

실내공기 중 석면 섬유 분류 및 확인을 위한 전문가 시스템의 개발

Development of An Expert System for Classifying and Identifying Asbestos Fibers in the Indoor Air

김 수 환 · 김 동 술

경희대학교 환경학과 및 환경연구소

(1999년 7월 20일 접수, 1999년 11월 8일 채택)

Soo-Hwan Kim and Dong-Sool Kim

*Department of Environmental Science and Institute of Environmental Studies,
Kyung Hee University*

(Received 20 July 1999; accepted 8 November 1999)

Abstract

In order to determine the number concentration of asbestos, it is initially necessary to develop a method to identify the type of asbestos. Thus a SEM/EDX was used to obtain both physical and chemical information from known asbestos samples as reference samples. Based on these information, we could make a source profile matrix consisted of a glass fiber and 3 other types of asbestos such as chrysotile, crocidolite, and tremolite. After collinearity test was performed for these sources, we could successfully develop an expert system by C-language to separate and to identify various unknown types of fiber particles. The expert system was perfectly self-verified with original reference data. Then the program was extensively applied to survey indoor and outdoor environment such as a residential area, an elementary school, an underground store, and an auto junkyard. As a result for surveying, a total of 442 individual fibrous particles were well classified into 4 types of particle classes above mentioned; 5.4% of chrysotile, 4.1% of crocidolite, 3.6% of glass fiber, and 86.9% of unknown fibers in terms of number concentration. However, tremolite was not detected in the study sites. All the samples were satisfied with the recommendation level of 0.01 f/cc

Key words : Asbestos, expert system, SEM/EDX, individual fibrous particle, source profile

1. 서 론

석면(asbestos)은 자연적으로 발생하는 수화된 광물 규산염을 일컫는데, 화학적 조성은 주로 마그네

슘과 규소로 이루어지며 사문석(serpentine)계열과 각섬석(amphibole)계열로 크게 나눌 수 있다(Michaels and Chissick, 1979). 석면은 비파괴적인 물리 화학적 특성을 가진 비교적 저렴한 물질이기 때문에 널리 사용되어 왔다. 즉, 화학적 특성으로는 내산

성, 내열성을 가지고 있으며, 물리적으로는 내구력이 크고, 유연성과 지속성 및 우수한 미찰성능을 가지고 있다. 우리 나라는 주로 수입에 의존하고 있는데 수입량은 연간 7~9만톤 정도로 수입 석면은 대부분 백석면이며 80% 이상이 건축자재의 원료로 사용되고 있고 나머지가 석면 방직업과 자동차 부품 제조업에 이용되고 있다. 석면에 의한 위해성이 널리 알려짐에 따라, 세계각국은 석면 농도에 대한 기준치를 마련하게 되었고, 프랑스는 1997년 이후 석면 사용을 전면 금지시키는 등 각국이 사용 금지 내지는 석면에 대한 기준을 강화시켰으며 우리 나라도 1997년 청석면과 갈석면의 수입, 제조, 사용을 금지하고 있다(환경포럼, 1998). 그러나 우리 나라의 경우, 산업안전보건법에 의해 작업장에서 석면의 기준을 설정하고, 지하생활공간 공기질관리법으로 지하생활공간의 공기오염물질로 지정하고 있으나 지상공간은 관리대상에서 제외되는 등 체계적인 관리가 어려운 실정이다 또한 실내공간은 환경 기준 권고치(0.01 fiber/cc)만 설정되어 있을 뿐 통합된 실내공기기준이 설정되지 않고 있다(서울특별시 지하철공사, 1998) 그 동안 석면과 관련된 외국의 연구는 석면의 전량 시료(bulk sample)에 관한 연구(Webber *et al.*, 1997)를 비롯하여, 공공 건물에서 방출되는 대기 중 석면에 대한 연구(Chesson *et al.*, 1990; Guillemn *et al.*, 1989; Spurny, 1989) 등이 수행된 바 있으며, 최근에는 석면 유해성과 관련하여, 발암성에 영향을 미치는 석면 섬유직경의 중요성(Wylie *et al.*, 1993)과 인체에서의 석면과 체세포의 화학적 상호작용에 대한 연구(Seal *et al.*, 1997, 1996) 등 실태 조사 및 측정방법, 유해성 등에 초점을 맞추어 연구가 진행되고 있다. 이에 반해 국내의 연구는 산업보건기준에의 만족 여부를 조사하기 위해 주로 작업장 실내를 대상으로 연구되어 왔으며, 건물 실내 및 일반 대기환경에 대한 연구(유성환과 김현우, 1996; 김현우, 1995; 유영식과 김종규, 1989)가 진행된 바 있다. 이밖에 지하철역 구내에서의 석면 농도에 대한 연구(서울특별시 지하철공사, 1998; 이기라, 1996)와 건축재료에서 발생하는 석면 특성에 대한 연구(유성환, 1993) 등이 수행된 바 있다. 그러나 이제까지의 석면오염 연구는 유성환(1996, 1993), 이기라(1996) 등을 제외하고 석면 분석방법으로 위상차 현미경을 사용하였거나, 조사대상이 주

로 석면 취급 사업장을 중심으로 이루어져 왔다. 이에 반해 석면 제품의 최종 사용처인 지하역사와 지하상가 및 노후화된 건물을 중심으로 사무실과 초등학교 등에 대한 석면농도 실태조사가 미흡한 실정으로 이에 대한 연구 및 조사가 수행될 필요성이 있다(환경포럼, 1998).

현재까지 우리나라는 석면종을 세분화 하여 규제하고 있으나, 이들을 정확히 분리동정하고 있지 못하다. 또한 입자별 분석의 기본적인 제약적인 비용과 시간 문제를 해결하지 못하고 있다.

본 연구의 목적은 이들 문제점을 해결하는 차원에서 석면 섬유를 정확히 분류 및 확인할 수 있는 소프트웨어를 개발하는 것이다. 이를 위해 SEM/EDX를 이용하여 기준이 되는 석면섬유를 집중적으로 분석하고 석면의 종류별로 오염원 분류표(source profic)를 작성하고 전문가시스템을 개발하고자 한다. 전문가시스템은 일종의 하부관리 형태인 지법(supervised pattern recognition)의 한 분야이다. 즉, 알고 있는 사례를 통해 규칙을 만들고 이를 일반 사례에 적용하는 것이다. 본 연구는 개발된 전문가시스템을 최종 검증한 후, 이를 이용하여 일반 사무실, 초등학교, 폐차장 등에서 석면의 농도현황을 정량적으로 조사하고자 한다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 시료의 채집 및 전처리

석면과 비석면 섬유가 함유된 기준시료(reference sample)로서 석면 시멘트 타일과 석면 가스켓, 그리고 유리면 단열재 등을 후드 내에서 분쇄하고 알루미늄 재질의 stub 위에 분진을 채집하였다. 여기서 기준시료라 함은 분석화학에서 표준시료(standard sample)와 같은 의미이다. 즉, 개발된 전문가시스템에서 사용한 변수와 일치시키기 위해 표준시료를 가공하였으며 이를 차별화하여 기준시료라고 명칭하였다. 한편, 본 연구결과 개발된 분석 프로그램을 검증하고 확인하기 위해 일반 실내환경 중에서 분진을 채집하였다. 환경분석 실험을 위해 일단 생활환경과 작업환경으로 나누고, 생활환경에서의 시료 채집은 지상공간에서는 다세대 주택과 초등학교 두 곳을 선정하였으며 지하공간에서는 지하상가 한 곳을 선정하였다. 또한, 작업환경이며 실외 공간인 폐

Table 1. Sample ID and particle loadings for each sampling site.

ID	Site	Age (years)	Particle Loading (ng/cm ²)
r1 r2	Residence	25	0.04779 0.02767
e1 e2	Elementary School	21	0.03333 0.03584
u1 u2	Underground Store	28	0.07671 0.03207
a1 a2	Auto Junkyard	-	0.01258 0.01761

차장 한 곳을 선정하여 총 4곳에서 2회씩 총 8회 시료채집을 수행하였다. 표 1은 시료의 확인번호, 채취장소의 특징, 분진의 채취량을 설명한 것이다.

시료채집에 사용된 장치는 mini-vol portable sampler (Air Metrics Co., Model 4.1)로 유량은 5 L/min으로 8시간 동안 채취하였다. 여지는 cellulose membrane filter (diameter 47 mm, pore size 0.2 μm, Costar Co.)를 사용하였으며 채취 후 데시게이터에서 3~4일간 충분히 방냉한 후 칭량하였다. 한편, 채취된 여지를 SEM/EDX로 분석할 때, 절연체인 입자에 전하가 쌓이면 상이 찌그러지거나, 입자가 전자빔에 의해 타버려 재비산 되기 때문에 이를 방지하기 위해서 시료를 전도체인 물질로 코팅할 필요가 있다. 본 실험에서는 여지를 건조시킨 후 Au 코팅을 하였다. 기준시료 역시 같은 방법으로 코팅하였다. 이는 Au가 X-선을 흡수하는 성질이 있기 때문에, 전자빔이 조사되는 부분 외에서 발생하는 X-선의 잡음을 제거시켜 화학적 분석의 정확도를 높여주기 때문이다.

2. 2 시료의 분석과정

석면 분석방법에는 위상차 현미경법 (phase contrast microscopy, PCM), 편광현미경법 (polarized light microscopy, PLM), 주사전자현미경법 (scanning electron microscopy, SEM), 투과전자현미경법 (transmission electron microscopy, TEM), X-선 회절법 (x-ray diffraction, XRD) 등이 있다. 위상차 현미경은 석면과 비석면 섬유를 식별하기 어려워서 (이기라, 1996), 이 방법에 의한 석면 농도분석은 비산업장에 적용하기는 어렵고 그 존재가 확실하다고 가정되는 장소에서만 적용이 유효하다고 알려져 있다 (Howitt,

1993; Verma, 1991). 따라서 일반 대기환경에서는 해상도가 높고 섬유류 종류 식별이 용이한 SEM과 TEM이 바람직하다. 이러한 전자현미경 (EM)과 결합한 분석장치로 SAED (selective area electron diffraction)와 EDX (energy dispersive X-ray analyzer)가 주로 사용될 수 있는데, 섬유의 확인 및 규명에 가장 양호한 기법으로 알려져 있다. 특히 EDX는 섬유 입자의 원소 정보를 제공하기 때문에 매우 유용하다 (Schreier, 1989). 본 연구에서 시료분석에 사용된 SEM은 영국 Leica사의 Cambridge StereoScan 440으로, 작동조건은 가속전압 20 kV, working distance 25 mm이고, EDX는 영국 Oxpord사의 ISIS Link 400이다. 분석할 석면 섬유류의 대표성을 확보하기 위해 대기공정시험법의 원형 굴뚝에서의 측정점 선정법을 응용하여 (김혜진 외, 1999) 직경이 47 mm인 원형여지상에서 총 40개 지점을 선정하고 섬유상 입자를 분석하였다.

2. 3 오염원 분류표의 개발

본 연구에서 석면의 종류별 오염원 분류표를 개발하였으며 과정은 다음과 같다.

첫째, 우선, SEM에서 제공한 영상 파일을 통해 물리적 정보를 얻은 후, EDX에서 X-선 분석을 수행하여 화학적 정보를 얻었다. 물리적 변수는 섬유상 물질의 길이 (length), 폭 (width), 길이 대 폭비 (l/w) 등 3가지였으며, 측정된 화학적 변수는 Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn 등 총 13가지의 원소였다.

둘째, 모든 기자재에서 제공된 분석정보는 항상 주변 background에 의한 잡음을 가지고 있다. X-선 분석법 역시 이러한 잡음을 가지고 있으며, 통계처리상 이 잡음은 제거되어야 한다. 일반적으로 X-선 peak는 방출된 photon 숫자에 준해 얻어지는데, photon counting 과정은 Poisson 분포 (Poissonian distribution)에 따른다. 따라서 순수 오염원소로 간주되기 힘든 X-선 peak를 제거할 목적으로 한 원소에 대한 X-선 count가 총 X-선 count의 제공근의 두 배보다 작을 경우 즉, 95% 확률 속에 속하지 않을 경우 해당원소의 X-선 count는 0 (zero)으로 간주하였다.

셋째, count수의 크기에 따라 한 쪽으로 치우쳐 있는 분포를 최소한의 대칭형 분포로 만들기 위해

logarithmic 변환을 시도하였다 각 원소 변수의 경우, 잡음제거 과정 중 많은 0값이 생기므로 Log (1+x) 변환을 시도하였다. 이는 일반적 X-선 count 가 1을 더해도 변환된 수치가 영향을 받지 않을 정도로 큰 값을 갖기 때문이다.

이러한 과정을 거쳐 변환된 자료를 C-language 로 전문가시스템을 개발하였다. 전문가시스템 (expert system)은 인공지능 (artificial intelligence, AI)의 일종으로 전문가와 같은 지적 능력을 갖는 소프트웨어 체계를 일컫는 것으로, 일반적으로 Prolog, LISP 등의 인공지능 언어와, C 또는 FORTRAN 같은 표준언어로 개발된다. 본 연구에서는 기준시료에서 제공된 석면의 알고 있는 물리화학적 지식을 기지의 사례 (case)로 간주한 후 이를 바탕으로 전문가시스템을 개발하였으며, 최종적으로 미지의 섬유상 물질을 분리확인하였다. 그림 1은 본 연구과정의 개략도로써 우선 오염원에서 기준시료를 채취한 후, 여기서 제공된 물리화학적 원자료 (raw data)를 전처리하고 자료 변환과정을 수행한 후, 석면 종류별로 석면의 순수 입자군 (homogeneous particle class)을 구하였다. 다음 각 입자군에 대해 독립성 검증을 통해 최종 오염원 분류표를 작성하였다. 이와 같이 작성된 오염원 분류표는 기지의 정보로 활용되어 전문가시스템 프로그램이 개발될 수 있었다. 본 연구에서는 이 프로그램이 원자료를 재입력하여 검증하

였으며 석면종이 완벽하게 분리됨을 확인할 수 있었다. 따라서 일반환경에서 채취된 섬유상 물질의 분리 및 확인작업에 이를 직접 활용할 수 있었다.

3. 연구 결과

3.1 개발된 분류표에 입각한 석면 섬유 물리화학적 특성

석면의 기준시료 분석을 통해 백석면, 청석면, 투각섬석면 등의 석면 섬유와 비석면 섬유인 유리섬유 등 총 4가지 섬유상 물질에 대해 정보를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 각 섬유상 물질에 대해 공히 30개 이상의 입자를 확보하고 이를 바탕으로 오염원 분류표를 작성할 수 있었다. 표 2에는 4가지 섬유상 물질의 평균 길이와 폭, 종횡비 등을 나타낸 오염원 분류표의 일부이다. 평균 길이에 있어서는 투각섬석면이 가장 길었고, 유리섬유, 백석면, 청석면 순으로 나타났다. 섬유의 폭은 백석면이 1.04 μm 로 가장 좁았으며, 유리섬유가 5.07 μm로 가장 넓은 것으로 나타났다. 평균 종횡비에 있어서는 백석면이 평균 71.3으로 청석면, 투각섬석면, 유리섬유에 비해 상당히 큰 값을 보였는데, 표준편차 값에서도 63.1로 분산 정도가 넓은 것을 알 수 있었다.

표 3은 4가지 섬유상 물질의 종횡비 분포를 표시한 것이다. 백석면의 경우 절반 이상에 해당되는 51.5%가 50 이상의 큰 값을 나타낸 반면, 유리섬유의 경우 대략 70% 가량이 5~20 사이의 값을 보였다. 이는 일단시 석면 섬유질이 직경이 작고 길이가 긴 개개의 섬유로 쪼개지는 것과 달리, 길이만이 잘게 부서지면서 직경은 변하지 않는 비석면 형태의 인공 무기질 섬유의 특성과 관련이 깊은 것으로 사료되며 (유성환, 1993). 이러한 특성으로 인해 석면 섬유는 실제 종횡비보다 더 크게, 비석면 섬유의 경

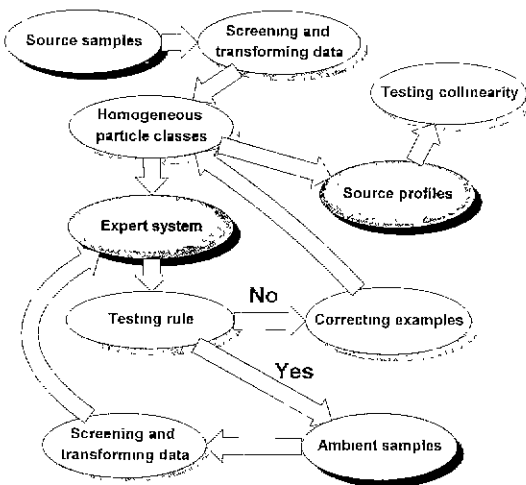


Fig. 1. A flowchart for the scope of the study.

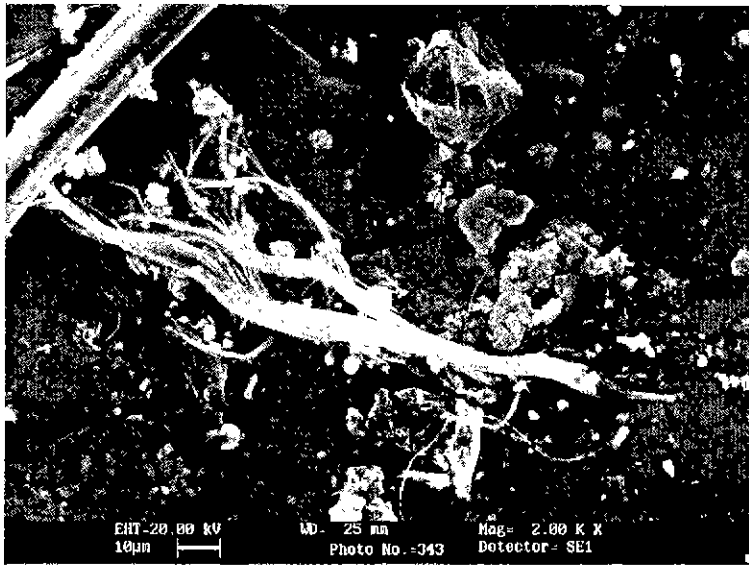
Table 2. Mean and standard deviation (SD) of fiber length, width and its aspect ratio for each asbestos type analyzed in reference samples.

Types	Number of Fibers	Length (μm)	Width (μm)	Aspect Ratio		
				Mean	Range	SD
Chrysotile	33	56.3	1.0	71.3	17.5~346.7	63.1
Crocidolite	31	37.0	1.4	31.5	6.9~125.4	23.4
Tremolite	30	86.4	2.9	31.3	14.1~80.3	15.1
Glass Fiber	33	75.2	5.1	19.3	5.3~73.1	16.2

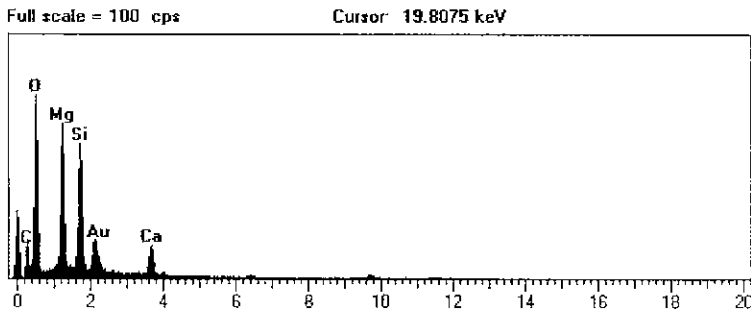
Table 3. Distribution of aspect ratio (length/width) for each type of asbestos.

Aspect Ratio (l/w)	Chrysotile		Crocidolite		Tremolite		Glass Fiber	
	%	Cum. %	%	Cum. %	%	Cum. %	%	Cum. %
$3 \leq r \leq 5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$5 < r \leq 10$	0.0	0.0	3.2	3.2	0.0	0.0	33.3	33.3
$10 < r \leq 20$	3.0	3.0	19.4	22.6	16.7	16.7	36.4	69.7
$20 < r \leq 30$	9.1	12.1	41.9	64.5	46.6	63.3	15.2	84.9
$30 < r \leq 50$	36.4	48.5	22.6	87.1	30.0	93.3	9.1	94.0
$50 < r$	51.5	100.0	12.9	100.0	6.7	100.0	6.0	100.0
Avg	71.3		31.5		31.3		19.3	
N	33		31		30		33	

!cum cumulative

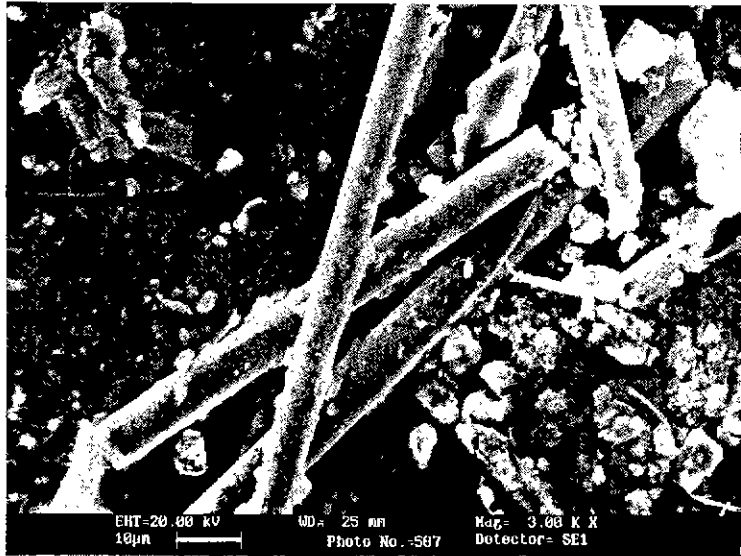


(a) SEM image of ($\times 2,000$)

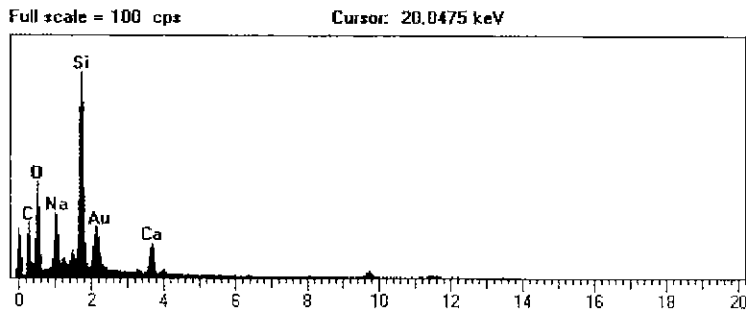


(b) EDX spectrum data

Fig. 2. A SEM image and X-ray results for chrysotile.



(a) SEM image (×3,000)



(b) EDX spectrum data

Fig. 3. A SEM image and X-ray results for glass fiber.

우는 실제 중량비보다 작게 나오는 오차가 발생할 수도 있는 것으로 사료된다

그림 2와 3은 석면의 기준시료 분석에서 얻은 백석면과 유리섬유의 SEM 영상과 EDX 스펙트럼이다. 물리적 특징에 있어서, 백석면은 가늘고 긴 섬유 형태로 끝이 갈라져 있고 매우 부드러워 보였으며, 길이는 약 80µm, 폭은 0.3µm로 중량비가 매우 큰 것으로 나타났다. 이에 반해 유리섬유는 표면 자체가 거칠고 불투명하며, 섬유의 직경이 8µm 정도로 앞의 석면 섬유에 비해 상당히 굵고 길이 방향으로 끊어진 모양으로 횡단면으로 부서지기 쉬운 성질임

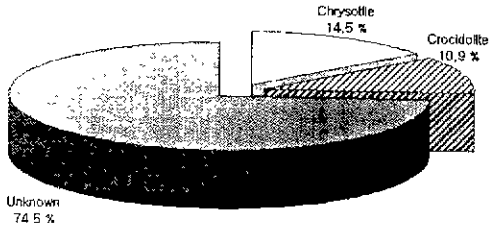
을 알 수 있다. 또한 화학적 조성에 있어서, 백석면은 Mg와 Si가 전체 성분의 각각 40% 이상으로 주성분을 이루었고, Ca 등이 미량 함유되어 있는 것을 알 수 있었으나, 유리섬유는 Si가 대부분(대략 70%)을 차지하고 기타 Na, Ca 등으로 구성되어 있다. 하지만, 석면을 입증할 수 있는 중요 원소인 Mg는 검출되지 않았다.

3.2 일반환경에서 전문가시스템의 응용 결과

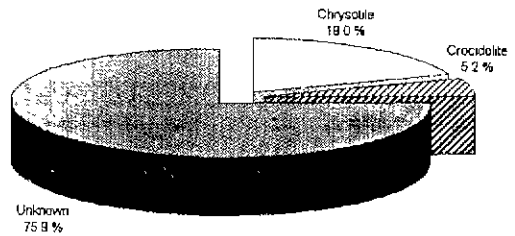
일반 실내의 환경에서 석면의 오염도를 조사할 목적으로 또한 개발된 전문가시스템을 활용할 목적

으로 다세대 주택(r1, r2), 초등학교(e1, e2), 지하상가(u1, u2), 폐차장(a1, a2)에서 각기 2회씩 시료를

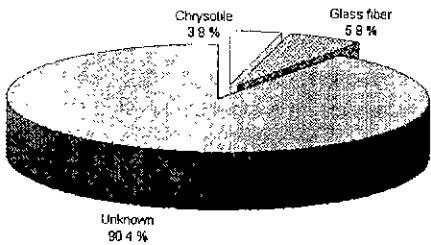
채취한 후 기준시료와 마찬가지로 SEM/EDX 분석을 시도하였다. 여기서 제공된 각종 물리화학적 정



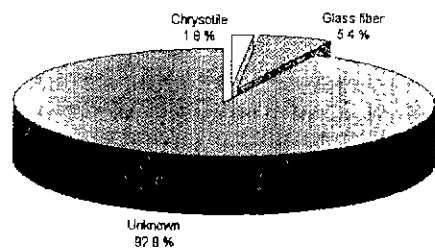
(a) r1



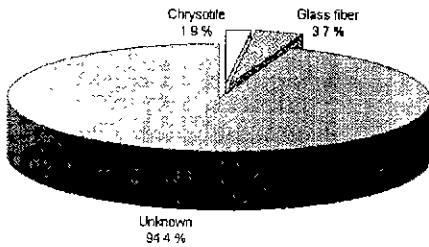
(b) r2



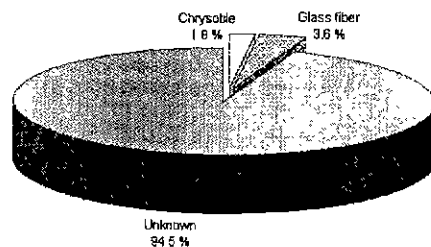
(a) e1



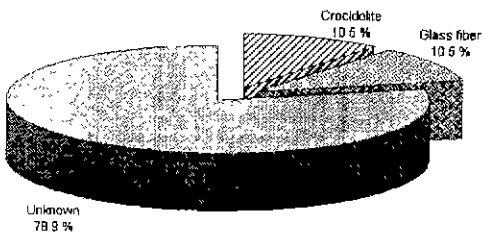
(b) e2



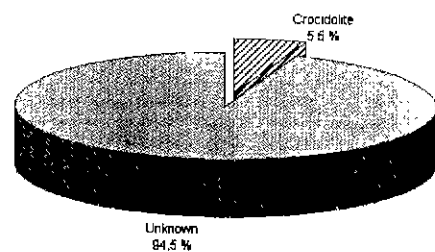
(a) u1



(b) u2



(a) a1



(b) a2

Fig. 4. Number fraction of asbestos fibers collected in various in/out air environment.

보는 개발된 프로그램의 입력자료로 사용되었으며 각 석면종의 오염도를 파악할 수 있었다.

석면종의 오염도를 분석한 결과, r1에서는 전체 55개의 섬유 입자 중 8개의 백석면과 6개의 청석면이 존재하는 것으로 분리되었으며, r2에서는 전체 58개의 섬유 입자 중 11개의 백석면과 3개의 청석면이 분리되었다. 이에 비해 e1, e2, u1, u2에서는 1~2개의 백석면과 2~3개의 유리섬유가 분류되었을 뿐, 청석면과 투각섬석면은 1개도 없었다. a1과 a2에서는 백석면이 검출되지 않았고, 약간의 청석면과 유리섬유 등이 분리되었다. 이들 전체 8개 시료 전체에서 투각섬석면은 하나도 검출되지 않았다. 각 실내외 환경에서 검출된 섬유종의 숫자 비(number ratio)는 그림 4와 같다.

한편, 일반 환경에서 채취된 시료의 석면 섬유 및 비석면 섬유의 농도결과는 그림 5와 같다. 전반적으로 석면은 u1, u2, a1, a2에서 각각 0.0112, 0.0133, 0.0120, 0.0153 f/cc로 비교적 높게 나타났으며, e1과 e2는 0.0083, 0.0066 f/cc로 낮은 수치를 보였다. 석면농도에서는 전체 석면농도에서 낮은 수치를 보였던 r1과 r2에서 각각 0.0022, 0.0024 f/cc로 가장 높게 나타났으며, e1, e2, u1, u2에서는 각각 0.0003, 0.0001, 0.0002, 0.0003 f/cc로 비교적 낮은 농도를 보였다. 석면농도는 U.S. EPA 기준치와 우리나라 환경 권고치인 0.01 f/cc를 밑도는 값이었으나, 만약

SEM/EDX가 아닌 PCM으로 이들 시료가 분석되었다면, 비석면 섬유까지 석면 섬유로 인식되어 대부분의 시료가 기준을 상회하였을 것이며 실내공기관리상 우심지역으로 간주되었을 것으로 판단된다. 주거환경인 r1과 r2는 전체 섬유상 물질의 농도가 타 환경보다 낮았지만 반면, 석면의 비율이 상대적으로 높아(각각 25.3 24.2%), 석면에의 폭로 정도가 상대적으로 컸다. 이와는 달리 초등학교(e1, e2)에서는 전체 섬유상 물질의 농도도 가장 낮았고 석면의 실제비율도 가장 낮아 타 환경과 비교하여 상대적으로 안전하였다. 하지만, 노출대상이 어린아이들이므로 비록 소량이지만 대상 학교수를 늘려 재검토할 필요성이 있는 것으로 사료된다. 지하공간인 u1과 u2도 석면의 비율이 비교적 적었다. 폐차장인 a1과 a2에서는 전체 섬유상 물질의 농도가 가장 높았고, 석면 비율도 각각 10.8, 5.2%를 보였다. 그러나 이는 작업환경(폐차장)임을 감안할 때 비교적 낮은 수치라고 판단되며 미 OSHA 기준치(0.1 fiber/cc)를 훨씬 밑도는 값이었다. 이는 자동차 및 전동차의 브레이크 라이닝이 1990년 이후 탄소 합성체인 케브라 등의 비석면 물질로 대체되면서(이기라, 1996), 석면 사용이 상당량 감소되었기 때문인 것으로 사료된다. 전체 섬유상 물질 중 석면의 비율은 대략 9.5%였으며, 대부분은 케브라를 비롯한 탄소합성체 섬유와 알루미늄 규산염 섬유, borosilicate 섬유, 금속 섬유

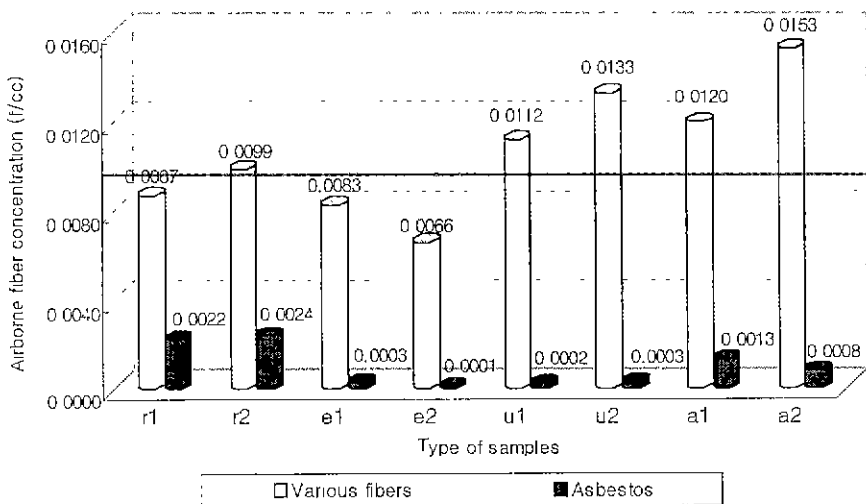


Fig. 5. Asbestos number concentration collected in various sampling sites.

유 등의 비석면 섬유로 나타났다.

4. 결 론

SEM/EDX를 이용하여 석면이 함유된 기준시료를 분석하여 석면 및 비석면 섬유의 오염원 분류표를 작성하였으며 이를 바탕으로 전문가시스템 프로그램 성공적으로 개발할 수 있었다. 이 프로그램은 검증되었으며 실제 다세대주택, 초등학교, 지하상가 및 폐차장 등 일반 실내의 환경에서 채취된 시료 중 석면종을 분리 및 확인시 사용할 수 있었다.

본 연구에서는 백석면, 청석면, 투각섬석면, 유리섬유 등 3가지 석면종을 포함한 4가지 섬유상 물질의 오염원 분류표를 작성할 수 있었다. 백석면의 중량비는 71.3으로 최고치를 보였으며, 비석면인 유리섬유는 19.3으로 최소치를 보였다. 중량비 분포에 있어서도 백석면의 51.5%가 50 이상의 중량비를 나타내었고, 유리섬유는 70% 정도가 5~20의 중량비를 보였는데, 이는 유리섬유의 평균 직경이 5 μm로 백석면, 청석면, 투각섬석면 등의 석면과 달리 매우 굵기 때문이었다.

한편, 일반 실내의 환경시료를 분석한 결과 석면 섬유 중 백석면이 5.4%, 청석면이 4.1%, 유리섬유가 3.6%, 기타 섬유종이 86.9%로 분류되었으며, 투각섬석면은 발견되지 않았다. 전반적으로 연구조사지역에서 석면의 개수농도는 낮은 농도를 보였다. 즉, U.S. EPA 실내공기 기준치이며 우리 나라 실내공기 권고치인 0.01 f/cc를 만족시키는 것으로 조사되었다.

참 고 문 헌

- 김현욱 (1995) 대형건물내 비고형 석면함유 건축자재에 의한 기중석면오염 및 관리 실태. 한국산업위생학회지, 5(2).
- 김혜진, 이종태, 김동술 (1999) SEM/EDX를 이용한 디젤 분진의 입자별 분석. 한국대기환경학회지, 15(2), 175-182
- 서울특별시 지하철공사 (1998) 서울시 지하철 환경개선 방안 연구.
- 유성환 (1993) 건축재료에서 발생하는 석면입자의 특성 연구 한국대기보전학회지, 9(3), 191-199.
- 유성환, 김현욱 (1996) 전자현미경을 이용한 건물내 비고형 표면자재의 석면오염 및 기중석면농도 특성 조사. 한국산업위생학회지, 6(2).
- 유영식, 김종규 (1989) 서울지역의 asbestos 환경농도분포, 한국대기보전학회지, 5(2).
- 이기리 (1996) 서울시 지하철역 구내의 분진 및 섬유 농도에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원석사논문.
- 이재규 (1996) 전문가시스템-원리와 개발, 범영사, 18-22.
- 환경포럼 (1998) 석면의 건강 위해성과 관리개선 방안, 한국환경정책평가연구원.
- Chesson, J., J. Hatfield, B. Schultz, E. Dutoow, and J. Blake (1990) Airborne asbestos in public buildings, Environmental Research, 51, 100-107
- Guillemin, M.P., P. Madelaime, G. Litzistorf, P. Buffat, and F. Iselin (1989) Asbestos in buildings, Aerosol Science and Technology, 11, 221-243.
- Howitt, D.G., J. Hatfield, and G. Fishler (1993) The difficulties with low-level asbestos exposure assessments in public, commercial, and industrial buildings, American Industrial Hygiene Association (AIHA) Journal, 54(1-6), 267-271.
- Michaels, L. and S.S. Chussick (1979) *Asbestos properties, applications, and hazards*, Chichester, New York Wiley Publishing Co
- Schreier, H. (1989) *Asbestos in the natural environment*, Elsevier Science Publishing Co New York.
- Seal, S., S. Krezoski, D. Petering, T.L. Barr, J. Klinowski, and P. Evans (1996) X-ray photoelectron spectroscopy investigations of the interaction of cells with pathogenic asbestoses, Journal of Vacuum Science Technology, A14(3), 1770-1778.
- Seal, S., T.L. Barr, S. Krezoski, D.H. Petering, and W. Antholine (1997) Characterization of chemical interaction of asbestos surfaces during culturing with lung cells, Journal of Vacuum Science Technology, A15(3), 1235-1245
- Spurny, K.R. (1989) On the release of asbestos fibers from weathered and corroded asbestos cement products, Environmental Research, 48, 100-116.
- Verma, D.K., N.E. Clark, and J.A. Julian (1991) Asbestos fiber characterization using an analytical transmission electron microscope and a microfilm reader, American Industrial Hygiene Association (AIHA) Journal, 52(1-6), 113-119
- Webber, J.S., L.J. Carhart, and A.G. Czuchanich (1997) Analytical trends in asbestos analysis: New York states's bulk sample proficiency-testing program, American Industrial Hygiene Association (AIHA) Journal, 58, 809-813.

Wiley, A.G., K.F. Bailey, J.W. Kelse, and R.J. Lee (1993)
The importance of width in asbestos fiber carcinogenicity and its implications for public policy,

American Industrial Hygiene Association (54),
239-252.