

전문가시스템을 이용한 석면 및 비석면의 분류 및 확인

Classifying and Identifying Asbestos and Non-Asbestos Fibers by a Rule Building Expert System

최 영 아 · 이 태 정 · 김 동 술*

경희대학교 환경·응용화학대학 대기오염연구실 및 환경연구센터

(2008년 4월 29일 접수, 2008년 6월 18일 채택)

Young-A Choi, Tae-Jung Lee and Dong-Sool Kim*

College of Environment & Applied Chemistry and

Center for Environmental Studies, Kyung Hee University-Global Campus

(Received 29 April 2008, accepted 18 June 2008)

Abstract

Asbestos is the name of a group of minerals with long and thin fibers that originate naturally in the environment. Asbestos mainly affects lungs and the membrane that surrounds the lungs. In general, PCM (phase contrast microscopy) and PLM (polarized light microscopy) have been used to analyze asbestos fibers. However, these methods have often problems to over-estimate number concentration when counting real asbestos fibers. Moreover, there are many difficulties when separating and identifying various asbestos and non-asbestos fibers. In order to determine quantitative information on fibrous particles, source profiles for asbestos and non-asbestos fibers must be initially developed on the basis of their chemical compositions and physical parameters.

In our study, a SEM/EDX was used to develop source profiles from known asbestos samples as reference samples. We could make the source profile matrix consisting of 6 types of asbestos fibers and 2 types of non-asbestos fibers by analyzing 380 fibers. Based on these profiles, a rule building expert system was developed by using the visual basic application (VBA). Various fibers were successfully classified by 2 simple rules in the EXCEL environment based on several visual steps such as inserting data, viewing results, and saving results. For a case study to test the expert system, samples from a construction materials and from various indoor environments such as a residential area, a preschool classroom, and an underground store were collected and analyzed. As a result of the survey, a total of 76 individual test fiber particles was well classified into 5 different types of particle classes; 9.3% of chrysotile, 15.4% of amosite, 0.8 of crocidolite, 4.2% of tremolite, 5.8% glass fiber, 21.1% of other fibers, and 43.5% of unknown fibers in terms of number concentration. Even though unknown portion was high, it will be decreased markedly when expanding fiber source profiles.

Key words : Asbestos, Individual fibrous particle, SEM/EDX, Source profile, Expert system

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2430, E-mail : atmos@khu.ac.kr

1. 서 론

석면(asbestos)은 일반적으로 자연에서 생성되는 광물성 석면원료와 석면함유물질(asbestos containing material, ACM)을 일컫는다. 석면의 종류는 사문석계 광물인 백석면(chrysotile)과 각섬석계 광물인 갈석면(amosite), 청석면(crocidolite), 직섬석(anthophyllite), 투각섬석(tremolite), 양기석(actinolite)으로 나뉜다. 석면은 인간의 호흡기나 소화관을 통해 체내로 흡수되며, 약 30년의 잠복기를 거쳐 폐암(lung cancer), 중피종(mesothelioma), 석면폐증(asbestosis) 등을 유발한다(Dusinska *et al.*, 2004; Wylie *et al.*, 1993). 뿐만 아니라 장 관련 암(Frumkin and Berlin, 1988)과 인두암, 유방암, 신장암 등과 관계가 있다(Maclure, 1987). 이러한 석면의 위해성 때문에 우리나라에서는 2009년 1월부터 모든 석면에 대해 제조·수입·양도·제공 또는 사용을 금지할 예정이다(노동부, 2007). 석면에 대한 작업장 노출기준은 모든 석면에 대하여 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health)의 권고기준(NIOSH, 1972)과 동일한 0.1개/cc로 대폭 강화하였다(노동부, 2002). 또한, 일반인에 대한 노출과 관련하여 다중이용시설 등의 실내공기질관리법에서는 권고기준 0.01개/cc 이하로 정하고 있다(환경부, 2004).

그동안 석면에 관련된 외국의 연구는 공공 건축물에서 방출되는 대기 중의 석면농도(Chesson *et al.*, 1990; Guillemin *et al.*, 1989) 등을 비롯하여 석면이 포함된 건축자재에서 발생하는 석면에 대한 연구(Helsen *et al.*, 1989; Spurny, 1989), 자동차의 라이닝에서 방출되는 대기 중 석면농도 연구(Jaffrey, 1990), 발암성에 영향을 미치는 석면 섬유 직경의 중요성(Wylie *et al.*, 1993) 등이 수행된 바 있으며, 최근에는 자동차엔진 해체과정에서의 석면노출 연구(Liukonen and Weir, 2005), 석면노출에서의 생물학적 지표에 대한 연구(Bhattacharya, 2005), 그리고 석면의 유전 독성에 대한 연구(Dusinska *et al.*, 2004) 등 실태조사 및 측정방법, 유해성에 대해 폭넓게 진행되고 있다. 이에 반해 국내의 연구는 주로 근로자를 대상으로 한 작업환경 조사나(유찬영, 2002; 최충곤, 2001; 백남원과 이영환, 1991), 건축자재에서 발생하는 석면

의 특성에 대한 연구(유성환과 김현욱, 1996; 유성환, 1993) 등이 있으며, 최근에는 병원, 지하상가 등 다중이용시설에서의 석면농도에 대한 연구(김강운 등, 2005; 임무혁 등, 2004; 하권철, 2004; 변상훈 등, 2003; 정현준 등, 2002)가 수행된 바 있다. 그러나 여전히 실내공간에 대한 석면의 개별입자에 대한 연구, 비석면 섬유에 대한 연구가 부족하며, 분석방법과 석면 섬유 확인 및 분류에 대한 정량적인 연구 또한 김수환과 김동술(1999), 한정희 등(2001), Caneve *et al.* (2005)의 연구를 제외하고 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 석면 및 비석면 섬유에 대한 정확한 분류 및 확인을 위한 프로그램을 개발하였다. 이를 위해 SEM/EDX를 이용하여 기준시료를 분석하여 백석면, 청석면, 갈석면, 투각섬석, 양기석, 직섬석 등의 6종류의 석면과 유리섬유, 암면 등의 2종류의 비석면 섬유에 대하여 오염원 분류표(source profile)를 개발하고, 본 자료를 기지의 정보로 전문가시스템(expert system)을 활용한 프로그램을 개발하는 데 활용하였다. 본 연구에서는 마이크로소프트사에서 개발한 VBA(visual basic for application)를 이용하여 석면 및 비석면 섬유를 확인하고 그 종류를 분별하는 프로그램을 개발하였다. 최종적으로 SEM/EDX를 이용하여 고형시료 및 일반주택, 유아기관, 지하상가 등의 실내 환경에서 측정된 시료를 개발한 프로그램의 입력 자료로 사용하여 고형시료 및 실내 환경에서의 석면 및 비석면 섬유에 대한 분류 및 농도를 정량적으로 확인하였다.

2. 연구 방법

2.1 시료채취 및 분석

석면과 비석면 섬유입자의 분석을 위해 기준시료(reference sample)인 고형시료와 공기 중 시료를 채취하였다. 기준시료는 표준시료(standard sample)의 의미로 석면타일, 석면판, 석면 가스켓 등을 후드 내에서 분쇄하여 알루미늄 재질의 스텝(stub) 상에서 시료를 채취하였다. 한편, 본 연구에서 개발된 분석프로그램을 확인하기 위하여 일반 실내 공기 중에서 시료를 채취하였다. 시료채취 장소는 생활환경으로 다세대 주택과 유아기관 두 곳을 선정하였으며, 지하공간으로는 지하상가 한 곳을 선정하였다.

시료채취는 여과지의 채취면을 지면에 수직이 되도록 위치시킨 후 바닥 면으로부터 1.2~1.5 m 높이에서 시료채취기(224-PCXR8, SKC Inc., USA)를 이용하여 약 3~5 L/min의 유량으로 4시간 이상 채취하였다. 시료채취기는 디지털 유량보정계(Drycal, BIOSINT. Co.)를 이용하여 측정 전후의 유량을 보정하였다. 전자주사현미경을 이용한 입자별 분석은 전량분석과는 달리 입자의 특성을 여지와 함께 분석해야 하기 때문에, 분진의 화학적 조성과 다른 여지 위에 채취하는 것이 중요하다. 본 실험에서는 바탕이 양호하며, SEM 분석에 용이한 polycarbonate membrane filter (직경 25 mm, pore size 0.8 μm)가 장착된 preloaded cassette (SKC 225-1604)를 사용하였다. 채취된 시료는 네시케이터에서 2~4일간 충분히 방냉한 후 칭량하였다. 시료준비는 Conner *et al.* (2001)의 개별입자의 SEM/EDX 분석시료의 준비방법과 다중이용시설의 실내공기질 공정시험방법(환경부, 2004)을 참고하였다.

채취한 시료를 SEM/EDX로 분석할 때, 절연체 입자에 전하가 쌓이면 상이 찌그러지거나, 입자가 전자빔에 의해 타버리기 때문에 이를 방지하기 위하여 시료를 전도체인 물질로 코팅할 필요가 있다(김수환과 김동술, 1999). 시료의 코팅방법으로는 전자주사현미경 시료의 코팅방법으로는 플라즈마 스퍼터링(plasma sputtering) 또는 스퍼터 코팅법(sputter coating procedure)을 채택하였다. 여지는 1/2~1/4로 절취하여 Au으로 20~40 nm 두께로 코팅한 후 알루미늄 스텝에 탄소테이프를 이용하여 고정시켜 SEM/EDX 분석을 실시하였다(최영아 등, 2007). 금속코팅은 조사되는 부분 외에서 방출되는 X-선 잡음을 제거시키므로 분석의 정확도를 높여준다(김수환과 김동술, 1999; 장여진과 김동술, 1997).

일반적으로 석면의 종류와 특성을 분석하는 데 위상차현미경법(phase contrast microscopy, PCM)과 편광현미경법(polarized light microscopy, PLM)등을 사용한다. 그러나 이러한 방법은 석면섬유의 농도를 과대평가할 수 있으며, 석면과 비석면을 분리 확인하는데 어려움이 있다. 그러나 EDX(energy dispersive X-ray spectrometer)를 부착한 전자주사현미경법(scanning electron microscopy, SEM)은 섬유 물리적 특성뿐만 아니라 원소성분을 분석하여 섬유의 종류를 식별하는 데 용이하다(Beaman and File, 1976).

본 연구에서 시료분석에 사용된 SEM은 영국 Leica사의 Cambridge StereoScan 440, EDX는 영국 Oxford사의 ISIS Link 400을 사용하였다. SEM은 beam current 400 μA , 가속전압 20 kV, working distance 24 mm의 작동조건으로 작동하였다.

2.2 오염원 분류표 개발과 전문가 시스템의 적용

본 연구에서는 석면과 비석면 섬유 오염원 분류표 및 전문가시스템 개발을 위하여 다음과 같은 단계로 개발하였다. 먼저, SEM/EDX에서 영상파일을 통한 물리적 정보 및 x-선 분석에 의한 화학적 정보를 얻었다. 물리적 변수는 길이(length), 폭(width), 종횡비(ratio, L/W), 모양 등 4가지이며, 측정된 화학적 변수는 Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu 등 10가지 원소이다. 또한 NIOSH 7402 방법(NIOSH, 1994)을 참고하여 석면 및 비석면 섬유를 결정하는 주요 원소들과 Si의 비 등 5가지 비율을 고려하였다(최영아 등, 2007). 위와 같은 자료를 참고하여 백석면, 청석면, 갈석면, 투각섬석, 직섬석, 양기석 등의 석면섬유와 암면, 유리섬유 등의 비석면 섬유 등의 8가지 섬유상물질에 대한 오염원 분류표를 작성하였다.

작성된 오염원 분류표자료는 기지의 정보로 전문가시스템(expert system)을 개발하는 데 활용되었다. 전문가시스템은 인공지능의 응용분야 중 하나로서, 비정형화된 문제 영역에서 컴퓨터에 의해 자동적으로 문제를 해결하는 방법을 제시해 주는 소프트웨어 시스템이다. 주요 구성은 지식베이스(knowledge base) 모듈, 추론엔진(interface engine) 모듈, 지식획득(knowledge acquisition) 모듈, 설명(explanation) 모듈, 사용자 인터페이스(user interface) 모듈로 구성된다(김화수 등, 1995). 전문가 시스템은 LISP, Prolog, Smalltalk 등과 같은 인공지능 언어를 사용하거나, C 또는 FORTRAN과 같은 기존의 프로그래밍언어를 사용하여 개발할 수 있다. 최근에 프로그래밍으로 널리 이용되는 Visual C++, Java, Visual Basic 등은 메뉴나 다이얼로그 박스 같은 다양한 도구(tool)들이 함께 제공되어 복잡한 윈도우 프로그래밍 과정을 하나의 통합 환경 안에서 처리해 줌으로써 시간을 절약시킬 뿐 아니라 통합처리가 매우 쉬운 장점이 있다(최영아, 2007).

본 연구에서는 마이크로소프트사에서 개발한 VBA

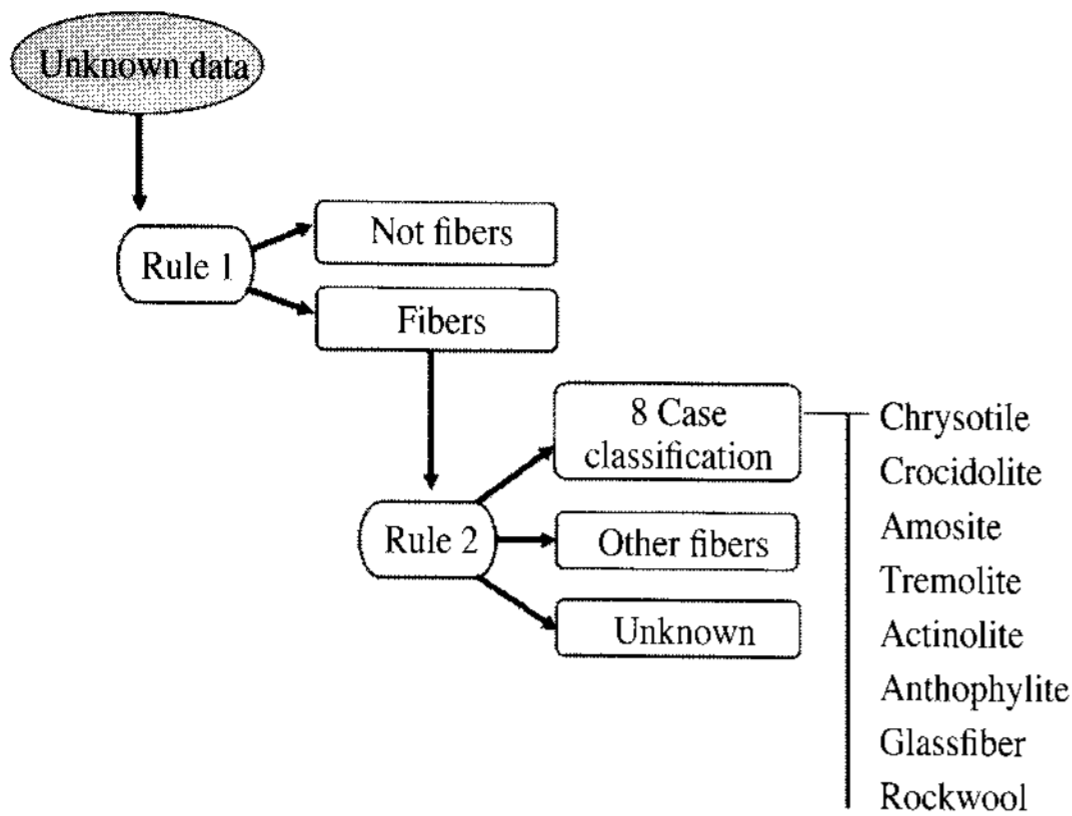


Fig. 1. A flowchart of an expert system for classifying asbestos and non-asbestos fibers.

(visual basic for application)를 이용하여 석면 및 비석면 섬유를 확인하고 그 종류를 분별하는 프로그램을 개발하였다. 두 가지 규칙에 입각하여 과정을 나누었는데, 규칙 1 (rule 1)은 오염원 분류표(source profile)에서 작성한 길이, 폭, 종횡비 등 3가지 변수에 대한 최대, 최소값의 범위로 설정하였다. 일단 규칙 1을 만족하면 규칙 2 (rule 2)에 의거하여 분류를 시작하는데, 규칙 2는 오염원 분류표에서 작성한 8종의 섬유상물질의 Si와 각 5종의 성분비인 Na/Si, Mg/Si, Al/Si, Ca/Si, Fe/Si 비율에 대하여 최대, 최소값 범위로 설정하였다.

우선 미지의 SEM/EDX 자료를 프로그램의 입력자료로 사용하여 규칙 1에 의해 섬유상물질 여부를 확인하였다. 규칙 1을 만족하면 규칙 2에 의해 6종의 석면섬유와 2종의 비석면 섬유로 분류된다. 이때 확인된 섬유상 물질 중 석면과 비석면의 주요 성분들을 포함하지 않은 섬유는 기타섬유로 분류되며, 주요 성분들이 포함된다. 오염원 분류표 범위에 속하지 않은 섬유들은 최종 미확인(unknown asbestos/non-asbestos) 섬유로 처리된다. 그림 1은 전문가시스템 상에서 석면 및 비석면의 분류과정을 도식한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 석면 및 비석면 섬유의 특성

석면의 기준시료 분석을 통해 백석면, 청석면, 갈석

Table 1. Statistics of fiber length, width, and its aspect ratio of each fiber type for developing source profiles.

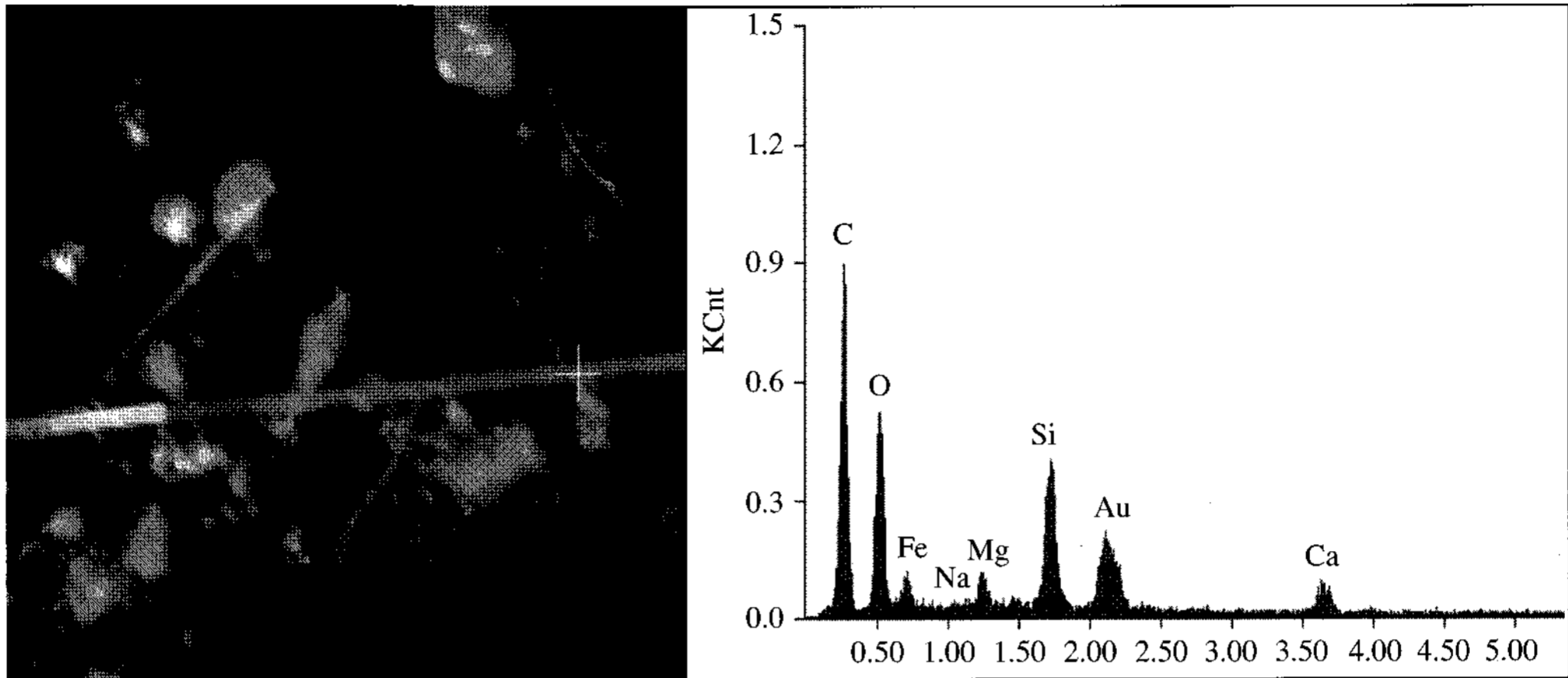
Types	Number of fibers	Length (μm)	Width (μm)	Aspect ratio	
				Mean	Range
Chrysotile	53	88.4	1.4	72.6	15.7~346.7
Crocidolite	33	38.4	1.5	34.5	12.1~125.4
Amosite	35	189.7	2.5	49.7	7.6~143.5
Tremolite	81	98.2	2.5	43.2	7.2~369.7
Anthophyllite	16	85.8	3.8	26.3	7.2~80.3
Glassfiber	31	75.2	4.4	20.1	5.3~73.1
Rockwool	19	81.6	2.4	37.6	9.3~108.0

면, 직섬석, 투각섬석 등의 5종류의 석면섬유와 유리섬유와 암면 등 2종류의 비석면 섬유에 대하여 물리화학적 정보를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 6가지의 석면 섬유와 2가지 비석면 섬유를 포함한 380개의 입자를 확보하여 오염원 분류표를 작성하였다. 각 석면섬유와 비석면 섬유상 물질을 판단할 수 있는 물리적 변수인 길이, 폭, 종횡비에 대한 평균 및 최대·최소자료를 표 1에 나타내었다. 물리적 정보가 부재한 양기석은 제외하였다. 평균길이에 있어서는 갈석면이 189.7 μm로 가장 길었으며, 투각섬석, 백석면 순으로 나타났다. 오염원 분류표의 중요한 변수 중의 하나인 섬유상물질의 평균종횡비는 백석면이 71.9로 직섬석이나 청석면에 비해 매우 큰 값을 보였다.

섬유상 물질의 종횡비 분포빈도 및 누적분포도를 분석한 결과 백석면의 경우 절반 이상에 해당되는 77.4%가 종횡비 30 이상의 값을 보였으며, 유리섬유의 경우 83.9%가 종횡비 5~30 사이의 값을 보였다. 이러한 결과는 김수환과 김동술(1999)에 의해 보고된 논문의 결과인 백석면의 51.5%가 종횡비 50 이상의 값을, 유리섬유의 70%가 5~20 사이의 값을 보인 것과 유사하다. 이러한 결과는 절단시 석면은 직경이 쪼개지는 것과 달리, 길이만 잘게 부서지면서 직경은 변하지 않는 비석면 형태의 인공 무기질 섬유의 특성과 관련이 있다(유성환, 1993). 각각의 석면섬유와 비석면 섬유에 대한 종횡비 분포빈도 및 누적분포도에 대한 결과자료는 최영아 등(2007)의 논문을 참조할 수 있다.

그림 2는 SEM/EDX에서 확인된 청석면과 직섬석의 SEM 이미지와 EDX 스펙트럼이다. 청석면은 주성

(a) Crocidolite



(b) Anthophyllite

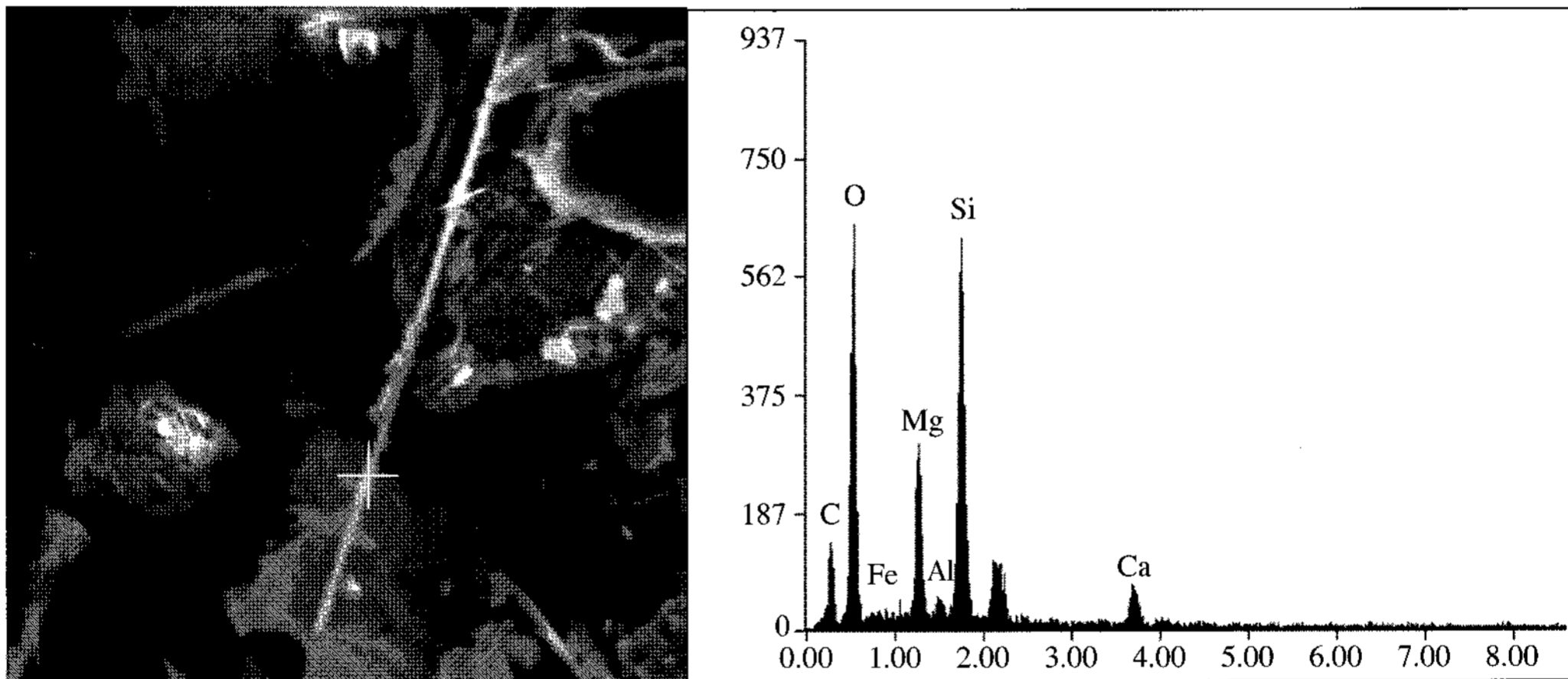


Fig. 2. Scanning electron images and X-ray spectra of asbestos: (a) crocidolite, and (b) anthophyllite.

분이 Si, Fe, Mg이었으며 Na이 소량 포함되어 있는 것이 특징이었다. 직섬석은 주성분이 Si와 Mg이며, Ca와 Fe를 소량 포함하고 있었다. 백섬석은 가늘고 긴 섬유형태로 유연한 실타래와 같은 모양을 하고 있으며, 화학조성에 있어서 Mg과 Si의 비율이 높았다. 갈섬석은 백섬석과 같이 가늘고 길며 중횡비가 큰 것으로 나타났으나, 끝이 갈라지거나 여러 섬유가 뭉쳐 있으며 주성분은 Si, Mg, Fe이었다. 투각섬석은 길이가 다양하게 존재하였고, 주성분은 Si, Mg, Ca이었으며, Fe도 소량 함유하는 섬유들이 있었다. 유리섬석의 경우 길이는 짧고 폭이 굵은 섬유 형태를 보

였다. 유리섬석의 주성분은 Si가 대부분이며, Na, Ca 등이 다량 포함되었다. 암면은 Si, Ca, Mg, Fe 등이 주성분을 이루고 Mn도 다소 포함하는 섬유들이 있었다. 오염원 분류표의 주요 특성치인 원소간 비율을 5가지 주요 원소(Na, Mg, Al, Ca, Fe)에 대한 Si와의 비율로 나타내었다. 각 섬유의 성분비의 평균 비율을 살펴보면, Na/Si는 유리면이 0.8로 가장 높았다. Al/Si는 청섬석이 0.4, 각섬석이 0.2, 백섬석이 0.2로 나타났고, Ca/Si는 유리면이 0.7로 가장 높게 분석되었다. 각각의 석면섬유와 비석면 섬유에 대한 성분 조성비 및 Si와의 비율에 대한 자세한 결과 역시 최영

Table 2. Classification results for various indoor air samples by the developed expert system. (unit : ea)

Sample	No. of data	Asbestos/Non-asbestos								Other fibers	Un-known
		Chrysotile	Amosite	Crocidolite	Tremolite	Anthophyllite	Actinolite	Glass fiber	Rock wool		
Ceiling materials	30	5	4	1	5	0	0	4	0	0	11
Residential area	13	1	2	0	0	0	0	0	0	2	8
Preschool classroom	20	1	5	0	0	0	0	2	0	3	9
Underground store	13	1	1	0	0	0	0	0	0	7	4

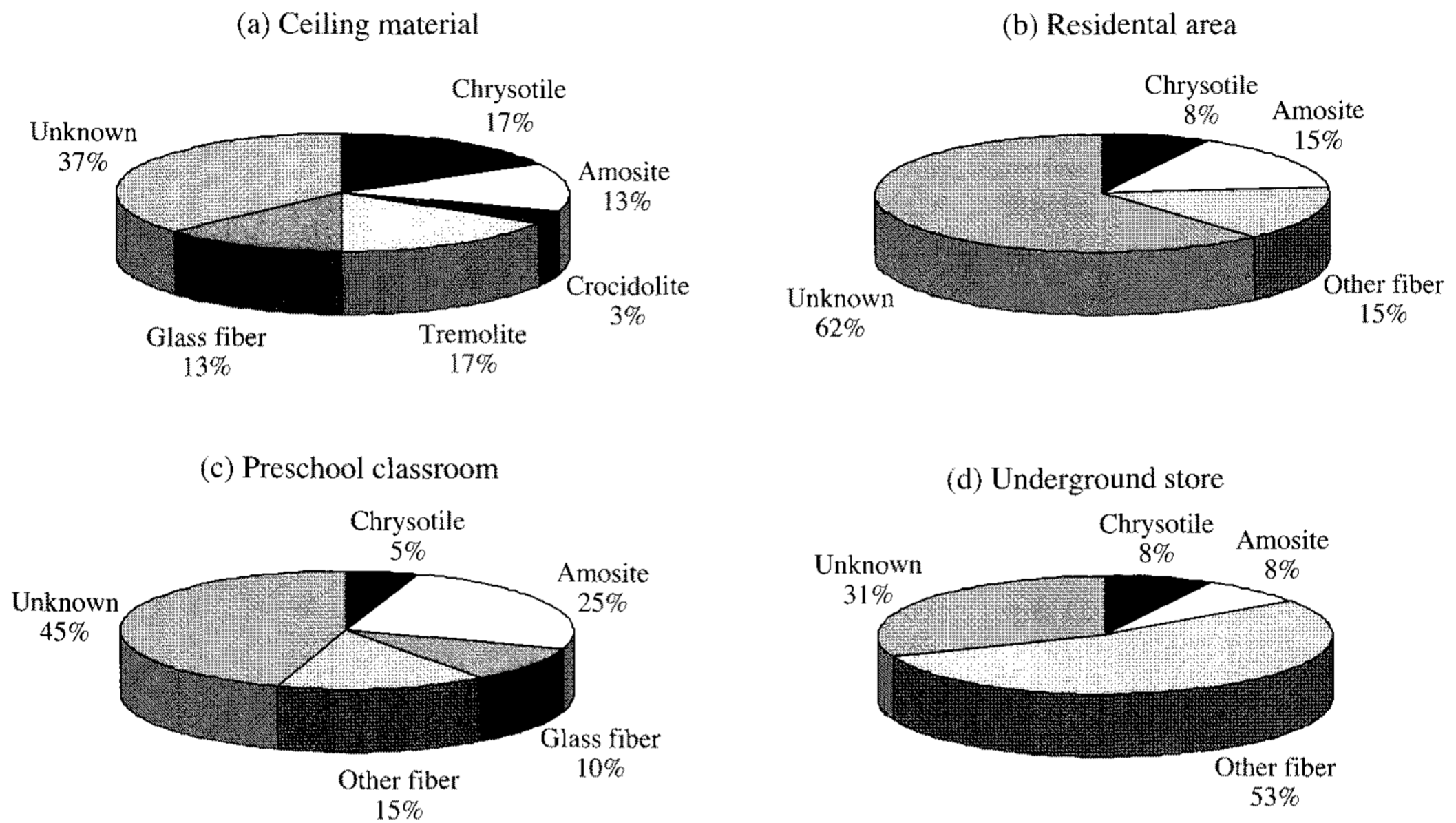


Fig. 3. Number fraction of asbestos and non-asbestos fibers collected in (a) ceiling material and indoor air environments, (b) residential area, (c) preschool classroom, and (d) underground store.

아 등(2007)의 논문을 참조할 수 있다.

3.2 전문가 시스템을 이용한

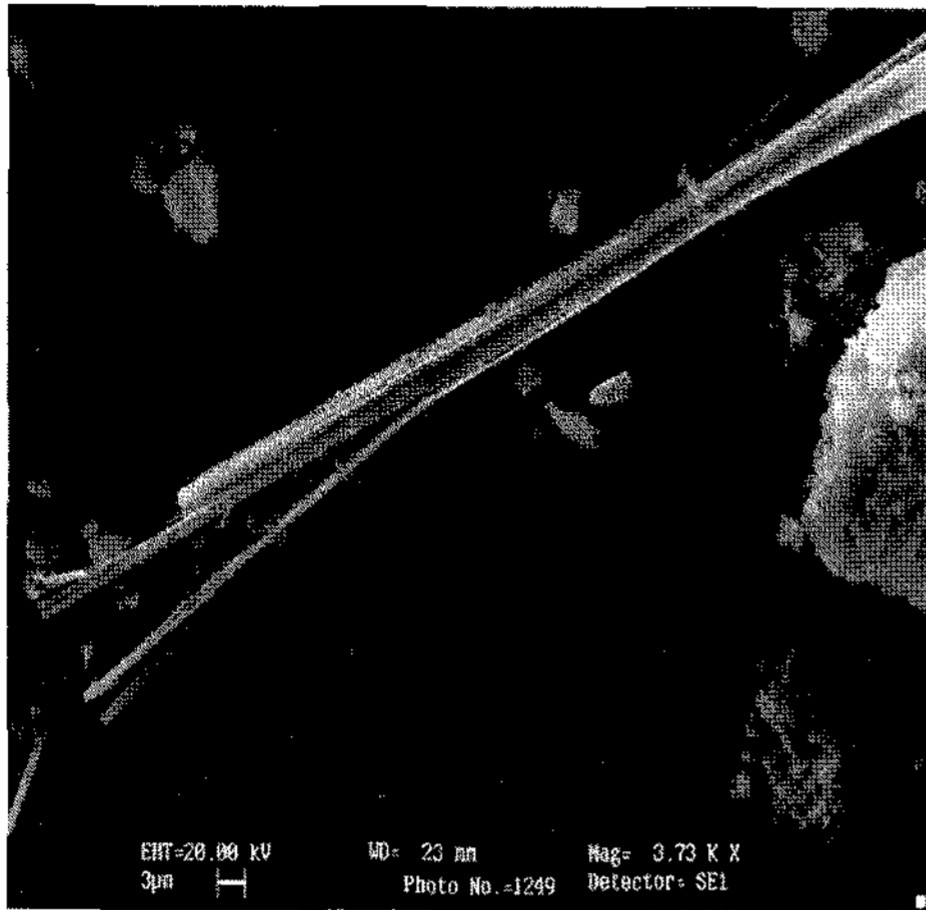
일반 실내환경에서의 오염도 결과

미지의 고형시료인 천장재와 다세대 주택, 지하상가, 어린이집 등 3곳의 실내에서 채취한 시료의 석면 오염도 조사를 위하여 본 연구에서 개발된 석면 및 비석면 섬유 오염원 분류표와 전문가시스템을 적용하였다. 각 시료는 기준시료와 동일한 방법으로 채취한 후 SEM/EDX 분석을 시도하였다. 각 시료에서 분석한 물리·화학적 정보는 개발된 전문가시스템 프로그램의 입력자료로 사용하여 석면 및 비석면의 종류를 분류 및 확인하고 각각의 오염도를 조사하였

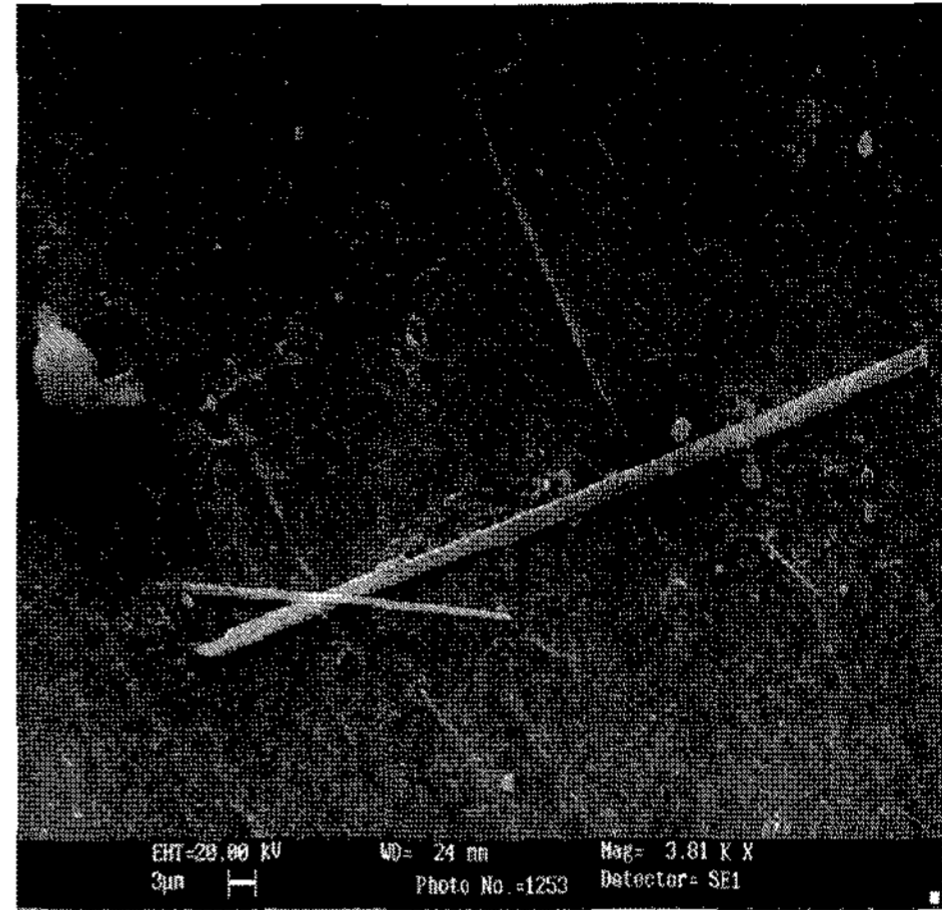
다. 각 시료를 분석한 결과는 표 2와 같다. 고형시료에서는 총 30개의 섬유상 입자상물질이 확인되었으며, 5개의 백석면, 4개의 갈석면, 1개의 청석면, 5개의 투각섬석 등 15개의 석면입자와 4개의 유리섬유입자가 분류되었다. 다세대 주택시료의 확인된 13개의 입자상물질 중 1개의 백석면, 2개의 갈석면으로 분류되었다. 지하상가는 1개의 백석면, 5개의 갈석면, 2개의 유리섬유 등으로 분류되었다. 또한 어린이집은 백석면과 갈석면이 각각 1개씩 분류되었다. 모든 환경시료에서 청석면이 확인되지 않았으며, 직섬석과 양기석도 천장재와 환경시료 모두에서 검출되지 않았다.

각 고형시료와 실내환경 시료에서 확인된 석면섬유와 비석면 섬유상 물질의 구성비율은 그림 3에 나

(a) Amosite



(b) Tremolite



(c) Glass fiber



(d) Glass fiber

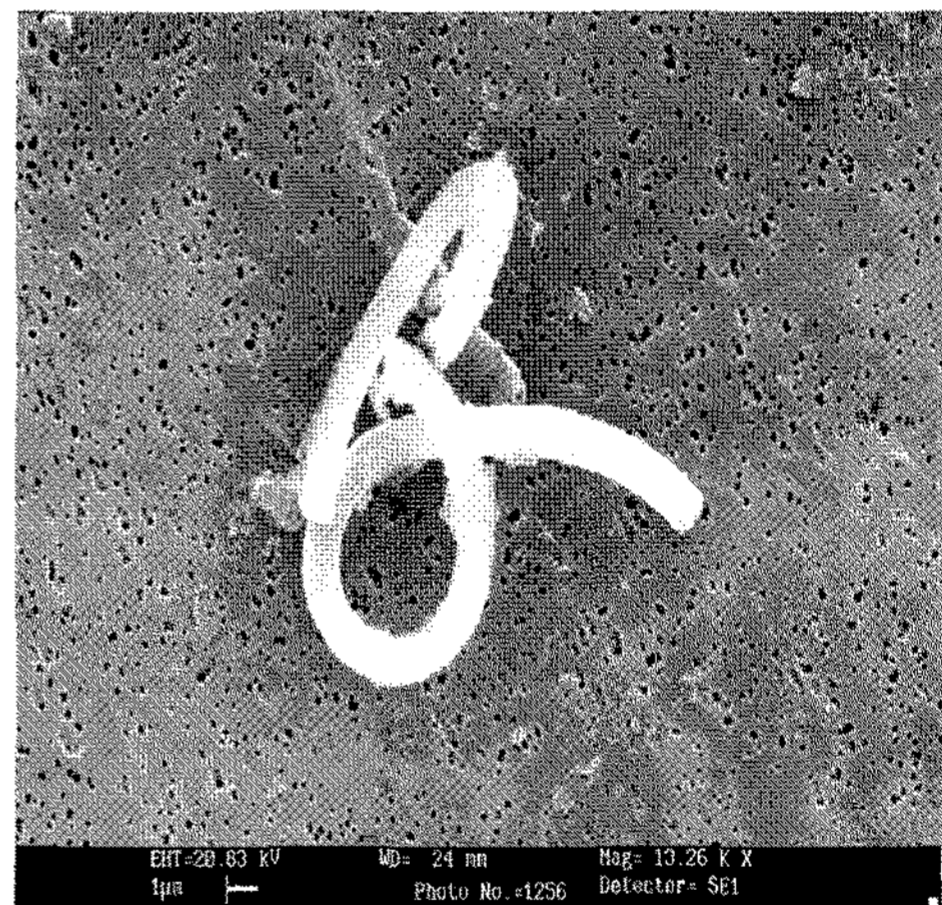


Fig. 4. Images for ceiling materials.

타내었다. 4종의 미지 시료 중 확인된 전체 76개의 섬유입자 중 백석면 9.3%, 갈석면 15.4%, 청석면 0.8%, 투각섬석 4.2%로 석면섬유는 29.6%를 나타냈다. 암면은 확인되지 않았으며 유리섬유만이 5.8% 확인되었다. 기타 섬유는 21.1%를 차지하였고, 석면과 비석면, 기타섬유로 분류되지 않은 섬유들은 43.5%를 차지하였다. 기타섬유로 확인된 섬유상 물질은 석면과 비석면의 주요 성분들을 포함하지 않은 섬유로서 유기섬유나 알루미늄 규산염섬유, 금속섬유 등으로 사료되었다. 그중 일부 섬유는 석면 및 비석면과

원소성분이 유사하였으나 그 성분비율이 이미 파악된 석면섬유와의 조성비가 일치하지 않아 미확인 섬유로 분류하였다. 추후 오염원 분류표가 추가·확대되었을 때 미확인 섬유의 범위가 크게 축소될 것으로 판단된다.

그림 4는 천장재에서 채취된 시료를 분석해서 얻은 석면과 유리섬유의 SEM의 영상으로서 갈석면, 투각섬석, 유리섬유로 확인되었다. 갈석면과 투각섬석은 오염원 분류표에서와 유사한 모양을 보였으나, 유리섬유의 경우 비록 성분비는 유사하였으나 d)와

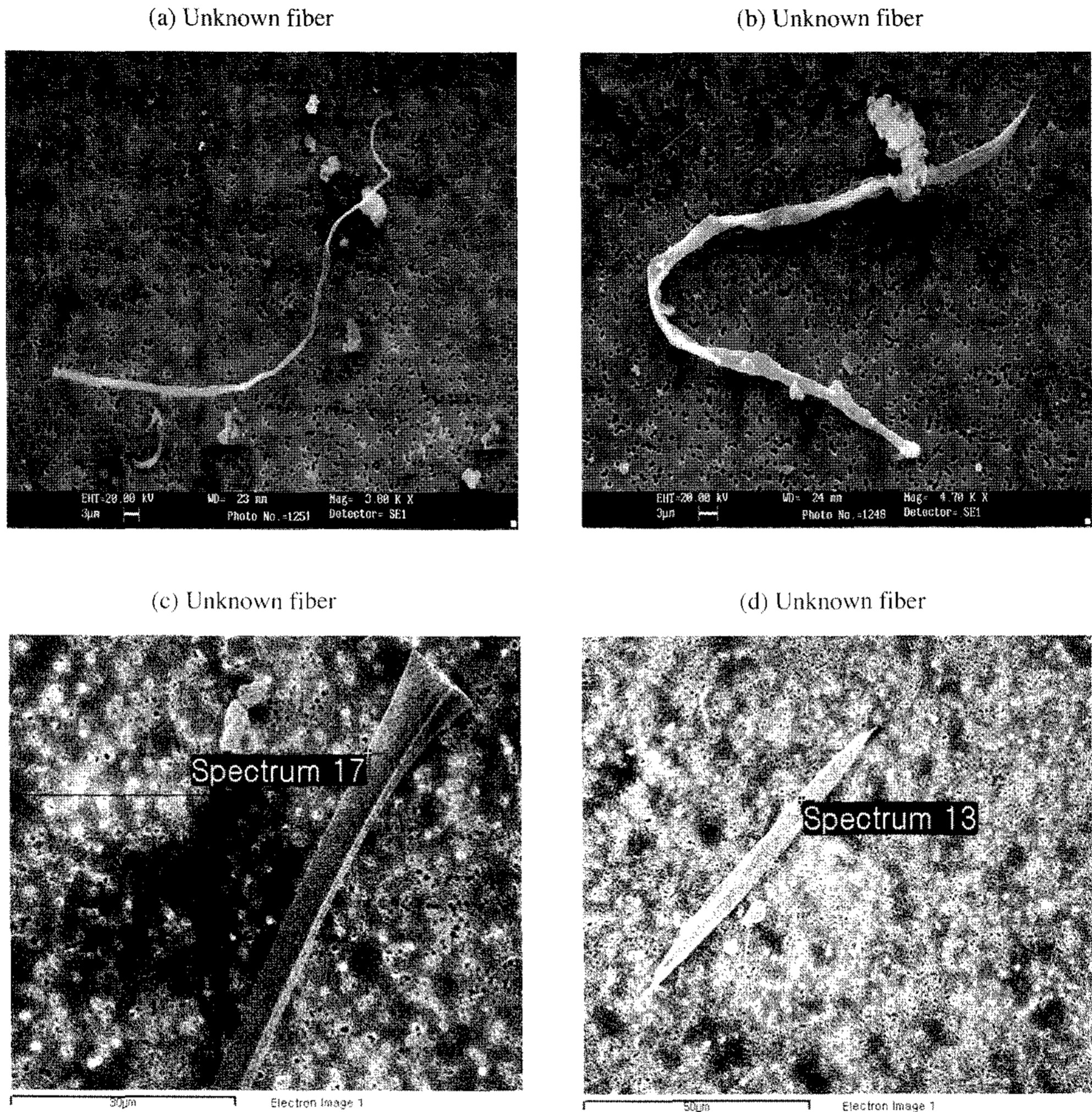


Fig. 5. Unknown fibers for preschool classroom.

같은 리본형의 모양도 관측되었다. 어린이집에서 채취된 시료 중에 석면 또는 비석면으로 분류되지 않은 미확인 섬유들의 영상을 그림 5에 제시하였다. (a) 섬유의 경우 C 84.9%, O 15.1%를 포함하고 있었고, (b) 섬유는 Si 45.5%, Ca 25.0%, Fe 29.5%, (c) 섬유는 다른 섬유에서는 분석되지 않았던 N이 78.6%를 차지하였다. (d) 섬유의 경우 C 84.2%, O 14.95%, S 0.87%를 포함하고 있었다. (a)와 (b)의 경우 비록 백석면과 유사한 모양을 보였으나, 석면의 주요 원소들을 함유하지 않거나 화학조성비에서 커다란 차이를 보였다.

일반 실내환경에서 채취한 시료의 섬유 및 석면섬유의 개수농도 결과를 그림 6에 나타내었다. 시료 각각의 섬유상 물질의 농도는 일반주택 0.0054 f/cc, 유아기관 0.0104 f/cc, 지하상가 0.0144 f/cc로 일반주택에서 가장 낮은 수치를 보였다. 석면섬유 농도는 일반주택 0.0003 f/cc, 유아기관 0.0006 f/cc 지하상가 0.0006 f/cc로 비교적 낮은 농도를 보였다. 모든 측정 지점에서 석면의 농도는 우리나라 실내 권고치인 0.01 f/cc를 밑도는 값이었으나, 만약 SEM/EDX가 아닌 PCM으로 분석되어 섬유상 물질 대부분을 석면

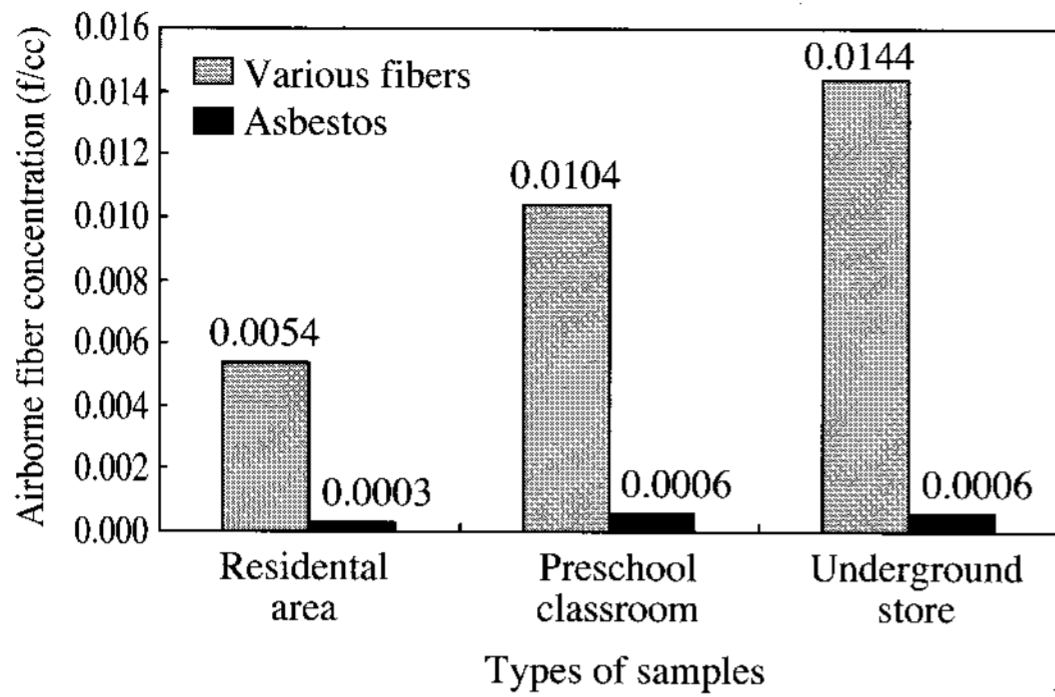


Fig. 6. Comparison of fibers and asbestos number concentration in various sampling sites.

으로 간주되었다면, 기준치를 상회하는 상반된 결과를 보였을 것으로 사료된다. 그러나 본 연구결과는 기존방법과 비교하지 못한 결과로 추후 본 연구방법과 기존방법에 대한 비교분석을 통한 추가 연구를 수행하고자 한다.

주거환경인 일반주택의 전체 섬유상 물질과 석면의 농도는 타 실내공간에서 보다 낮았다. 반면 지하공간인 지하상가의 섬유상 농도는 가장 높았으나 석면의 비율은 4.2%로 낮은 비율을 보였다. 그럼에도 불구하고 지하상가와 같은 지하공간은 유동인구가 많고 밀폐되어 있는 공간적 특성 때문에 지속적인 관리가 필요하다. 또한 보육시설의 경우, 섬유상물질의 농도는 비교적 낮았으나 석면의 비율이 비석면대비 5.8%로 상대적으로 높기 때문에, 또한 성인보다 호흡량이 많은 유아가 노출대상이 되기 때문에 집중적인 관리와 대책이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

현재 석면의 종류와 특성을 분석하는 데 위상차현미경법을 주시험법으로 채택하고 판독이 불가능한 경우 전자주사현미경으로 결정하고 있으나(환경부, 2004), 위상차현미경은 석면과 비석면을 구분하지 못하고, 직경이 0.25 μm 이하의 섬유는 관찰되지 않기 때문에 이러한 방법은 석면섬유의 농도를 과대평가할 수 있으며, 석면과 비석면을 분리 확인하는 데 어려움이 있다. 따라서 분해능이 0.01 μm 정도인 섬유까지 관찰할 수 있으며, 섬유의 물리적 특성뿐만 아

니라 원소성분을 분석하여 섬유의 종류를 식별하는데 용이한 SEM/EDX 장치의 이용이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 실내공기 중 대표적인 오염물질로 알려져 있으나 분류 및 확인이 어려운 석면 섬유 및 비석면 섬유의 신속한 분류 및 정량적 평가를 위하여 SEM/EDX를 이용하는 방법을 제시하였다. 먼저 전문가시스템의 기반기술을 확보하기 위해 기준 석면시료에 대한 오염원 분류표를 개발하였다. 석면 및 비석면 섬유상 물질의 모양, 길이, 폭 등의 물리적 정보와 화학조성비 등의 화학적 정보를 활용하였다. 본 연구에서는 기준시료 및 고형시료의 분석을 통해 백석면, 청석면, 갈석면, 투각섬석, 직섬석, 양기석 등의 6가지 석면과 유리섬유, 암면 등 2가지 비석면 섬유에 대해 총 380여 개의 섬유상 시료의 오염원 분류표를 개발하였으며, 본 자료를 기지의 정보로 전문가시스템을 활용한 프로그램을 개발하는 데 활용하였다. 전문가 시스템은 오염원 분류표에 의한 두 가지 규칙에 입각하여 과정을 나누었으며, 마이크로소프트사에서 개발한 VBA를 이용하여 석면 및 비석면 섬유를 확인하고 그 종류를 분별하는 프로그램을 개발하였다.

마지막으로 석면과 비석면 섬유의 오염원 분류표 자료와 개발된 프로그램을 활용하여 건축자재인 천장재 중의 섬유상 물질을 분류하였으며, 일반 주택, 어린이집, 지하상가의 실내공기 시료를 분석 및 분류하였다. 천장재를 분석한 결과 확인된 섬유 중 백석면 16.7%, 갈석면 13.3%, 청석면 3.3%, 투각섬석 16.7%로 분류되었다. 4종의 미지시료 중 확인된 전체 76개의 섬유입자 중 백석면 9.3%, 갈석면 15.4%, 청석면 0.8%, 투각섬석 4.2%로 석면섬유는 29.6%를 나타냈다. 암면은 확인되지 않았으며 유리섬유만이 5.8% 확인되었다. 기타 섬유는 21.1%를 차지하였고, 석면과 비석면, 기타섬유로 분류되지 않은 섬유들은 43.5%를 차지하였다. 추후 오염원 분류표가 추가·확대되었을 때 미확인 섬유의 범위가 크게 축소될 것으로 판단된다. 한편, 본 연구대상 실내공기 시료에서는 청석면, 투각섬석, 직섬석, 양기석은 발견되지 않았으며, 모두 우리나라 실내공기 권고치인 0.01 f/cc를 초과하지 않았다. 본 연구결과가 석면 및 비석면 섬유의 분류 및 정량적인 평가를 위한 유용한 도구로 활용되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2007년 서울시 산학협력사업지원과 제(과제번호 10593)-미래 도시의 웰빙을 위한 실내 공기질 관리기술개발-의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김강윤, 최성필, 박남규, 최호춘, 이승민, 성민기(2005) 모 어 린이집에서 발생하는 섬유상 물질의 석면함유 여 부와 노출수준 조사, 한국대기환경학회 2005 춘계 학술대회 논문집, 57-59.
- 김수환, 김동술(1999) 실내공기 중 석면 섬유 분류 및 확 인을 위한 전문가시스템의 개발, 한국대기환경학 회지, 15(6), 703-712.
- 김화수, 조용범, 최종욱(1995) 전문가시스템, 집문당.
- 노동부(2002) 화학물질 및 물리적인자의 노출기준, 노동부 고시 제2002-8호.
- 노동부(2007) 석면함유제품의 제조, 수입, 양도, 제공 또는 사용 금지에 관한 고시, 노동부 고시 제2007-26 호.
- 백남원, 이영환(1991) 석면취급 사업장 근로자의 석면폭로 특성에 대한 연구, 한국산업위생학회지, 1(2), 144-153.
- 변상훈, 주종순, 손종렬(2003) 부평역에서의 공기중 석면 노 출 실태 및 인식도 조사, 대한위생학회지, 18(1), 8-14.
- 유성환(1993) 건축재료에서 발생하는 석면입자의 특성 연 구, 한국대기보전학회지, 9(3), 191-199.
- 유성환, 김현욱(1996) 전자현미경을 이용한 건물내 비고형 표면소재의 석면 오염 및 기중 석면농도 특성조 사, 한국산업위생학회지, 6(2), 165-175.
- 유찬영(2002) 서울시 지하철 역사 내부 설비 공사에 따른 석면의 발생 실태, 연세대학교 보건대학원 석사 학위 논문.
- 임무혁, 이송권, 정인호(2004) 대구지역 내 일부 치과기공소 의 공기 중 석면농도, 한국산업위생학회지, 14(3), 264-269.
- 장여진, 김동술(1997) CCSEM을 이용한 대기 중 개별분진 의 분류에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 13(5), 345-353.
- 정현준, 백승화, 김종현(2002) 대전지역 지하상가에서의 석 면농도에 관한 연구, 한국관리학회지, 8(2), 207-215.
- 최영아(2007) 석면과 비석면 섬유의 오염원 분류표 및 분 류기법 개발, 경희대학교 석사논문.
- 최영아, 이태정, 김동술(2007) SEM/EDX를 이용한 석면 및 비석면의 오염원분류표 개발, 한국대기환경학회 지, 23(6), 718-726.
- 최충곤(2001) 건축물 해체 작업시 발생하는 석면의 노출 평가, 연세대학교 보건대학원 석사학위 논문.
- 하권철(2004) 경남지역 지하생활 공간 중 석면 및 라돈의 농도분포 특성, 한국산업위생학회지, 14(3), 319-324.
- 한정희, 김광진, 정용현, 이준연, 이용복, 정호근, 유일재(2001) 에너지 분석 X선 분석장치가 장착된 투과전자현 미경을 이용한 석면분석방법, 한국산업위생학회 지, 11(2), 102-110.
- 환경부(2004) 다중이용시설등의 실내공기질 관리법 시행규 칙 별표 3.
- 환경부(2004) 실내공기질 공정시험방법, 환경부 고시 제 2004-80호.
- Bhattacharya, K., E. Dopp, P. Kakkar, F.N. Jaffery, D. Schiffmann, M.C. Jaurand, I. Rahman, and Q. Rahman (2005) Biomarkers in risk assessment of asbestos exposure, Mutation Research, 579, 6-21.
- Beaman, D.R. and D.M. File (1976) Quantitative determina tion of asbestos fiber concentrations, Anal. Chem., 48, 101.
- Caneve, L., F. Colao, F. Fabbri, R. Fantoni, V. Spizzichion, and J. Striber (2005) Laser-induced breakdown spec troscopy analysis of asbestos, Spectrochimica Acta Part B, 60, 1115-1120.
- Chesson, J., J. Hatfield, B. Schultz, E. Dutrow, and J. Blake (1990) Airborne asbestos in public buildings, Envi ronmental Research, 51, 100-107.
- Conner, T., G. Norris, M. Landis, and R. Williams (2001) Individual particle analysis of indoor, outdoor, and community samples from the 1998 Baltimore parti culate matter study, Atmospheric Environment, 35, 3935-3946.
- Dusinska, M., A. Collins, A. Kazimirirova, M. Barancokova, V. Harrington, K. Volovova, M. Staruchova, A. Horska, L. Wsolova, A. Kocan, J. Petrik, M. Machata, B. Ratcliffe, and S. Kyrtopoulos (2004) Geno toxic effects of asbestos in humans, Mutation Research, 553, 91-102.
- Frumkin, H. and J. Berlin (1988) Asbestos exposure and gas trointestinal malignancy review and meta-analysis, Am J. Ind. Med., 14, 79-95.
- Guillemin, M.P., P. Madelaine, G. Litzistorf, P. Buffat, and F. Iselin (1989) Asbestos in buildings, Aerosol Sci-

- ence and Technology, 11, 221-243.
- Helsen, J.A., P. Vandeveld, A. Kuczumow, and A. Deruyt-
tere (1989) Surface characteristic of asbestos fibers
released from asbestos-cement products, *Am. Ind.
Hyg. Assoc. J.*, 50(12), 655-663.
- Jaffrey, S.A.M.T. (1990) Environmental asbestos fibres release
from brake and clutch linings of vehicular traffic,
British Occupational Hygiene Society, 34 (4), 529-
534.
- Liukonen, L.R. and F.W. Weir (2005) Asbestos exposure from
gaskets during disassembly of a medium duty die-
sel engine, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 41, 113-121.
- Maclure, M. (1987) Asbestos and renal adenocarcinoma. A
case-control study, *Environ. Res.*, 42, 353-361.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)
(1994) *Manual of Analytical Method*, 4th Ed.,
Asbestos and Other Fibers by TEM, No. 7402.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)
(1972) *Criteria for a Recommended Standard: Occu-
pational Exposure to Asbestos*, No. 72-10267.
- Spurny, R.R. (1989) On the release of asbestos fibers from
weathered and corroded asbestos cement products,
Environmental Research, 48(1), 100-116.
- Wylie, A.G., K.F. Bailey, J.W. Kelse, and R.J. Lee (1993) The
importance of width in asbestos fiber carcinogeni-
city and its implications for public policy, *Ameri-
can Industrial Hygiene Association*, 54, 239-250.