

## SEM/EDX를 이용한 석면 및 비석면의 오염원분류표 개발

### Development of Source Profiles for Asbestos and Non-asbestos Fibers by SEM/EDX

최 영 아 · 이 태 정 · 김 동 술\*

경희대학교 환경·응용화학대학 대기오염연구실 및 환경연구센터

(2007년 9월 9일 접수, 2007년 11월 26일 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 9 September 2007, accepted 26 November 2007)

#### Abstract

There are many varieties of asbestos: chrysotile, crocidolite, amosite, tremolite, actinolite, and anthophyllite. These are widely used in construction materials, brake lining, textile, and so on. Even though non-asbestos fibers such as glassfiber and rockwool have manufactured because asbestos causes asbestosis, lung cancer, mesothelioma, etc., some bad effects of non-asbestos have been also reported.

PCM (phase contrast microscopy) and PLM (polarized light microscopy) have been used to qualitatively analyze asbestoses. These techniques have serious drawbacks when identifying and separating various asbestoses. Recently scanning electron microscopy (SEM) equipped with energy dispersive X-ray analysis (EDX) has been known as an useful tool to analyze airborne particle since it provides physical and chemical information simultaneously. The purpose of the study was to classify both asbestos and non-asbestos fibers and finally to develop their source profiles by using the SEM/EDX. The source profiles characterized by 6 different types of asbestos fibers and 2 types of non-asbestos fibers had been developed by analyzing a total of 380 fibers. Analytical parameters used in this study were length, width, aspect ratio, and shape as physical information, and Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Cr, Mn, Fe, and Cu as chemical information. All the parameters were intensively reviewed.

**Key words** : Asbestos, SEM/EDX, Source profile, Expert system

#### 1. 서 론

기원전 2,500년경부터 사용하기 시작한 석면

(asbestos)은 단열성, 내약품성, 내마찰성, 절연성 등이 우수하여 단열재, 바닥타일 등의 건축재료, 가스켓, 브레이크라이닝, 방음재 등에 널리 사용되고 있다 (Yu *et al.*, 1998). 그러나 석면은 미세한 섬유형태를 가지고 있어 공기중 체류시간이 길고 인체의 호흡기에 흡입되어 폐암 (lung cancer), 중피종 (mesothe-

\*Corresponding author.

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

lioma), 석면폐증(asbestosis) 등을 유발한다(Dusinska et al., 2004; Wylie et al., 1993; Maclure, 1987). 이 같은 석면의 유해성 때문에 석면대체 섬유가 개발되어 석면제품들을 대신하게 되었으나, 대체품으로 개발된 유리섬유와 암면섬유 같은 인공무기질 섬유도 피부 질환 등 인체에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 인공무기질 섬유는 석면과 달리 실내에 상당량 체류하여 호흡성 섬유로 존재하고 있어 적절한 관리 대책 또한 필요할 것이다(HELIR, 1991).

선진국에서는 석면의 위해성 때문에 이미 오래전부터 규제대상이거나 사용금지 물질로 정의하고 있다. 우리나라에서도 2009년 1월부터 모든 석면에 대해 제조·수입·양도·제공 또는 사용을 금지할 방침이다(노동부, 2007). 석면에 대한 작업장 노출기준은 석면의 종류에 따라 청석면 0.2 fibers/cc, 백석면 및 기타 석면은 2 fibers/cc로 적용했던 기준을 2002년 모든 석면에 대하여 미국 국립산업안전보건연구원(NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health)의 권고기준과 동일한 0.1개/cc로 대폭 강화하였다(노동부, 2002). 또한 석면의 일반인에 대한 노출과 관련하여 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법에서는 권고기준 0.01개/cc 이하로 정하고 있다(환경부, 2004).

현재 석면의 측정은 “실내공기질 공정시험방법”에서는 위상차현미경법(phase contrast microscopy, PCM)을 주시험법으로 채택하고 판독이 불가능한 경우 전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 결정하고 있다(환경부, 2004). 그러나 위상차 현미경은 석면과 비석면을 구분하지 못하고, 직경이 0.25  $\mu\text{m}$  이하의 섬유는 관찰되지 않기 때문에 측정 방법이기보다 폭로지수(index of exposure)의 방법론으로 이용된다(이기라, 1996; Howitt et al., 1993). 따라서 분해능이 0.01  $\mu\text{m}$  정도인 섬유까지 관찰할 수 있는 전자현미경의 도입이 필요하고, 정확한 성분분석이 가능한 X-선 microanalysis 장치(energy dispersive X-ray spectrometer, EDX) 등의 이용이 요구된다. SEM/EDX 시스템에서는 보조장치로 연결되어 있는 EDX로 화학적 원소분석이 이루어진다. 즉 SEM과 EDX 간에 자료전송을 이용하여 SEM에서 방출된 전자빔과 시료간의 반응에서 나오는 X-선이 EDX의 X-선 검출기에서 분석된다(Schreier, 1989).

본 연구에서는 판독이 어려운 석면 및 비석면 섬유

에 대한 정확한 분류기법을 제공하기 위하여 SEM/EDX를 이용하여 사문석계 광물인 백석면(chrysotile)과 각섬석계 광물인 갈석면(amosite), 청석면(crocidolite), 직섬석석면(anthophyllite), 양기석석면(actinolite), 투각섬석면(tremolite) 등의 6종류의 석면 섬유와 유리섬유(glass fiber)와 암면(rock wool) 등 2종의 비석면 섬유에 대한 오염원 분류표(source profile)를 개발하였다. 이러한 자료는 고형시료 및 실내 공기에 대한 정확한 석면평가 및 실내공기질 적정관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 시료채취

석면과 비석면 섬유가 함유된 입자를 분석하여 오염원분류표를 만들기 위해 석면과 비석면 섬유가 함유된 기준시료(reference sample)로서 고형시료를 채취하였다. 고형시료는 석면타일, 석면판, 석면가스켓 등의 고형시료를 후드 내에서 분쇄하여 알루미늄 재질의 스텝(stub) 위에서 시료를 채취하였다. 전자주사 현미경을 이용한 입자별 분석은 전량분석과는 달리 입자의 특성을 여지와 함께 분석해야 하기 때문에, 분진의 화학적 조성과 다른 여지를 선택하여 채취하여야 한다. 실험에서는 바탕이 양호하며, SEM 분석에 용이한 polycarbonate membrane filter(직경 25 mm, pore size 0.8  $\mu\text{m}$ )가 장착된 preloaded cassette(SK225-1604)를 사용하였다. 사용된 카세트(cassette)는 중간단계가 50 mm의 원통형태(cowl)인데, 정전기 발생을 억제하여 섬유들을 일정하고 균일하게 분포하게 하는 역할을 한다. 다량의 입자상 물질이 채취될 경우 입자의 선정 및 현미경 관찰에 어려움이 있으므로 적당한 부하량으로 채취해야 한다. 가장 이상적인 입자상물질의 부하량은 5~30  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 으로 파악되고 있다(Willis, 2000).

시료준비는 Conner et al. (2001)의 개별입자의 SEM/EDX 분석시료의 준비방법과 다중이용시설의 실내공기질 시험방법(환경부, 2004)을 참고하였다. 여지는 1/2~1/4을 절취하여 금(gold)으로 코팅한 후 알루미늄 스텝(stub)에 카본테이프를 이용하여 고정시켜 SEM/EDX 분석을 하였다.

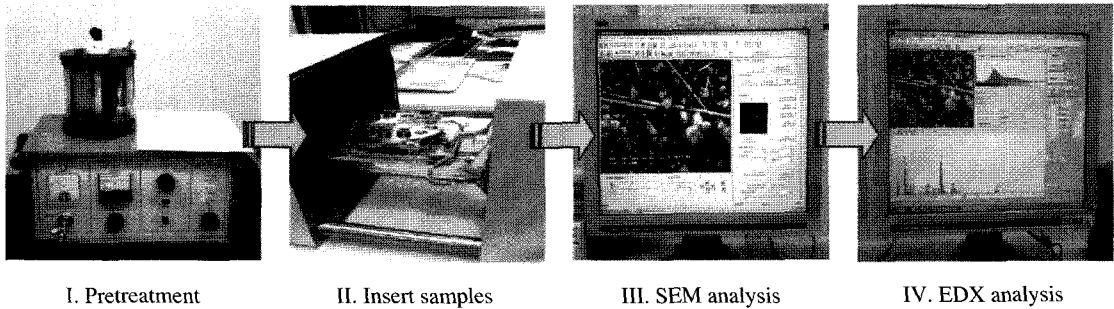


Fig. 1. An operational procedure for SEM/EDX analysis.

## 2.2 시료분석 방법

SEM을 분석할 때 이상적으로 시료를 분석하기 위해서는 입자가 단일층으로 고르게 분포되어 있어야 한다. 전자주사현미경 시료의 코팅방법으로는 플라즈마 스퍼터링(plasma sputtering) 또는 스퍼터 코팅법(sputter coating procedure)을 채택하였다. 시료가 부착된 금속 stub을 시료챔버(specimen chamber)에 넣은 다음, 회전진공펌프(rotary vacuum pump)를 사용하여 진공을 유지하였다. 진공을 유지하는 이유는 시료의 표면에 흡집을 줄 가능성이 있는 수분 및 산소분자를 제거하기 위해서이다(환경부, 2004). 본 실험에서는 Au를 이용하여 20~40 nm 두께로 코팅을 하였다. 금속코팅은 조사되는 부분 외에서 방출되는 X-선 잡음을 제거시키므로 분석의 정확도를 높여준다(김수환과 김동술, 1999; 장여진과 김동술, 1997).

고형시료의 분석에 사용된 SEM/EDX (SHIMADZU-SS550, Japan)는 가속전압 15 kV, 작동거리(working distance) 15 mm의 가동조건으로 작동하였다. 그림 1에는 SEM/EDX의 분석과정을 나타내었다.

## 2.3 오염원 분류표 개발시료분석 방법

SEM/EDX를 이용한 석면과 비석면 섬유 오염원 분류표 개발을 위하여 다음과 같은 단계로 개발하였다. 우선 SEM에서 제공한 영상파일을 통하여 물리적 정보를 얻은 후, EDX에서 X-선 분석을 수행하여 화학적 정보를 얻었다. 물리적 변수는 길이(length), 폭(width), 종횡비(L/W ratio), 모양 등 4가지였으며, 화학적 변수는 Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu 등 10가지 원소였다. 또한 NIOSH 7402 방법(NIOSH, 1994)을 참고하여 석면 및 비석면 섬유를 결정하는

주요 원소들과 Si의 비, 즉 Na/Si, Mg/Si, Al/Si, Ca/Si, Fe/Si 등 5가지 비율을 고려하였다.

본 연구에서는 각 원소에 대한 EDX 분석시 X-선 피크에 대한 기기의 잡음(noise)을 통계적으로 제거하기 위하여, 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 0값으로 처리하였다. 또한 count의 크기에 따라 한 쪽으로 치우쳐 있는 분포를 최소한의 대칭형 분포로 만들기 log 변환을 시도하였으며, 잡음제거시 생성된 0값을 고려하여  $\log(1+x)$  변환을 시도하였다. X-선 count는 매우 큰 값을 가지므로 1을 더하는 변환으로 측정값에는 영향이 없다.

오염원분류표는 2가지 규칙을 적용하여 작성하였다. 규칙 1은 오염원분류표에서 작성된 길이, 폭, 종횡비 등 3가지 변수에 대해 각각 최대, 최소값의 범위를 설정하였다. 규칙 2는 오염원분류표에서 확보된 섬유상물질들에 대한 모양, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu 등의 10가지 성분비, Na/Si, Mg/Si, Al/Si, Ca/Si, Fe/Si 등의 5가지 비율에 대하여 각각 최대, 최소값의 범위를 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 석면 및 비석면 섬유의 물리화학적 특성

SEM/EDX를 이용하여 기준시료 분석을 통해 백석면, 청석면, 갈석면, 직섬석석면, 투각섬석면 등의 5종류의 석면섬유와 유리섬유와 암면 등 2종류의 비석면 섬유에 대하여 물리화학적인 정보를 얻을 수

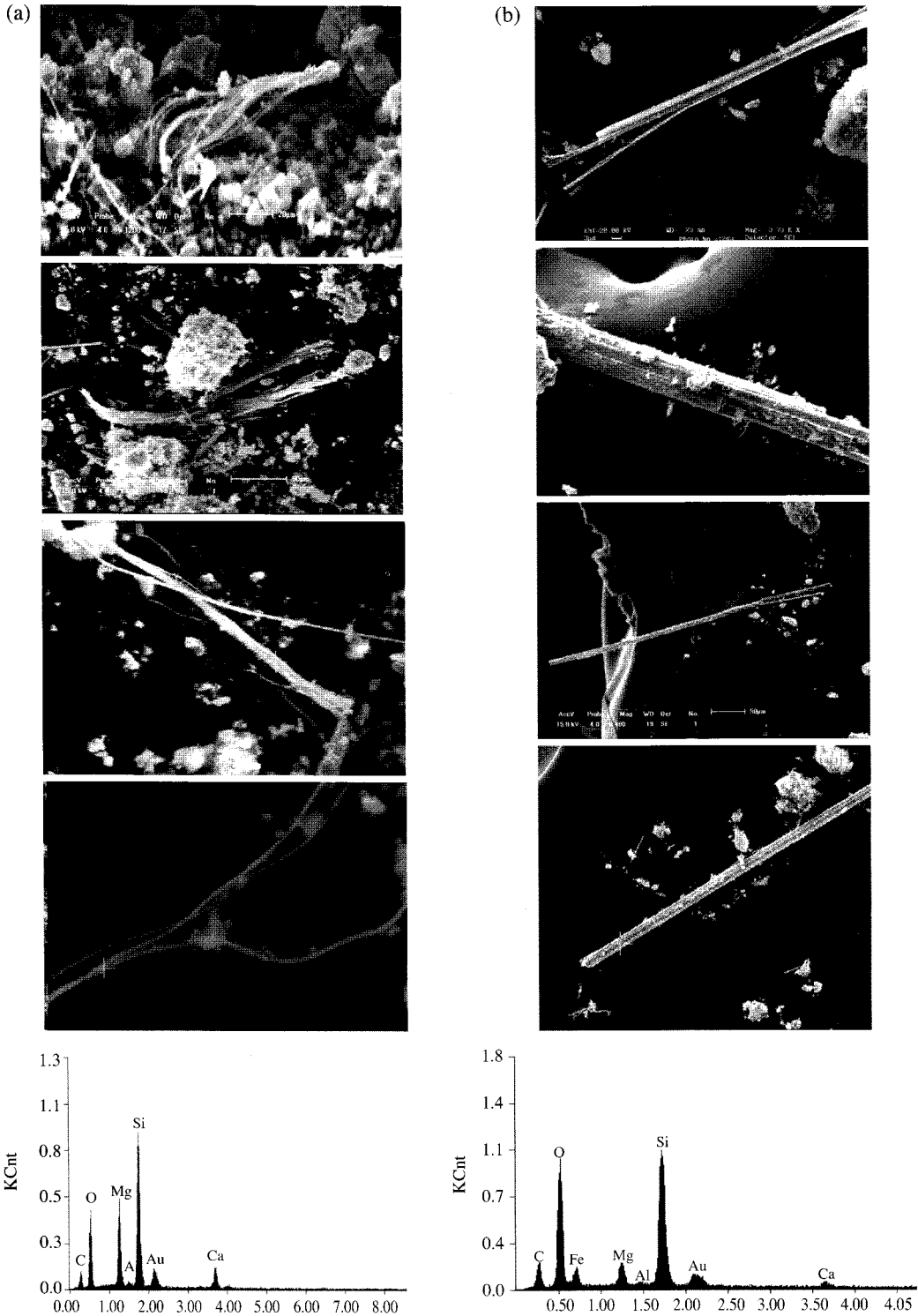


Fig. 2. Scanning electron images and X-ray spectra of asbestos: (a) chrysotile, and (b) amosite.

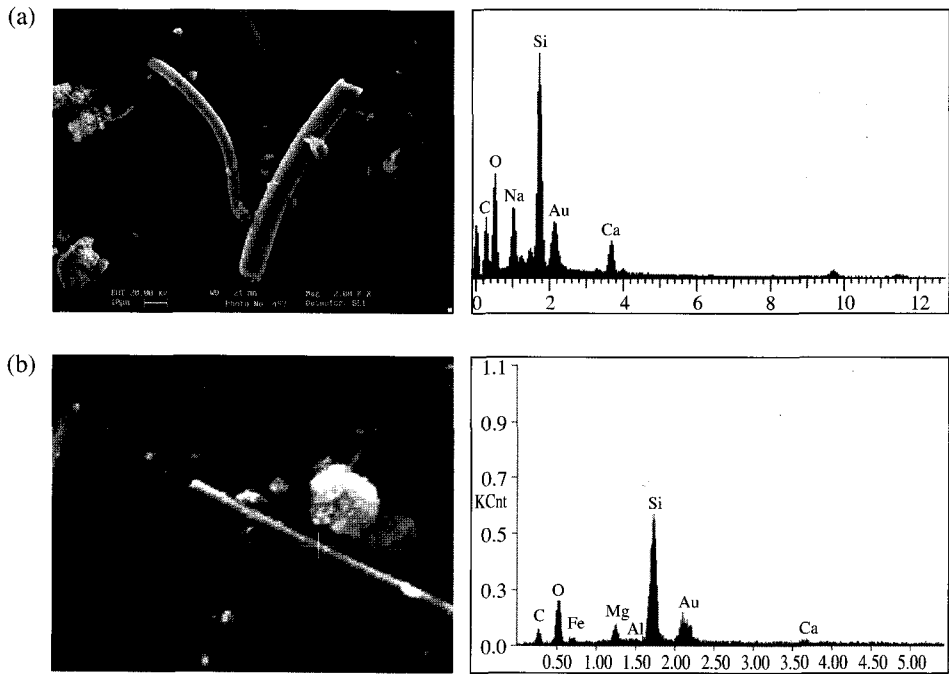


Fig. 3. Scanning electron images and X-ray spectra of non-asbestos: (a) glass fiber, and (b) rock wool.

있었다. 그림 2에 SEM/EDX에서 확인된 백석면과 갈석면의 SEM 이미지와 EDX 스펙트럼을 나타내었다. 물리적 특성에 있어서 백석면은 가늘고 긴 섬유 형태로 유연한 실타래와 같은 모양을 하고 있으며, 화학조성에 있어서 Mg과 Si의 비율이 높았다. 갈석면은 백석면과 같이 가늘고 길며, 중횡비가 큰 것으로 나타났으나, 끝이 갈라지거나 여러 섬유가 뭉쳐 있으며 주성분은 Si, Mg, Fe이었다. 청석면은 백석면에 비해 유연하지 않고 곧은 모양으로, 폭이 다소 굵었다. 주성분이 Si, Fe, Mg이었으며 Na이 소량 포함되어 있는 것이 특징이었다. 직섬석석면은 주성분이 Si와 Mg이며, Ca와 Fe를 소량 포함하고 있었다. 투각섬석면은 길이가 다양하게 존재하였고, 주성분은 Si, Mg, Ca이었으며, Fe도 소량 함유하는 섬유들이 있었다.

그림 3은 유리면과 암면의 1,000배 이미지 및 EDX 스펙트럼을 나타낸 것이다. 유리섬유의 경우 길이는 짧고 폭이 굵은 섬유 형태를 보였다. 이는 길이만 잘게 부서지면서 직경은 변하지 않는 비석면 형태의 인공 무기질 섬유의 특성과 관련이 깊은 것으로 사

료된다(유성환, 1993). 유리성분의 주성분은 Si가 대부분이며, Na, Ca 등이 다량 포함되었다. 암면은 Si, Ca, Mg, Fe 등이 주성분을 이루고 Mn도 다소 포함하는 섬유들이 있었다.

### 3.2 오염원 분류표 개발

오염원 분류표(source profile) 개발을 위해 6가지의 석면 섬유와 2가지 비석면 섬유를 포함한 380개의 입자를 확보하여 오염원 분류표를 작성하였다. 각 석면섬유와 비석면섬유상 물질을 판단할 수 있는 물리적 변수인 길이, 폭, 중횡비에 대한 평균 및 최대최소자료를 표 1에 나타내었다. 물리적 정보가 부재한 양기석석면을 제외한 섬유들의 길이는 9.0~1,160.0  $\mu\text{m}$ 를 나타내었고, 폭은 0.2~8.5  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 평균길이에 있어서는 갈석면이 189.7  $\mu\text{m}$ 로 가장 길었으며, 투각섬석면, 백석면 순으로 나타났다. 섬유의 평균 폭은 유리섬유가 2.4  $\mu\text{m}$ 로 가장 넓었으며, 백석면이 1.4  $\mu\text{m}$ 로 가장 좁은 것으로 조사되었다. 오염원 분류표의 중요한 변수 중의 하나인 섬유상물질의 평균중횡비는 백석면이 71.9로 직섬석석면이나 청석면

에 비해 매우 큰 값을 보였다.

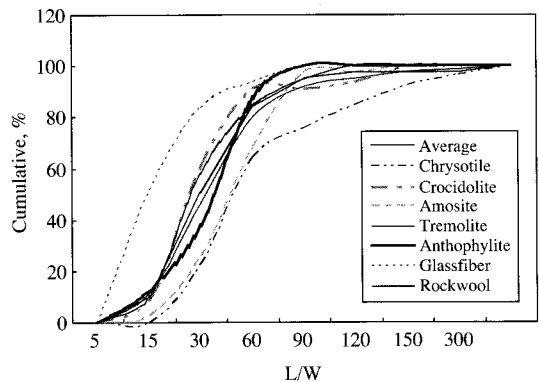
5가지 석면과 2가지 비석면의 종횡비 분포빈도 및 누적분포도를 표 2와 그림 4에 나타내었다. 유리섬을 제외하고 90% 이상이 종횡비 15~90의 범위에 존재하였으며, 유리섬은 평균 20.1로 가장 작고, 백석면은 72.6으로 가장 큰 것으로 나타났다. 또한 백석면은 구부러진 모양으로 다른 섬유들과 구분하기 쉬웠으며, 기타 석면 및 비석면 섬유들은 모두 긴 막대 모

양을 하고 있어 형태상으로는 유사하였으나 EDX의 스펙트럼으로 구별할 수 있었다.

EDX 결과로 측정된 주요원소들의 성분비를 표 3에 나타내었다. 백석면의 구성비율은 Mg이 38.8%로 다른 섬유들에 비해 높은 비율을 차지하고 있었으며, Si 34.5%, Ca 15.5%, Fe 5.7% 순으로 나타났다. 청석면은 Si 33.7%, Fe 30.0%, Mg 17.5%, Al 13.4% 그리고 Na, K, Ca, Cr 등이 소량 존재하는 것으로 나타났다. 갈석면은 Si 52.4%, Fe 비율이 31.6%, Mg 9.9%, Mn 1.3%를 차지하는 특성을 보였다. 다른 섬유들에 비해 갈석면은 Fe 비율이 매우 높은 것으로 확인되었다. 투각섬석면은 Si 44.3%, Mg 26.5%, Ca 14.4% 존재하였고, Al과 Fe가 평균 5.6%, 5.5%로 소량 존재하였다. 양기석석면은 Si 53.7%, Mg 22.0%, Ca 14.3%, Fe 9.6%가 존재하였다. 직섬석석면은 Si 53.7%, Mg 28.0%, Ca 15.7%, Fe 5.6%로 구성되었다. 비석면 섬유인 유리섬유와 암면의 특성은 다음과 같다. 유리섬유는 Si가

**Table 1. Physical properties of various fibers for developing source profiles.**

Types (number of fibers)			Length ( $\mu\text{m}$ )	Width ( $\mu\text{m}$ )	Aspect ratio
Chrysotile (53)	Average	88.4	1.4	72.6	
	Max.	333.0	5.8	346.7	
	Min.	9.0	0.2	15.7	
Crocidolite (33)	Average	38.4	1.5	34.5	
	Max.	86.0	3.4	125.4	
	Min.	10.3	0.4	12.1	
Asbestos Amosite (35)	Average	189.7	2.5	49.7	
	Max.	1,160.0	5.6	143.5	
	Min.	15.4	0.7	7.6	
Tremolite (81)	Average	98.2	2.5	43.2	
	Max.	507.0	5.9	369.7	
	Min.	14.2	0.4	7.2	
Anthophyllite (16)	Average	85.8	3.8	26.3	
	Max.	340.0	5.7	80.3	
	Min.	14.2	1.1	7.2	
Non- asbestos Glassfiber (31)	Average	75.2	4.4	20.1	
	Max.	188.3	8.5	73.1	
	Min.	32.0	1.5	5.3	
Rockwool (19)	Average	81.6	2.4	37.6	
	Max.	393.0	9.6	108.0	
	Min.	16.5	0.4	9.3	



**Fig. 4. Cumulative distribution of fibers aspect ratio by fibers.**

**Table 2. Frequency distribution of asbestos and non-asbestos fibers by aspect ratio.**

L/W	Chrysotile		Crocidolite		Amosite		Tremolite		Anthophyllite		Glassfiber		Rockwool	
	N	Cum.%	N	Cum.%	N	Cum.%	N	Cum.%	N	Cum.%	N	Cum.%	N	Cum.%
<5	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0
5~15	—	0.0	3	9.1	1	2.9	8	9.9	2	12.5	16	51.6	2	10.5
15~30	12	22.6	17	60.6	8	25.7	33	50.6	4	37.5	10	83.9	9	57.9
30~60	22	64.2	10	90.9	15	68.6	27	84.0	8	87.5	3	93.5	5	84.2
60~90	6	75.5	—	90.9	10	97.1	9	95.1	2	100.0	2	100.0	2	94.7
90~120	5	84.9	1	93.9	—	97.1	2	97.5	—	—	—	—	1	100.0
120~150	4	92.5	2	100.0	1	100.0	—	97.5	—	—	—	—	—	—
150~300	2	96.2	—	—	—	—	—	97.5	—	—	—	—	—	—
>300	2	100.0	—	—	—	—	2	100.0	—	—	—	—	—	—

**Table 3. Fractions of inorganic metal constituents of various fibers for developing source profiles. (Unit: %)**

Type of fibers		Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu
Chrysotile (60)	Average	0.04	38.75	5.14	34.47	0.00	15.46	0.00	0.00	5.69	0.32
	Max.	2.03	59.80	22.94	49.40	0.00	39.62	0.00	0.00	22.43	18.32
	Min.	0.00	21.63	0.00	21.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Crocidolite (46)	Average	1.39	14.49	13.35	33.67	1.59	1.53	2.25	0.00	29.99	0.00
	Max.	9.60	30.92	31.36	61.60	21.36	20.45	21.78	0.00	47.90	0.00
	Min.	0.00	0.00	0.00	19.20	0.00	0.00	0.00	0.00	18.96	0.00
Amosite (63)	Average	0.00	9.90	0.83	52.37	0.02	3.95	0.01	1.31	31.60	0.02
	Max.	0.00	16.46	6.22	62.41	0.83	16.32	0.65	4.80	49.60	1.01
	Min.	0.00	3.80	0.00	39.06	0.00	0.00	0.00	0.00	21.50	0.00
Tremolite (107)	Average	1.45	26.51	5.60	44.27	2.34	14.37	0.00	0.00	5.52	0.00
	Max.	15.54	36.06	17.37	66.62	14.93	40.27	0.00	0.00	18.08	0.00
	Min.	0.00	11.03	0.00	17.13	0.00	2.19	0.00	0.00	0.00	0.00
Actinolite (7)	Average	0.00	21.99	0.00	53.66	0.00	14.34	0.00	0.00	9.60	0.00
	Max.	0.00	26.10	0.00	62.50	0.00	16.60	0.00	0.00	22.82	0.00
	Min.	0.00	14.90	0.00	45.90	0.00	10.60	0.00	0.00	4.70	0.00
Anthophyllite (22)	Average	0.00	27.97	2.21	47.84	0.54	15.70	0.00	0.00	5.61	0.00
	Max.	0.00	35.90	4.88	64.70	2.60	43.21	0.00	0.00	11.50	0.00
	Min.	0.00	18.16	0.00	28.40	0.00	0.00	0.00	0.00	2.31	0.00
Glassfiber (43)	Average	23.31	12.22	4.61	34.31	1.70	21.79	0.00	0.00	0.43	0.59
	Max.	33.60	22.08	17.62	72.00	16.96	30.63	0.00	0.00	16.26	15.27
	Min.	0.00	0.00	0.00	18.78	0.00	7.41	0.00	0.00	0.00	0.00
Rockwool (32)	Average	1.59	14.44	7.19	55.88	1.98	12.41	0.00	0.82	5.47	0.00
	Max.	4.30	25.48	13.23	71.43	4.65	31.39	0.00	13.15	16.13	0.00
	Min.	0.00	8.28	0.00	40.97	0.00	2.19	0.00	0.00	0.00	0.00

34.3%로 가장 많이 함유되어 있었고, Na 23.3%, Ca 21.8%로 다른 섬유들에 비해 높은 비율을 보였다. 암면은 Si 55.9%, Mg 14.4%, Ca 12.4%로 나타났다.

오염원 분류표의 또 다른 특성치인 원소간 비율을 조사하였다. 석면과 비석면에 포함되는 5가지 주요 원소(Na, Mg, Al, Ca, Fe)에 대한 Si와의 비율로 나타낼 수 있으며, 각 섬유들의 성분비율 표 4에 나타내었다. 평균 비율을 살펴보면, Na/Si는 유리면이 0.8로 가장 높았다. Al/Si는 청석면이 0.4, 투각섬석면이 0.2, 백석면이 0.2로 나타났고, Ca/Si는 유리면이 0.7로 가장 높게 분석되었다. 석면섬유 중 백석면, 청석면, 갈석면, 투각섬석면 등 4가지 석면에 대해 가변적으로 존재할 수 있는 Mg/Si와 Fe/Si에 대한 도수빈도와 누적분포를 그림 5에 나타내었다. 원소간의 두 비율을 이론값과 비교하였을 때 다소 차이를 보였으며, 섬유사이에 일부 중복되는 범위가 존재하였다. 따라서 누적분포의 유형이 다르게 나타나는 백석면과 갈석면은 Mg/Si의 비율로 갈석면과 청석면은 Fe/Si의

비율을 우선순위로 하여 석면섬유를 분류하였다.

#### 4. 결 론

석면은 실내환경의 대표적인 오염물질로 알려져 있으나, 분석방법과 석면섬유의 확인 및 분류에 대한 정량적인 연구가 매우 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 고형시료 및 실내환경에서 석면 및 비석면 섬유의 정확한 분류 및 농도확인을 위한 전문가시스템 개발에 앞서 전문가시스템의 기본 지식자료로 활용하기 위한 석면섬유와 비석면섬유의 오염원 분류표를 개발하였다. 석면 및 비석면 섬유의 분석은 모양, 길이, 폭등의 물리적 특성뿐만 아니라 화학적인 조성을 확인할 수 있는 SEM/EDX를 이용하였다.

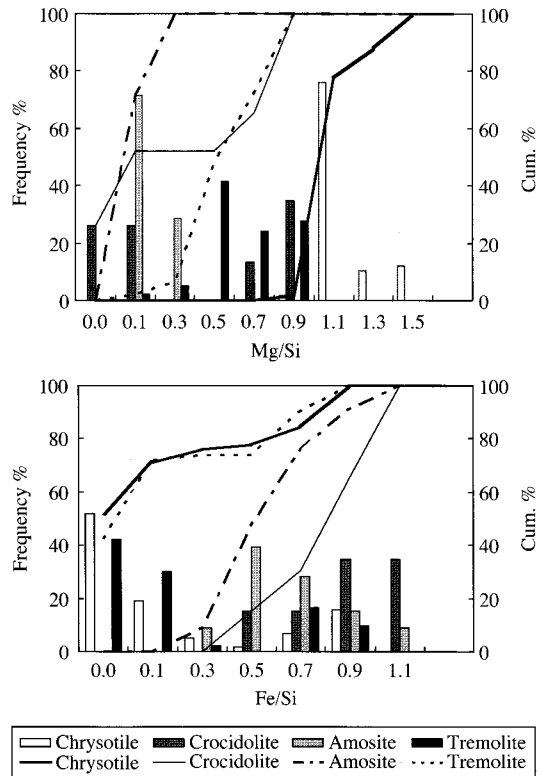
본 연구에서는 기준시료 및 고형시료의 분석을 통해 백석면, 청석면, 갈석면, 투각섬석면, 직섬석면, 양기석면 등의 6가지 석면과 유리섬유, 암면 등 2

**Table 4. Relative ratios of 5 major inorganic metals to Si in various fibers for developing source profiles.**

		Na/Si	Mg/Si	Al/Si	Ca/Si	Fe/Si
Chrysotile (60)	Average	0.00	1.12	0.21	0.53	0.22
	Max.	0.08	1.50	0.89	1.55	0.91
	Min.	0.00	0.85	0.00	0.00	0.00
Crocidolite (46)	Average	0.03	0.40	0.36	0.05	0.89
	Max.	0.20	0.89	0.91	0.75	1.01
	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52
Amosite (63)	Average	0.00	0.18	0.01	0.07	0.66
	Max.	0.00	0.37	0.12	0.34	1.20
	Min.	0.00	0.03	0.00	0.00	0.36
Tremolite (107)	Average	0.06	0.66	0.22	0.44	0.24
	Max.	0.80	1.00	0.88	1.22	0.85
	Min.	0.00	0.17	0.00	0.03	0.00
Actinolite (7)	Average	0.00	0.41	0.00	0.27	0.19
	Max.	0.00	0.48	0.00	0.36	0.50
	Min.	0.00	0.32	0.00	0.19	0.09
Anthophyllite (22)	Average	0.00	0.59	0.06	0.44	0.12
	Max.	0.00	0.68	0.17	1.52	0.20
	Min.	0.00	0.43	0.00	0.00	0.06
Glassfiber (43)	Average	0.76	0.43	0.18	0.71	0.02
	Max.	0.96	0.79	0.74	0.90	0.67
	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Rockwool (32)	Average	0.02	0.23	0.17	0.39	0.10
	Max.	0.10	0.49	0.35	1.27	0.28
	Min.	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00

가지 비석면 섬유에 대해 총 380여개의 자료를 확보하여 오염원 분류표를 작성하였다. 오염원분류표는 길이, 폭, 길이 대 폭, 모양 등의 물리적 정보와, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Cu 등의 화학적 성분비와 Na/Si, Mg/Si, Al/Si, Ca/Si, Fe/Si 등의 비율을 나타내는 화학적 정보를 통해 작성하였다. 일반적으로 백석면, 갈석면, 청석면 등 석면섬유는 가늘고 길었으며 중횡비가 큰 것으로 확인되었고, 석면섬유의 평균 중횡비는 백석면이 72.6으로 가장 큰 값을 보였으며, 갈석면 49.7, 투각섬석면 42.3, 청석면 34.5순으로 나타났다. 반면 비석면은 짧고 폭이 넓은 섬유형태를 보였으며, 유리섬유의 평균중횡비는 20.1로 가장 작은 것으로 나타났다.

섬유의 화학적 조성에 있어서 백석면은 Mg와 Si가 주성분을 이루고 Ca가 미량 포함되어 있었으며, 청석면은 Si, Fe, Mg, 이외에 Na 등이 소량 존재하는 것으로 나타났다. 갈석면은 Si와 Mg가 주성분이었고, 다른 섬유들에 비해 Fe가 가장 높았다. 투각섬석

**Fig. 5. Cumulative frequency distribution according to Mg/Si and Fe/Si in source profiles.**

면은 백석면과 같이 Si, Mg, Ca가 주성분이지만, 백석면은 구불구불한 형태, 투각섬석면은 곧은 형태를 하고 있었다. 유리섬유는 Si를 가장 많이 함유하고 있으며, Na, Ca가 다른 섬유들보다 많이 차지하고 있었다. 석면과 비석면의 중횡비 누적분포도를 확인한 결과 유리면을 제외하고 90% 이상이 중횡비 15~90의 범위에 존재하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 석면과 비석면 섬유의 오염원 분류표 자료는 추후 전문가시스템과 연계하여 실내 공기 및 각종 건축자재의 석면분류 및 정량적인 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2006년 서울시 산학연협력사업 지원과



제 (과제번호: 20065126-212)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

김수환, 김동술(1999) 실내공기 중 석면 섬유류의 분류 및 확인을 위한 전문가시스템의 개발, 한국대기환경학회지, 15(6), 703-712.

노동부(2002) 화학물질 및 물리적인자의 노출기준, 노동부 고시 제2002-8호.

노동부(2007) 석면합유제품의 제조·수입·양도·제공 또는 사용 금지에 관한 고시, 노동부 고시 제2007-26호.

유성환(1993) 건축재료에서 발생하는 석면입자의 특성 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 191-199.

이기라(1996) 서울시 지하철역 구내의 분진 및 섬유 농도에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원 석사논문.

장여진, 김동술(1997) CCSEM을 이용한 대기 중 개별분진의 분류에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 13(5), 345-353.

환경부(2004) 다중이용시설등의 실내공기질 관리법 시행규칙 별표 3.

환경부(2004) 실내공기질 공정시험방법, 환경부 고시 제 2004-80호.

Conner, T., G. Norris, M. Landis, and R. Williams (2001) Individual particle analysis of indoor, outdoor, and community samples from the 1998 Baltimore particulate matter study, Atmospheric Environment, 35, 3935-3946.

Dusinska, M., A. Collins, A. Kazimirova, M. Barancokova, V. Harrington, K. Volovova, M. Staruchova, A. Horska, L. Wsolova, A. Kocan, J. Petrik, M. Macha-

ta, B. Ratcliffe, and S. Kyrtopoulos (2004) Genotoxic effects of asbestos in humans, Mutation Research, 553, 91-102.

Health Effect Institute. Asbestos Research (HEI,IR) (1991) Asbestos in public and commercial buildings: A literature review and synthesis of current knowledge, HEI,IR, Cambridge, Massachusetts.

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.

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.

Schreier, H. (1989) Asbestos in the natural environment, Elsevier Science Publishing Co., New York, 159 pp.

Willis, R.D. (2000) SEM/EDX Data Validation, Quality Assessment, and Standard Operating Procedures. Report #TR-4425-00-01, ManTech Environmental Technology Inc., P.O. Box 12313, Research Triangle Park, NC 27709.

Wylie, 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(5), 239-252.

Yu, I.J., Y.H. Moon, N. Hisanaga, J.D. Park, and Y. Takeuchi (1998) Asbestos and non-asbestos fiber content in lungs of Korean subjects with no known occupational asbestos exposure history, Environment International, 24(3), 293-300.