열처리에 따른 석면의 광물학적 특성변화

정현이¹ · 문원진² · 윤성준¹ · 김유미¹ · 노 열^{1*}

¹전남대학교 지구환경과학과, ²한국기초과학지원연구원 광주센터

Changes of Mineralogical Characteristics of Asbestos by Heat Treatment

Hyeonyi Jeong¹, Wonjin Moon², Sungjun Yoon¹, Yumi Kim¹ and Yul Roh^{1*}

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²Korea Basic Science Institute, Gwangju Center, Gwangju 500-757, Korea

Asbestos is designated as carcinogen minerals. Detoxification of asbestos is being conducted by physical and chemical treatments that lead the formation of non-fibrous mineral particles or phase transitions. Major researches have been performed on mineralogical properties of asbestos and possibilities of detoxification in Korea. More specific studies are needed to prove the form and crystal structure changes during the detoxification of asbestos via heat treatment. Therefore, we studied thermal effects on mineralogical characteristics of chrysotile and asbestiform tremolite using electron microscopy investigation. Electron microscopy investigation showed chrysotile fibers were fully transformed into rod-shaped forsterite at 850°C in 2 hours, and asbestiform tremolite fibers were converted into non-fibrous diopside at 1050°C in 2 hours. Fibrous asbestos were converted into rod-shaped minerals, which are non-asbestiform. However, compositions of both minerals were not changed before and after heat treatment. These results indicate that thermal treatment of asbestos completely broke down asbestos structure due to dehydroxylation and recrystallization. Thus, electron microscopy investigation can provide the useful information of shapes, crystal structure, and chemistries of the asbestos for the detoxification.

Key words : asbestos, chrysotile, tremolite, heat treatment, detoxification, electron microscope

석면이 발암물질로 지정 되면서 물리화학적 처리를 통하여 석면광물을 비섬유형으로 변형시키거나 또는 상전이시킴으로 광물 종을 변화시켜 무해화하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 국내에서는 석면의 광물학적 특성과 함께 무해화가 가능함을 제시하는 연구만 진행되었을 뿐, 열처리에 따른 석면광물의 형태 및 결정구조 변화에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 산출되는 백석면(chrysotile)과 석면형 투각섬석(asbestiform tremolite)에 대하여 열처리 전·후 석면의 형태 변화와 상전이에 따른 광물학적 특성을 전자현미경법으로 연구하였다. 백석면은 850°C에서 2시간 동안 열처리된 후 감람석으로 상전이 되었으며, 석면형 투각섬석은 1050°C에서 2시간 동안 열처리된 후 투회석으로 상전이 되었다. 이러한 광물 상전이를 전자현미경법으로 연구한 결과, 두 석면은 섬유상 및 침상의 형태를 보이는 섬유다발이 열처리에 의해 끝이 매끄러운 주상의 형태로 변형되었으며, 분쇄하여도 벽개면, 섬유다발 등과 같은 형태로 발달하지 않음을 확인하였다. 또한 열처리에 따른 광물의 주 구성성분 변화 없이 결정구조의 변화가 일어남을 확인하였다. 이는 함수 규산염광물인 석면이 열에 의해 수산기(OH)가 제거되면서 광물의 상전이와 결정구조의 변화가 나타난 것으로 사료된다. 이처럼 전자현미경법은 석면의 형태, 화학성분, 그리고 결정구조의 변화를 동시에 확인 할 수 있어 광물 상전이에 따른 석면의 무해화를 연구하는데 효과적인 방법으로 판단된다.

주요어 : 석면, 백석면, 투각섬석, 열처리, 무해화, 전자현미경

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 original work is properly cited.

*Corresponding author: rohy@jnu.ac.kr

1. 서 언

석면(asbestos)은 산업적으로 활용되던 규산염광물로, 미국산업안전보건청(OSHA)의 기준에 따라 길이가 5 μm 이상이고, 종횡비가 3:1 이상인 섬유상의 광물을 석면으로 분류하고 있다. 자연에서 산출되는 석면은 6 가지 종류로, 광물학적 특성에 따라 사문석계열과 각섬석계열 두 가지로 나뉘며 Fe, Mg, Ca 및 Na를 포함하는 양이온에 따라 세분된다(Table 1).

석면은 잘게 쪼개지는 긴 섬유상 또는 침상의 결정 형태로 인해 다른 재료와 혼합하여 간단히 복합재료가 가능할 뿐만 아니라 다양한 형태로 가공이 가능하고 또한 제조된 복합재료의 제 특성들도 매우 우수하여 산업혁명 이후 건축자재, 방열재, 내화재 등으로 광범위하게 사용되어져 왔다. 그러나 석면에 노출된 사람으로부터 석면폐와 같은 석면관련 질환이 꾸준히 보고되어져 왔으며, 역학조사 결과 석면 흡입과 특정 폐 질환과의 연관성이 입증되었다(Becklake, 1991). 석면이 호흡을 통해 인체 내에 유입되면 폐암이나 폐증, 악성종양을 유발하여 세계보건기구(WHO)산하의 국제암연구소(IRAC)에서는 석면을 1급 발암물질로 지정하였다. 최근에는 국내에서도 고용노동부 고시(제2008-26호)에 따라 석면을 발암물질로 지정하였으며, 환경부에서는 2012년에 석면안전관리법 시행령을 발표하여 석면함유물질에 관한 정부차원의 대책을 마련하였다.

국내에서 사문석계의 폐석면 광상은 경기도 가평, 충남 홍성·청양, 경북 안동 지역에, 각섬석계의 폐석면 광상은 충북 제천, 충남 보령·서산·태안 지역에 분포한다(Ministry of Environment, 2009). 이들 대부분은 자연적인 풍화와 더불어 기상 현상 또는 지역 주민들의 일상적인 활동에 의한 비산으로 건강문제가 야기되고 있어 모니터링과 함께 토양 정화 등의 관리가 필요하다(Shin *et al.*, 2012).

석면의 독성은 석면의 종류, 형태, 크기, 표면의 특징 및 내구성(예 조직 내 화학적기계적인 내구성) 등의 인자들에 의해 영향 받는 것으로 알려져 있다(Starton

et al., 1981; Doll and Petro, 1985). 따라서 최근에는 석면을 무해화하고자 광물학적 규명과 함께 광물의 상전이 연구가 진행되고 있다. 가평과 홍성지역에서 산출되는 백석면(chrysotile)은 염산, 황산 그리고 옥살산과 반응하여 분해되며, 열처리 결과 약 811°C에서 광물의 상전이가 일어났다(Lee, 2014). 또한 제천과 서산에서 산출되는 석면형 투각섬석(asbestiform tremolite)은 약 950~1100°C 사이에서 상전이 되어 무해화가 가능함을 보여주었다(Kim, 2014). 하지만 기존 연구에서는 열처리에 따른 광물의 상전이를 확인하였을 뿐, 형태 또는 결정구조의 변화에 대한 언급이 없어 보다 구체적인 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 국내에서 산출되는 백석면과 석면형 투각섬석(asbestiform tremolite)에 대하여 열처리 전·후 석면의 형태 변화 및 상전이에 따른 광물학적 특성을 전자현미경법을 이용하여 연구하였다.

2. 연구지역 및 연구방법

2.1. 연구지역

기존연구에 의해 석면이 산출된다고 밝혀진 지역에서 백석면과 각섬석계 석면을 채취하여 본 연구를 진행하였다. 백석면은 충남 홍성군 구항면 마온리 일대에서 채취하였다. 이 지역은 사문암체가 분포하는 지역으로 선캄브리아기의 변성퇴적암류인 월현리층을 기반암으로 하며, 이를 관입하는 덕정리 편마암류, 시대미상의 편상 화강암류와 백악기 장곡리 섬록암과 반화강암류 등이 분포하고 있다(Lee and Kim, 1963). 월현리층은 지구조 복합체로, 초염기성 내지 염기성 변성화산암류가 북동 방향으로 렌즈상 분포를 보이며, 부분적으로 사문암화 또는 활석화 되어있다. 이에 월현리 지구조 복합체 내의 변성퇴적암류와 수직단층으로 접하고 있으며 변성화산암류에 의해 사문석화 된 암체 주변에서 백석면이 산출되는 풍화된 토양에서 시료를 채취하였다(Fig. 1).

석면형 투각섬석은 충남 서산시 대산읍 영탑리 일대

Table 1. The regulated asbestos minerals

Mineral Group	Mineral Name	Regulatory Name	Ideal Chemical Formula
Serpentine Group	Chrysotile	Chrysotile	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	Amosite	Cummingtonite-Grunerite	$(\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Amphibole	Crocidolite	Riebeckite	$\text{Na}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Actinolite	Actinolite	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Anthophyllite	Anthophyllite	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	Tremolite	Tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Fig. 1. Geological map around the Maon-ri, Guhang-myeon, Hongseong-gun, Chungnam, South Korea (modified from Lee and Kim, 1963).

에서 채취하였다. 이 지역은 탄산염암체가 분포하는 지역으로 서산층군의 선캄브리아기 변성퇴적암류가 전역에 걸쳐 분포하고 있으며, 편암 및 편마암을 기저로 하며 관계미상의 석회암 및 편암의 위에 상부규암과

대산리층이 놓여있다. 또한 화강편마암과 시대 미상의 편상 화강암과 암맥류가 부분적으로 관입하고 있다 (Kim and Hwang, 1982). 이 지역은 매우 심하게 변성을 받은 것으로 보이며, 특히 석회암은 열수변질을

Fig. 2. Geological map around the Yeongtap-ri, Daesan-eup, Seosan-si, Chungnam, South Korea (modified from Kim and Hwang, 1982).

받아 섬유상의 트레몰라이트나 악티노라이트를 포함하고 있으므로, 이지역의 토양층에서 각섬석계 석면이 산출되는 토양시료를 채취하였다(Fig. 2).

2.2. 시료채취

충남 홍성군 마온리에서 토양시료를 채취한 위치는 북위 36°33' 동경 126°38'이며(Fig. 3A), 충남 서산시 대산읍 영탑리에서 토양시료를 채취한 위치는 북위 36°55' 동경 126°27'이다(Fig. 4A). 채취한 토양에서 육안상 구분이 되는 석면형 광물의 집합체를 따로 분리하였으며, 이를 열처리 실험에 사용하였다(Fig. 3B, 4B).

2.3. 전처리 및 분석 방법

채취한 시료는 60°C 이하에서 24시간 이상 충분히 건조를 시킨 후 과산화수소(H_2O_2)로 유기물을 제거하였다. 이후 약 90°C에서 과산화수소를 기화시키기 위한 중탕 처리를 하였으며 약 95°C에서 24시간 이상 충분히 건조하였다. 건조된 시료는 75 μm 표준체(KS mesh No. 200)를 통과시켜 분말시료를 얻었다. 준비

된 분말시료 중 일부(약 5 g)는 실험용 전기로(LAB SCIENCE 사제)를 이용하여 백석면은 850°C에서, 석면형 투각섬석은 1050°C에서 2시간 동안 열처리를 실시하였다. 원 시료와 열처리된 각각의 시료는 X선 회절분석(X-ray diffraction, XRD)을 실시하여 석면광물 및 상전이 광물을 동정하였다. 분석에 이용된 기기는 PANalytical 사제, X'Pert PRO Multi Purpose X-ray Diffractometer이고 Cu-K α 선과 Ni-filter를 이용하였으며, 가속 전압은 40 kV, 전류는 30 mA 조건에서 분석하였다. 또한 열처리에 따른 석면의 형태 및 상변화를 관찰하기 위하여 전자현미경 분석을 실시하였다. 주사 전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM) 분석은 Hitachi S-4700, FE-SEM을 사용하였으며, 가속 전압은 15 kV의 조건에서 분석하였다. 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM) 분석 및 에너지 분산 분광기(Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)분석으로는 Phillips Tecnai F20을 사용하였고, 200 kV의 가속전압 조건에서 분석하였다.

Fig. 3. (A) A satellite image of Maon-ri, Guhang-myeon, Hongseong-gun, Chungnam, South Korea (modified from Naver map) and (B) a photograph showing a soil sample containing chrysotile from the site, red circle in A.

Fig. 4. (A) A satellite image of Daero-ri, Daesan-eup, Seosan-si, Chungnam, South Korea (modified from Naver map) and (B) a photograph showing tremolite asbestos-containing soil sample from the site, red circle in A.

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 열처리에 따른 백석면의 상전이

열처리 전·후 광물의 상 동정을 위한 X선 회절 분석 결과, 열처리 전 시료에서는 백석면(chrysotile, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)의 주요 피크들이 확인되었다. 상대강도가 낮은 피크들도 백석면 피크의 위치와 대부분 동일한 것으로 나타났다. 반면, 열처리한 시료는 감람석(forsterite, Mg_2SiO_4)의 피크와 일치하였다(Fig. 5).

광물의 미세조직 변화를 관찰하기 위해 SEM 분석을 실시하였다. 백석면은 중형비가 100:1 이상이고 벽개면이 발달하였으며, 양 끝단이 여러 갈래로 갈라져 다발로 존재하는 유연한 섬유상의 미세조직을 가지고 있었다. 하지만 850°C 에서 2시간 동안 열처리된 시료는 주상의 형태를 보였으며, 백석면의 형태적 특징은 전혀 관찰되지 않았다(Fig. 6). 열처리 전·후 결정구

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of the soil sample consist of chrysotile: (A) before and (B) after heat-treatment.

Fig. 6. SEM images of the soil sample consist of chrysotile: (A) before and (B) after heat-treatment.

Fig. 7. TEM image (A), EDS analysis (B), and diffraction patterns (C) of the chrysotile used for heat treatment.

Fig. 8. TEM image (A), EDS analysis (B), and diffraction patterns (C) of the heat-treated chrysotile.

Table 2. Comparison of d-spacing with lattice plane (hkl) of a chrysotile (No. 46-1445) and a chrysotile used for heat treatment

hkl	d-spacing (Å)	
	Chrysotile (No. 46-1445)	Estimated value of chrysotile
D1 (101)	4.587	4.521
D2 (0012)	3.633	3.638
D3 (116)	2.496	2.507
D4 (301)	1.536	1.544

조 및 화학성분의 변화를 관찰하고자 TEM-EDS 분석을 실시하였다. 백석면은 섬유다발의 끝단이 여러 갈래로 갈려져 있는 침상의 결정으로 섬유의 중심이 비어있는 hollow tube 구조를 가지고 있었으나, 열처리된 시료에서는 벽개가 관찰되지 않을 뿐만 아니라 끝단이 둥근 광물로 관찰되었다(Fig. 7A, 8A). 또한 두 시료는 백석면의 주요 성분인 Mg, Si, O의 성분을 가지고 있었으며, 열처리 과정에서 화학성분의 변화는 일어나지 않은 것으로 확인되었다(Fig. 7B, 8B). 이에 결정구조를 명확히 규명하기 위해 전자선회절도형을 획득하여 해석해 보았다. 열처리 전 시료에서 각각의 hkl 면에 대한 저면간격은 백석면 (ICDD, International Centre for Diffraction Data No. 46-1445)과 일치하였다(Table 2). 열처리한 시료에서 획득한 각각의 hkl 면에 대한 저면간격은 감람석(ICDD No. 21-1260)과 일치하였으며 이 결과는 XRD 분석 값과 일치한다(Table 3). 따라서 850°C에서 열처리된 백석면은 주요 화학성분의 변화 없이 결정 내부에 포함되어 있

Table 3. Comparison of d-spacing with lattice plane (hkl) of a forsterite (No. 21-1260) and a heat-treated chrysotile

hkl	d-spacing (Å)	
	Forsterite (No. 21-1260)	Estimated value of heat-treated chrysotile
D1 (020)	5.100	5.083
D2 (021)	3.880	3.866
D3 (101)	3.720	3.710
D4 (130)	2.764	2.762
D5 (131)	2.509	2.507
D6 (112)	2.457	2.452
D7 (122)	2.267	2.264
D8 (140)	2.246	2.246
D9 (211)	2.160	2.154

던 구조수인 수산기(OH)의 제거와 구조변화로 감람석으로 상전이가 일어난 것으로 사료된다.

3.2. 열처리에 따른 석면형 투각섬석의 상전이

열처리 전·후 광물의 종류 동정을 위한 XRD 분석 결과, 열처리 전의 시료에서는 투각섬석(asbestiform tremolite, $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)의 주요 피크들을 확인하였다. 반면, 열처리된 시료는 투회석(diopside, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)의 피크와 일치하였다(Fig. 9).

열처리 전·후 석면형 투각섬석의 형태 및 상변화를 관찰하기 위해 전자현미경 분석을 진행하였다. SEM/TEM 분석결과, 열처리 전의 시료는 다수의 벽개면이 발달하고 있었으며, 직선형 침상의 결정이 관찰되었다(Fig. 10A, 11A). 하지만 1050°C에서 2시간 동안 열처리된 시료는 표면이 매끄러운 주상의 형태를 보였으며,

Fig. 9. X-ray diffraction patterns of the soil sample consist of tremolite: (A) before and (B) after heat-treatment.

벽개 등의 미세조직은 관찰되지 않았다(Fig. 10B, 12A). EDS 분석결과 각각의 시료는 투각섬석의 주요 성분인 Ca, Mg, Si, 그리고 O가 검출되었다(Fig. 11B, 12B). 이에 결정구조를 명확히 규명하기 위해 전자선 회절도형을 획득 후 해석한 결과, 열처리 전의 시료는 hkl 면에 대한 저면간격의 값이 투각섬석(ICDD No. 44-1402)과 일치하였다(Table 4). 열처리된 시료는 hkl 면에 대한 저면간격의 값이 투회석(ICDD No. 41-1370)과 일치하였으며, 이는 XRD 분석결과와 일치한다(Table 5). 따라서 1050°C에서 열처리된 석면형 투각섬석은 주요 화학성분의 변화 없이 수산기의 제거와 결정구조변화로 투회석으로 상전이 된 것으로 사료된다.

3.3. 열처리된 석면의 파괴거동

일반적으로 자연 상태의 석면은 풍화되거나 파쇄작용을 받으면 끝이 여러 갈래로 갈라지고, 섬유상 및

Fig. 10. SEM images of the soil sample consist of asbestiform tremolite: (A) before and (B) after heat-treatment.

Fig. 11. TEM image (A), EDS analysis (B), and diffraction patterns (C) of the asbestiform tremolite used for heat treatment.

Fig. 12. TEM image (A), EDS analysis (B), and diffraction patterns (C) of the heat-treated asbestiform tremolite.

Table 4. Comparison of d-spacing with lattice plane (hkl) of a tremolite (No. 44-1402) and a tremolite used for heat treatment

D	hkl	d-spacing (Å)	
		Tremolite (No. 44-1402)	Estimated value of tremolite
D1	(110)	8.377	8.357
D2	(11 $\bar{1}$)	4.864	4.822
D3	(040)	4.502	4.448
D4	(240)	3.268	3.291
D5	(15 $\bar{1}$)	2.933	2.991
D6	(33 $\bar{1}$)	2.727	2.731
D7	(20 $\bar{1}$)	2.573	2.558
D8	(35 $\bar{1}$)	2.332	2.382
D9	(261)	2.157	2.131

침상의 형태로 쪼개지게 된다(Fig. 6A, 10A). 하지만 열처리에 의해 상전이 된 석면은 표면이 매끄러운 주상의 조직의 특징을 가지고 있었다(Fig. 6B, 10B). 이에 열처리된 백석면과 석면형 투각섬석을 막자사발에 넣고 인위적인 힘을 가해 분쇄하였으며 그 형태를

Table 5. Comparison of d-spacing with lattice planes (hkl) of a diopside (No. 41-1370) and a heat-treated tremolite

D	hkl	d-spacing (Å)	
		Diopside (No. 41-1370)	Estimated value of heat-treated tremolite
D1	(220)	3.220	3.207
D2	($\bar{2}$ 21)	2.985	3.134
D3	($\bar{3}$ 10)	2.943	2.906
D4	($\bar{3}$ 11)	2.891	2.731
D5	($\bar{1}$ 31)	2.555	2.531

TEM으로 확인하였다. 열처리된 백석면은 분쇄에 의해 잘게 부서졌지만 섬유다발과 같은 미세조직은 나타나지 않았다(Fig. 13). 열처리된 석면형 투각섬석도 분쇄에 의해 주상의 입자가 부러진 것 같은 형태를 보였고, 입자의 끝은 섬유상이나 침상이 아닌 매끄러운 형태로 관찰되었다(Fig. 14). 이러한 사실은 석면의 상전이가 하나의 광물 내에서 전체적으로 일어났음을 지시하며, 외부의 물리적인 힘에 의한 분쇄 산물에서도 석면형이 보이지 않아 무해화가 완료되었음을 의미한다.

Fig. 13. TEM images of the heat treated chrysotile after crushing.

Fig. 14. TEM images of the heat treated asbestiform tremolite after crushing.

4. 결 론

열처리에 따른 석면의 무해화를 연구한 결과, 850°C에서 2시간동안 열처리된 백석면은 감람석으로 상전이 일어났으며, 1050°C에서 2시간동안 열처리된 석면형 투각섬석은 투회석으로 상전이가 일어났다. 열처리된 백석면과 석면형 투각섬석의 광물 상전이를 전자현미경법으로 연구한 결과, 두 석면의 형태가 섬유상 및 침상에서 짧고 뭉툭한 주상의 형태로 변형되었고, 광물 입자를 분쇄하여도 석면형으로 발달하지 않음을 확인하였다. 열처리에 따라 광물의 화학성분은 변화가 없고, 결정구조의 변화가 일어남을 확인하였다. 이는 합수 규산염광물인 석면이 열에 의해 수산기가 제거되면서 내부구조의 변화가 나타난 것으로 사료된다. 이처럼 전자현미경법은 석면의 형태변화 관찰 뿐만 아니라 화학성분 및 결정구조의 변화를 동시에 확인할 수 있어 광물 상전이에 따른 석면의 무해화를 판단하는데 효과적인 방법으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국환경산업기술원 GAIA사업(과제번호: 2012000550020)과 한국기초과학지원연구원의 대학생 인턴십 프로그램의 재정지원으로 수행되었으며, SEM과 TEM-EDS 분석에 도움을 주신 송덕민 연구원께 감사드립니다. 그리고 XRD 분석에 도움을 주신 김철 연구원(전남대학교 공동실험실습관)께 감사드립니다.

References

Becklake, M.R. (1991) Asbestos and other fiber-related diseases of the lungs and pleura : Distribution and

- determinants in exposed population. *Chest*, v.100, n.1, p.248-254.
- Doll, R. and Petro, J. (1985) Effects on health of exposure to asbestos. HMSO, London, 62p.
- Kim, D.H. and Hwang, J.H. (1982) Geological report of the Daesan-Eigog sheet (1:50,000). Korea institute of Energy and Resources, 27p.
- Kim, J.H. (2014) Mineralogical characteristics of asbestos in soil derived from carbonate rock at Susan-myeon, Jecheon-si and Daesan-eup, Seosan-si. Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University (M.S. Thesis), 56p.
- Lee, C.H. (2014) Mineralogical characterization of asbestos in soil of abandoned asbestos mines at Gapyeong, Gyeonggi and Hongseong in Chungnam of S. Korea. Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University (M.S. Thesis), 62p.
- Lee, J.H. and Kim, S.S. (1963) Geological report of Hongseong sheet (1:50,000). Korea Institute of geological survey, 33p.
- Ministry of Employment and Labor (2008) Exposure limits for chemical substances and physical agents (No. 2008-26). Korea Ministry of Government Legislation, 37p.
- Ministry of Environment (2009) Asbestos Management Overview. Korea Ministry of Environment, 456p.
- Ministry of Environment (2011) Asbestos safety management act (Act No. 10613). Korea Ministry of Government Legislation, 11p.
- Shin, J.H., Oh, S.R., Hwang, S.Y., Chung, S.N., Kim, J.H., Nam, E.J., Lee, J.H., Choi, H.J., Eom, S.W., Chae, Y.Z., and Park, C.H. (2012) Asbestos exposure and health risk assessment for the residents near the abandoned mining area in Chungbuk, Korea. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, v.34, n.5, p.345-350.
- Stanton, M.F., Layard, M., Tegeris, A., Miller, E., May, M., Morgan, E., and Smith, A. (1981) Relation of particle dimension to carcinogenicity of amphibole asbestos and other fibrous minerals. *J. Nat'l Cancer Institute*, v.67, p.965-975.

2014년 9월 22일 원고접수, 2014년 10월 29일 1차수정, 2014년 10월 29일 게재승인