

국내 공기 중 섬유상 물질의 존재실태와 석면의 분석방법에 대한 고찰

Consideration of Analysis Method of Asbestos and Existing Condition for Fibrous Materials in Domestic Air

황진연(Jinyeon Hwang)¹ · 오지호(Jiho Oh)^{1,*} · 이효민(Hyomin Lee)¹
이진현(Jinhyun Lee)¹ · 손병서(Byeongseo Son)¹

¹부산대학교 자연과학대학 지질환경과학과

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

요약 : 부산과 울산의 중심지역에 대해 공기 중의 분진시료를 채취하여, 위상차현미경, 위상차분산현미경, 주사전자현미경 등으로 석면을 분석한 결과, 석면은 검출한계 이하로서 확인되지 않았다. 공기 중의 분진시료에는 섬유상물질이 다수 포함되었으나, 이들은 대부분 유기질 섬유인 것으로 나타났다. 무기질 섬유물질로는 암면, 세라믹섬유, 석고 등이 소량 포함되었으며, 비섬유상인 석영, 방해석, 장석 등의 광물도 가끔 관찰되었다. 국내의 공기 중 분진의 석면분석은 주로 위상차현미경으로 관찰하는 것으로 규정되어 있으나, 이것만으로는 석면의 식별이 불가능한 것으로 나타났다. 따라서 일본 JIS법과 같이 저온회화 처리 장치에 의한 유기물질 제거 후에 분산염색법으로 석면을 식별하고 계수하는 것이 효율적인 것으로 사료된다.

주요어 : 석면, 분진시료, 유기섬유, 무기섬유, 위상차현미경

ABSTRACT : Dust samples collected from air in metropolitan areas of Busan and Ulsan were analyzed by phase contrast microscopy, phase contrast dispersion microscopy and SEM. Asbestos concentration in dust samples was lower than detection limit. Many fibrous materials were observed in dust samples, but most of them were organic fibers. Inorganic fibers such as rock fiber, ceramic fiber and gypsum were contained in the samples and non-fibrous minerals such as quartz, calcite and feldspar were also occasionally observed. Domestic law requires that asbestos in air dust is mainly analyzed by phase contrast microscopy. From this study, however, precise analysis of asbestos was almost impossible by this method only. As indicated in JIS method of Japan, therefore, count and identification of asbestos were more efficient by dispersion staining method after removing organic materials in samples by low temperature incinerator.

Key words : asbestos, dust sample, organic fibers, inorganic fibers, phase contrast microscopy

*Corresponding author: +82-51-510-3462, E-mail: ohjiho@pusan.ac.kr

서 언

국내에서 석면(asbestos)에 의한 폐암, 중피종의 환자가 발생하고 있고, 석면의 폐기물과 폐광산, 각종 석면제품, 실내 공기오염 등의 석면에 대한 많은 문제가 대두되고 있다. 이에 관련하여 석면합유제품의 제조, 수입, 양도, 제공, 사용을 금지하고 석면의 안전관리에 관한 여러 법령(노동부 고시 산업안전보건법 제2007-26호, 환경부고시 제2012-72호의 석면안전관리법, 고용노동부 고시 제2012-9호 석면조사 및 안전성 평가 등에 관한 고시 등)이 시행되고 있다. 그러나 이러한 법령 시행에 필요한 석면의 분석기술과 관련 규정은 아직 미흡한 상태에 있는 것으로 생각된다.

석면을 생산했던 공장들은 오래 전에 없어졌으며, 석면광산도 모두 폐광되고, 이에 대한 안전 복구가 이루어지고 있다. 그러나 예전에 석면을 사용하였던 지붕재, 천장재, 벽재, 바닥재 등의 건축자재들은 기존에 축조된 많은 건물에 존재하고 있는 실정이다. 따라서 기존 건축물인 지하철역사와 학교 등의 실내 공기 중의 석면 문제가 이슈화되어 왔으며, 실제적으로 많은 곳에서 석면이 존재하는 것으로 언론을 통하여 알려져 왔다. 그동안 공기 중의 석면을 분석하는 방법으로 주로 위상차현미경(PCM)을 사용해 왔으며(Chung *et al.*, 2002; Choi *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2004; Ministry of Environment, 2010; Jung, 2011; Lee *et al.*, 2013), 이 결과를 통하여 공기 중에 석면이 다소 존재하는 것으로 보고되었다. 위상차현미경은 미세한 투명물체의 위상변화를 명암 차이로 바꾸어 구분하기 쉽도록 한 광학현미경으로서 주로 생물과 의학 방면에 사용되고 있다. 위상차현미경을 이용한 분석방법은 입자의 길이폭비(aspect ratio)를 확인하여 섬유상 입자와 비섬유상 입자를 구분·분석하는 방법으로, 공기 중의 입자 중 길이가 5 μm 이상이며 길이 대 지름의 비가 3:1 이상인 모든 섬유상 물질을 석면으로 간주하여 분석한다. 석면과 석면이 아닌 섬유를 구분하지 못하므로, 비석면 섬유상 물질은 분석의 방해물질로 작용하여 이러한 입자의 농도가 높은 환경에는 위상차현미경을 이용한 측정·분석방법을 적용하기 어렵다(OSHRI, 2009).

따라서 본 논문은 이러한 결과에 대해서 실제적으로 일부 공기분진에 대한 석면분석을 통하여 검증해 보고자 하였다. 이를 위하여 주로 부산과 울산 지역의 지하철역사, 관공서, 학교 등의 일부 다중

이용시설을 대상으로 공기 중 시료의 분석을 통하여 실제적인 석면의 존재실태를 파악하고, 이 과정을 통하여 분석방법의 문제점도 고찰해 보고자 하였다.

연구방법

공기 중 분진시료

공기 중 분진시료의 채취는 부산지역과 울산지역에 대해 이루어졌다. 이 시료들의 상세한 내용은 2008년의 부산지역환경기술개발센터 보고서(Hwang, 2008)와, 2010년의 울산지역환경기술개발센터 보고서(Hwang, 2010)에 기술되어 있다. 여기서는 이들 보고서의 결과를 종합하여 공기 중 시료의 분석 방법에 관련된 문제를 검토하였다. 부산지역에서는 지하철 역사, 부산역, 학교 등의 35개 지점에 대한 실내 공기 분진시료를 채취하였다. 울산지역에서는 관청, 울산역, 버스터미널, 학교 등의 18개 지점에 대한 실내 공기시료를 채취하였고, 도시 중심으로 일정 간격으로 실외에서 채취한 29개의 공기 분진시료도 채취하여 분석하였다.

공기 중의 분진시료는 국내외에서 일반적으로 인정되고 있는 방법(NIOSH, EPA, JIS 등)으로 채취하고 시편을 제작하였다. 즉, 시료 포집기는 KEMIK사의 Asbestos Sampler (SARA-5000)를 사용하였고, 공기 흡입필터로는 MCE필터(Mixed Cellulose Ester Membrane Filter, 25 mm, 08 μm pore size)를 사용하였다. 시료채취 높이는 1.5 m를 유지하도록 하였고, 공기시료의 포집은 12 ℓ/min 의 유량으로 하고, 실내채취에서는 600 ℓ , 실외 채취에서는 1,200 ℓ 의 공기를 채취하였다.

분진시료의 석면 분석

공기분진이 포집된 필터의 일부는 아세톤증기발생장치를 사용하여 슬라이드글라스에 투명하게 증착시켰다. 그리고 트리아세틴 용액을 떨어뜨리고 커버글라스를 붙여 위상차현미경 등의 광학현미경 관찰용 시편을 제작하였다. 공기 중 시료에 대한 광학현미경의 분석법에 대해서는 미국의 NIOSH (1994)와 국내 규정방법(OSHRI, 2009; Ministry of Environment, 2010)에서는 주로 위상차현미경으로 관찰하여 석면을 식별하고 계수하는 것으로 되어 있다. 위상차현미경은 물체에서 나타나는 굴절률의 차이를 명암으로 관찰하는 것으로 간섭상을 통해 관찰하는 편광현미경과 차이가 있다. 그러나 일본의 JIS에 규정된 방법(JIS K 3850-1, 2006)은 위상차

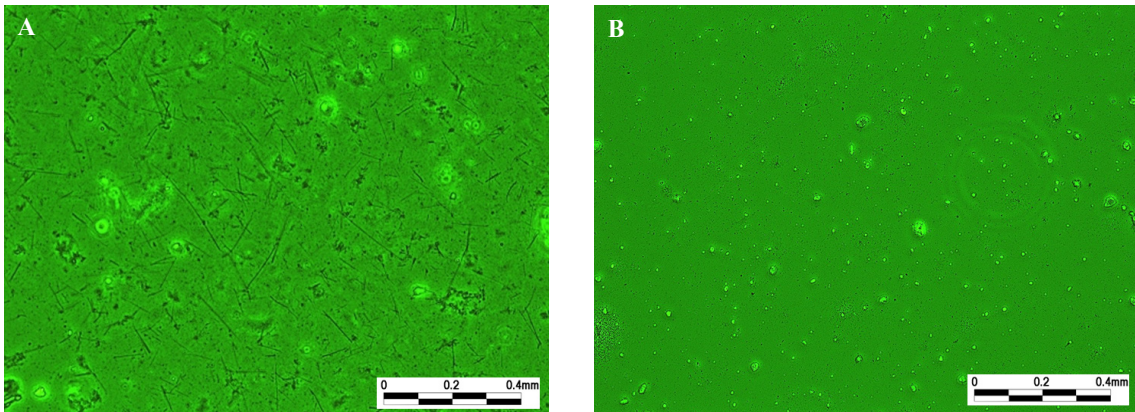


Fig. 1. Photos of phase contrast microscopy before and after treatment of low temperature incineration. A: before treatment, B: after treatment.

현미경과 함께 위상차분산현미경을 사용하는 방법이 제시되어있다. 일본의 방법을 사용할 경우에는 포집 필터에 포함된 유기질물질을 플라즈마 저온 회화장치를 이용하여 제거시키는 과정이 포함된다. 이렇게 유기물질을 제거한 후에 특정의 굴절액에 침액하여 위상차분산현미경을 사용하여 관찰한다. 이렇게 관찰하면 광학적 분산색의 차이로 쉽게 석면을 구분할 수 있기 때문이며, 이런 방법을 일반적으로 분산염색법이라 한다. 위상차분산현미경은 특수 분산용 대물렌즈를 장착한 위상차현미경을 말한다. 경우에 따라 특수 분산용 대물렌즈를 장착한 편광현미경으로도 분산염색에 의한 석면의 식별이 가능하다. 이번 연구에서는 위상차현미경에 의한 분석과 함께, 일본의 JIS에 규정된 방법에 따라 분산염색법을 사용하여 분석하였다. 플라즈마 저온 회화장치는 Plasma Reactor PR300을 사용했고, 120 W로 산소(O₂)를 60 ml/min으로 공급하며 6 h 처리하였다.

석면의 형태적인 구분은 일반적인 기준에 따라, 길이폭비가 3 이상이고 길이가 5 μm 이상이며, 직경이 3 μm 이하인 것으로 규정하여 관찰하였다. 광학현미경은 100~400배의 배율로 관찰하였고 일반적으로 규정된 방법으로 석면을 계수하였다. 기준이 되는 섬유가 200개 이상 계수될 때까지의 시야를 관찰하며, 섬유수가 적을 때는 50 시야 이상을 관찰하여 계수된 것을 분석결과로 나타냈다. 보다 정확한 정성 및 정량분석을 위해 분산대물렌즈를 장착한 위상차분산현미경에 의한 분석을 병행하였다.

석면물질의 보다 정확한 식별을 위하여 주사전

자현미경(SEM/EDS)을 이용하여 분석하였다. 공기 중에서 채집한 분진필터를 carbon paste를 이용하여 유리 슬라이드 상에 시편을 부착하였다. 측정은 Hitachi사 model S4800을 사용하였으며, 15.0 kV의 전압조건에서 주로 1,000배에서 5,000배까지의 관찰이 이루어졌으며, 에너지 분산분광장치(EDS)를 이용하여 정성분석을 행하였다.

연구결과 및 고찰

분진시료의 광학현미경 분석

채취한 시료에 대해 전문적인 방법으로 광학현미경 관찰용 시편을 제작하여 위상차현미경, 위상차분산현미경, 편광현미경 등의 광학현미경으로 관찰하였다. 우선 먼저 위상차현미경을 이용하여 섬유상의 물질들을 관찰하였고 총섬유의 함량을 계수하였다. 위상차현미경으로는 유기섬유 등의 다른 섬유상 물질과 석면을 식별하기 불가능하기 때문에 이것은 총섬유의 농도만을 계수할 수 있다(JIS, 2006).

Fig. 1에서 보듯이 채집한 공기분진의 모든 시료에서 섬유 형태의 입자가 위상차현미경으로 관찰되었다. 이들의 크기, 형상 및 광학적 성질 등도 시료에 따라 다양하게 나타났다. 섬유 형태의 것뿐만 아니라 입상, 판상 등의 다른 형태들도 관찰되었다. 섬유상 형태에 대해서 여러 광학현미경으로 석면 광물을 식별하고자 자세한 관찰을 하였으나, 역시 구분하기 어려운 것으로 나타났다. 따라서 시료에 포함된 모든 섬유상 물질을 대상으로 종류에 구분

Table 1. Total concentration of fibrous materials in some air dust samples collected from Ulsan
(f/ℓ : fibers per liter)

No.	U-1	U-2	U-3	U-4	U-5	U-6	U-7	U-8	U-9	U-10	U-11	U-12	U-13	U-14	U-15	U-16	U-17	U-18
Fields	50	5	41	23	14	5	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Fibers(f)	37	250	201	232	279	200	19	7	7	71	6	6	13	11	4	11	6	6
Conc.(f/ℓ)	6.60	448.10	43.90	90.40	178.60	358.50	3.41	1.25	1.25	12.73	1.08	1.08	2.33	1.97	0.72	1.97	1.08	1.08

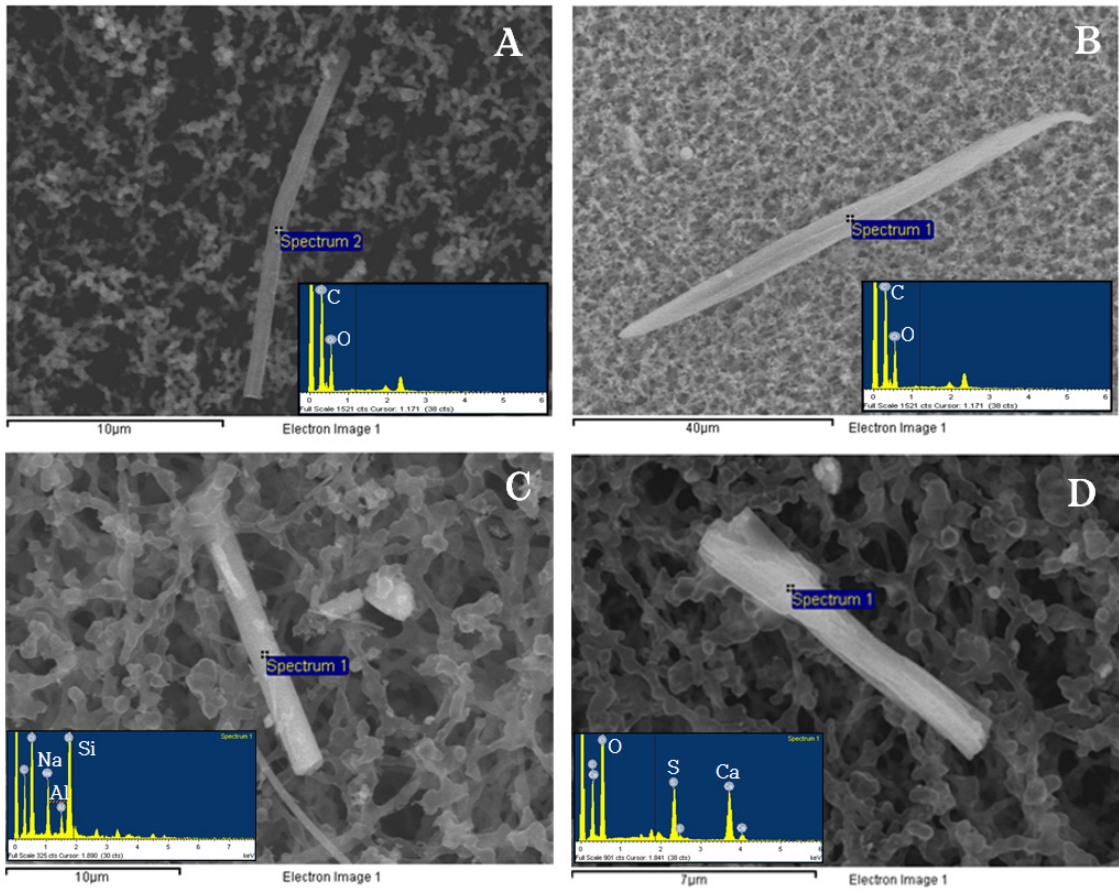


Fig. 2. SEM images of fibers in some air dust samples. A, B: organic fiber; C: rock fiber; D: gypsum.

없이 총 섬유수를 계수하여 Table 1에 나타냈다. 여기서는 울산지역의 실내 공기시료에 대한 자료만 Table 1에 나타냈다. 여기서 총섬유상 물질의 농도는 1~448 f/ℓ의 범위를 보이며 장소에 따라 다양한 수치를 나타냈다. 가장 많은 함량을 보인 U-23시료는 지하상가였고, 그 다음으로 많은 U-34, 35시료와 U-25, 26도 사람의 왕래가 빈번한 관청의 민원실이었다. 42-47은 학교이지만 학생들이 없는 기

간에 선풍기로 실내공기를 순환시켜 측정된 것으로 비교적 적은 함량을 나타냈다. 부산지역의 지하철역사 등의 실내 공기에 대한 분석 결과도 유사하게 측정된 모든 시료에서 섬유상 물질이 나타났으며, 사람의 통행이 빈번한 곳에서 상대적으로 많은 농도가 나타났다(Hwang, 2008). 이 결과로 보아 사람의 활동이 빈번한 곳에서 높은 농도를 보이는 것으로 보아 이들 농도는 석면함량이라기보다는 섬유, 제

Table 2. Total concentration of inorganic fiber in some air dust samples collected from Ulsan
(f/ℓ : fibers per liter)

No.	U-1	U-2	U-3	U-4	U-5	U-6	U-7	U-8	U-9	U-10	U-11	U-12	U-13	U-14	U-15	U-16	U-17	U-18
Fields	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Fibers (f)	7	9	10	14	11	9	2	2	3	3	1	1	1	2	0	2	1	1
Asbestos fibers (f)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conc.(f/ℓ)	1.25	1.61	1.79	2.51	1.97	1.61	0.36	0.36	0.54	0.54	0.18	0.18	0.18	0.36	0.00	0.36	0.18	0.18
Asbestos conc.(f/ℓ)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

지 등의 유기질 섬유 농도로 생각될 수 있다.

분진시료의 전자현미경 분석

전술한 광학현미경에서 나타난 섬유상 물질들의 보다 정확한 식별을 위하여 주사전자현미경(SEM-EDS)을 이용하여 분석하였다. 관찰결과, 공기분진 시료에서 다양한 형태와 크기의 섬유상 입자들이 다량 관찰되었다. 이들에 대해 EDS로 분석한 결과, 대부분 탄소의 함량이 가장 높게 나타나서 유기질 섬유물질인 것으로 확인하였다. 이러한 유기섬유는 대체로 형태상 확연히 구분되는 특성을 보이지만, 일부는 무기섬유와 같이 곧은 형태를 보이는 것도 나타났다. 시료 중에는 섬유상 물질 이외에 석영, 방해석, 장석, 산화철 및 운모 등의 광물입자들도 가끔 포함되었다. 무기질 섬유형태로서는 암면, 석고, 세라믹섬유 등이 포함되었다(Fig. 2). 석면의 존재를 탐색하기 위해 오랜 시간에 많은 지점을 자세히 관찰하고 분석하였다. 공기분진의 모든 시료들에 대해 주사전자현미경으로 관찰하였으나, 석면에 해당되는 입자는 발견하지 못하였다.

저온회화 처리법에 의한 분석

전술한 바와 같이 유기질 섬유가 다량 함유되는 것으로 보임에 따라, 이들을 플라즈마 저온회화장치를 통하여 유기질 물질을 제거시킨 후, JIS (2006)의 방법에 따라 무기질 섬유와 석면을 분석하였다. 저온회화처리의 전후에 대한 위상차현미경의 대표적인 사진을 Fig. 1에 나타냈다. 저온회화 처리 전에는 많은 섬유들이 존재하고 있으나, 처리 후에는 섬유의 형태가 현저히 감소하여 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 저온회화에 의해 유기질 섬유가 분해되어 없어진 것으로 그만큼 유기질 섬유가 많았음을 나타낸다.

저온회화 처리한 시편에 대하여 석면분석용 굴

절액에 침액하는 분산염색법으로 위상차분산현미경을 통하여 무기섬유와 석면을 식별하였다. 여기에 나타나는 모든 섬유는 무기섬유이기 때문에 이들을 계수하여 무기섬유의 농도를 측정하여 Table 2에 나타냈다. 모든 시료에서 이들 무기질 섬유는 0.2~2.5 f/ℓ의 범위로 나타나는데, 저온회화 전에 측정된 총섬유상 물질의 농도에 비해 극히 낮게 나타났다. 결과에서 보듯이 총섬유 농도와 무기섬유와는 별다른 상관성을 나타나지 않았다. 모든 시료에 대해서 자세히 관찰하였으나, 석면에 해당되는 분산색 등의 광학적 특성을 보이는 섬유는 발견되지 않았다. 물론 이 방법과 광학현미경에 대한 검출한계가 있기 때문에 전혀 없다고 말하기는 어렵다. 그러나 전술한 주사전자현미경의 결과로 보아서도 검출한계 이하로서 확인되지 않았다고 할 수 있다.

분석방법에 대한 검토

이상과 같이 부산과 울산지역에서 채취한 공기 분진시료에서 석면은 발견하지 못하였다. 이러한 연구결과는 국내에서 그동안 알려졌던 많은 분석 자료들과는 다소 다른 결과로 생각된다. 이것은 전술한 바와 같이 채취한 시료를 아세톤 증착 등의 기본적인 처리만을 통한 시편 제작에 의해 위상차현미경 등의 광학현미경으로만 관찰하였기 때문으로 생각된다. 이럴 경우에는 석면의 식별이 거의 불가능하기 때문에 다른 섬유상 물질들을 석면으로 오인해서 나온 결과로 생각된다. 국내에서는 플라즈마 저온회화 처리에 의한 유기물 제거를 하지 않고, 그대로 석면을 감정하기 때문에 분석의 오류가 필연적으로 발생할 수 있는 것으로 생각된다.

공기 중의 섬유상 물질로는 의류, 종이, 미생물 등의 유기성 물질과 함께 유리섬유, 암면, 세라믹 섬유, 석면 등의 무기질 섬유가 포함될 수 있다. 이

러한 섬유상 물질들이 혼합되어 있는 경우에 광학 현미경만으로 이들을 구분하기는 거의 불가능하다. 따라서 일본 JIS에서 규정한 것과 같이 저온회화 처리를 통하여 유기질 물질을 제거시키고 분산염색법에 의해 위상차분산현미경으로 관찰하는 것이 효과적인 것으로 생각된다. 즉 무기질 섬유와 석면 섬유의 함량을 빠르고 용이하게 계수할 수 있기 때문이다. 석면분석에 전자현미경(SEM, TEM)으로도 가능하지만 시편의 제작방법이 어렵고 비용이 많이 들며, 정량분석을 하는데 많은 시간이 걸리기 때문에 실제적으로 활용성이 매우 낮다. 이들은 일부 시료에 대한 정성분석을 목적으로 할 때 주로 사용하는 것이 효과적이다.

결 론

부산과 울산의 중심지역에 대해 공기 중의 분진 시료를 채취하여, 위상차현미경, 위상차분산현미경, 주사전자현미경 등으로 석면을 분석한 결과, 석면은 검출한계 이하로서 확인되지 않았다. 공기 중의 분진시료에는 섬유상물질이 다수 포함되었으나, 이들은 대부분 유기질 섬유인 것으로 나타났다. 무기질 섬유물질로는 암면, 세라믹섬유, 석고 등이 소량 포함되었으며, 비섬유상인 석영, 방해석, 장석 등의 광물도 가끔 관찰되었다.

국내의 공기 중 분진의 석면분석은 주로 위상차현미경으로 관찰하는 것으로 규정되어 있으나, 위상차현미경만으로는 석면의 식별이 거의 불가능한 것으로 나타났다. 따라서 위상차현미경으로 관찰된 섬유형태는 총섬유로 취급하여 석면과 관련 없는 것으로 처리하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 위상차현미경 이외에 경우에 따라 전자현미경을 추가로 사용하여 관찰하도록 하고 있으나, 투과전자현미경을 위해서는 별도로 공기분진을 채취하여 많은 전처리가 필요하며, 정량이 어려우며 시간과 비용이 많이 드는 등의 단점이 많다. 따라서 많은 시료에 대해 효과적으로 분석하기 위해서는 일본의 JIS법과 같이 플라즈마 저온회화 처리 후 굴절액을 사용하여 유기물질 제거한 후 위상차분산현미경으로 분산염색법으로 석면을 식별하고 계수하는 것이 효율적인 것으로 사료된다. 따라서 공기 중의 석면분석방법에 대한 재검토와 개선이 이루어지길 기대한다. 이를 통하여 과장된 석면의 분석 결과에 의해 불안감을 조성하는 일이 없어지길 바란다.

사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음을 밝힌다.

바쁘신 중에도 상세히 검토하여 많은 조언을 해 주신 두 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- Choi, C.G., Kim, C.N., Roh, Y.M., and Roh, J.H. (2002) Exposure level of releasing asbestos during building destruction work. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 12, 195-201.
- Chung, H.J., Baek, S.H., and Kim, J.H. (2002) A study on asbestos concentration of underground shops in Daejeon area. *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 7, 207-215 (in Korean with English abstract).
- EPA (U.S. Environmental Pollution Agency) (1989) Assessing asbestos in public buildings (EPA 560/5-88-002). U.S. Environmental Protection Agency.
- Hwang, J.Y. (2008) A Study on Environmental impact assessment and Improvement methods for Asbestos use of Multi-use Facilities in Busan area. Busan Green Environment Center research paper, 1-60 (in Korean).
- Hwang, J.Y. (2010) A Study on Distribution Characteristics of Airborne Asbestos Concentrations of the air and indoor air in Ulsan. Ulsan regional environmental technology development center research paper, 1-97 (in Korean).
- JIS (Japanese Industrial Standard) (2006) Determination of airborne fibrous particles- Part 1 : Optical microscopy method and scanning electron microscopy method. JIS K 3850-1, Japanese Standard Association.
- Jung, I.H. (2011) Airborne Asbestos Concentrations of Dental Laboratories in One Metropolitan City. *Journal of the Korea Convergence Society*, 2.1, 31-36 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.H., Lee, S.H., Kim, J.H., Oh, S.R., Shin, J.H., Eom, S.W., Chae, Y.Z., Lee, J.S., and Koo, J.Y. (2013) A Study on Characteristics of Airborne Asbestos Concentrations Using PCM and TEM in Life Environment Surroundings of Seoul. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35.9, 613-623 (in Korean with English abstract).
- Lim, M.H., Lee, S.K., and Jung, I.H. (2004) Airborne Asbestos Concentrations of Dental Laboratories in

- Daegu of Korea. Journal of Korean Society of Occupational and environmental Hygiene, 14.3, 264-269 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment (2010) Determination of the concentration of airborne asbestos fibers and other fibers in indoor by phase contrast microscope: ES 02303.1 (in Korean).
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) (1994) Method 7400: Asbestos and other fibers by PCM. Issue, 2, p.15.
- OSHRI (Occupational Safety and Health Research Institute) (2009) Mesurement and analysis of airborne asbestos using a phase-contrast microscope: Health field-educational materials institute 2009-14-94 (in Korean).
-
- Received June 11, 2015, Revised June 21, 2015, Accepted June 26, 2015, Responsibility Editor: Yun Deuk Jang