. 결 론

가평 지역의 사문암체는 단층과 연관 되어 분포하며, 변성 및 변질을 받은 페리도타이트이다. 주 구성 광물은 감람석 및 사방 휘석이며, 변질 광물은 각섬석, 사문석, 녹리석 등을 포함하는 듀나이트 및 하즈버자이트이다. 변성의 흔적으로서 잔쇄반상 조직, 등립질-모자이트 및 원생입상 조직을 나타낸다.

광물학적으로는 높은 포스테라이트 및 Ni 조성의 감람석, 높은 마그네슘함량의 사방휘석을 포함한다.

가평 암체는 전세계적으로 지구조운동과 연관되어 지표면에 노출된 알파인형 초염기성암 및 충남 서부의 선캠브리아기 단층과 연관되어 있고, 변성된 초염기성 암체와 유사하다. 산상을 고려 시 천부 맨틀 판형으로서, 단층과정을 통해 지표면에 노출된 알파인형 초염기성암임을 추측하게 된다.

가평광산지역의 사문암체는 지중에서 지표면으로 이동 중 생긴 균열과 소단층의 접촉부에서 변성 및 변질 작용을 받아 사문석계 및 각섬석계 석면이 같

이 산출 된다.

백석면은 수 mm 폭의 세 맥, 수 cm 폭의 벽개에서 교차 및 경사섬유 형태로 산출이 되고, 트레몰라이트 및 악티노라이트 석면은 소 단층면, 수 cm-수십 cm 폭의 벽개에서 주로 산출이 된다.

그 결과는 PLM, X-선 회절분석, 주사전자현미경 분석결과에서 확인되었다. PLM 분석결과 백석면은 파도치는 형태로 산출되었고, 트레몰라이트 및 악티노라이트 석면은 침상 형태로 산출 되었다. PLM 분석 결과 석면이 확인된 시료에 대해 X-선 회절분석을 실시하였고 이 결과 백석면, 트레몰라이트 석면이 검출되었다.

주사전자현미경 분석결과 좁은 열수 유입 통로인 세맥 및 벽개에서 발견되는 석면은 파동상의 백석면이, 비교적 큰 열수 통로인 소단층면, 단구를 따라 발견되는 석면은 침상의 각섬석계 석면이 우세하였다.

References

- Agency for Toxic Substances and Disease Control, Toxicological profiles for asbestos(Update): U.S. Department of Health & Human Services, Public Health Service, Atlanta, Georgia.; 2001. p. 327
- Churchill RK, Hill RL. A General Location Guide for Ultramafic Rocks in California - Areas More Likely to Contain Naturally Occurring Asbestos, 2000, Map scale 1:1,100,000, California Department of conversation, Division of Mines and Geology Open-File Report 2000-19; 2000. p.7
- Churchill RK, Higgins CT, Hill B. Areas More Likely to Contain Natural Occurrences of Asbestos in Western El Dorado County, California, State of California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, Open-File Report 2000-002.; 2000. p.66
- Clinkenbeard JP, Churchill RK, Kiyong L. Guidelines for geological investigations of naturally occurring asbestos in California. California Geological Surveys, Special Publication; 2002. p.124
- Dymek RF, Brothers SC, Schiffries CM. Petrogenesis of ultramafic metamorphic rocks from 3800 Ma Isua supracrustal belt, western Greenland. J Petrol 1988; 29: 1353-1397
- Higgins CT, Clinkenbeard JP. Relative likelihood for the presence of naturally occurring asbestos in Eastern Sacramento County, California. Dept. of Conservation, California Geological Survey. Special Report 192.; 2006. p. 34
- Kim BG, Lee SM, So CS, Sin MS. Explanatory Text of the Geological Map of Yongduri sheet. 1:50000. Geological and Mineralogical Institute of Korea, 1974
- Lee SM, Kim BG, So CS, Sin MS. Explanatory Text of the Geological Map of Yongduri sheet. 1:50000. Geological and Mineralogical Institute of Korea, 1974
- Paktung AD. Metamorphism of the ultramafic rocks of the Thompson mine, Thompson nickel belt, Northern Manitoba. Canadian Miner 1984; 22: 77-91
- Raymond, LA, Metamorphic petrology. Wm. C. Brown Publishers, 1995; 656-675.
- Song SH, Choi SG, Woo JG. Genetic implications of ultramafic rocks from the Bibong area in the Kyeonggi gneiss complex. Econ. Environ Geol 1997; 30(5): 477-491
- Song SH, Choi SG, Oh CH, Seo JE, Choi, SH. Petrography and Geochemistry of the Ultramafic rocks from the Hongseong and Kwangcheon areas, Chungcheongnam-Do. Korean Society of Econ Environ Geol. 2004; 37(5): 477-497
- Song SH, Hwang JH, Hwang BG, Kim, HW. Occurrence types and mineralogical characteristics of asbestos for the Kwangcheon area, Chungnam. Korean Industrial Hygiene Association 2008; 18: 271-281
- Song SH, Lim HJ, Lee WS. Genetic Differences of Two Asbestos Mines, Boryoung Area. Econ Environ Geol 2013; 46(2): 165-178
- Streckeisen A. To each plutonic rock its proper name. Earth-Science Reviews 1976; 12: 1-33
- Wee SM, Choi SG, So CG. Preliminary study on ultramafic rocks from the Chungnam Province, Korea. Econ Environ Geol 1994; 27(2): 171-180
- Woo YK, Choi SW, Park KH. Genesis of talc ore deposits in the Yesan area of Chungnam, Korea. J Korean Inst Mining Geol 1991; 24(4): 363-378
- Wylie AG, Verkouteren JR. Amphibole asbestos from Libby, Montana: Aspects of nomenclature: American Mineralogist 2000; 85: 1540-1542