

전자현미경을 이용한 건물내 비고형 표면자재의 석면 오염 및 기중 석면농도 특성조사

관동대학교 환경공학과, 가톨릭대학교 산업보건대학원*

유 성 환 · 김 현 욱*

— Abstract —

Characterization of Asbestos Content in Friable Sprayed-on Surface Material and Airborne Asbestos Concentrations in Buildings by TEM

Sung Whan Yu and Hyun Wook Kim*

*Department of Environmental Engineering, Kwandong University
Graduate School of Occupational Health, Catholic University**

Fourteen(14) large commercial buildings located in Seoul with friable sprayed-on surface insulation material on ceiling were investigated for fiber types in bulk material and for airborne fiber concentrations in buildings by transmission electron microscopy (TEM) in order to compare the results with those by polarized light microscopy (PLM) and phase contrast microscopy (PCM). The results were as follows:

1. Chrysotile asbestos was found in one bulk sample out of total 14 bulk samples collected. Glass fiber and mineral wool were the two major constituents of the bulk samples.
2. The Na-Mg-Si-Ca-Fe-Al ratios of the EDX spectra which were normalized with the Si peak were 0-1.0-10-8.3-4.0-4.0 in mineral wool and 0-5-10-21-0-0 in chrysotile asbestos, respectively.
3. Airborne fiber concentrations were log-normally distributed and the geometric mean (geometric standard deviation) fiber concentrations by TEM in the underground parking lots and inside buildings were 0.0048 f/cc(1.93) and 0.0040 f/cc(2.27), respectively with no statistical difference. In the outdoor ambient air, statistically significantly lower concentration of 0.0018f/cc(2.04) was measured.
4. The TEM/PCM ratios of airborne fiber concentrations ranged 0.5 - 2.0 for 80 % of airborne samples analyzed, and the regression equation between TEM and PCM was $PCM = -0.2724 + 1.1355(TEM)$ with the coefficient of determination $R^2 = 0.52$.

The results of this study confirmed that the sprayed-on surface insulation material found in some

※ 이 논문은 1994년도 전반기 한국과학재단의 해외 Post-Doc연수 지원에 의하여 연구되었음.

commercial buildings may possibly be contaminated with asbestos fiber. Since statistically significant relationship of fiber concentrations measured by PCM and TEM inside buildings and ambient air was found, previous results by PCM in ambient air could be used to estimate the ambient fiber concentrations in knowing the ratio of TEM/PCM.

I. 서 론

석면은 내열, 내마모, 방음, 단열성 등의 유용한 물리화학적 특성으로 다방면에 널리 사용되어 왔다. 또한 값이 싸기 때문에 벽재, 미장재, 바닥타일 등의 건축자재와 절연체로 사용되어 왔다. 그러나 인체에 대한 발암성 및 진폐 등의 유발성으로 인하여 많은 나라에서 그 사용이 금지되어 있다. 우리나라에서도 청석면 및 황석면의 수입을 금지시키고 제품에 사용을 금지시키거나 규제하고 있다. 그러나 가장 많이 통용되는 백석면의 경우는 특별한 규제가 없이 전량 수입되어 건축자재등에 약 80% 이상이 사용되고 있다 (백남원, 1994).

석면에 장기간 노출되어 유발되는 질병으로는 석면폐증, 폐암, 악성중피종 등이 소개되고 있으며, 이들 질병의 발생과 석면 섬유사이에는 양-반응 관계를 보이며, 이는 섬유의 굵기, 길이, 모양 등의 물리적인 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다 (Lippmann, 1988). 이러한 석면의 위험으로부터 석면 취급 근로자를 보호하기 위해서 많은 나라에서 석면을 취급하는 작업장에 대해서 작업장 기준을 설정하고 있고 우리나라도 석면의 종류에 따라 0.2-2.0 fibers/cm³ (f/cc)의 기준을 정하여 근로자를 보호하고 있다 (노동부, 1991).

그러나 석면함유 제품을 사용하는 건축물 실내와 일반 대기중의 석면농도에 대해서는 이스라엘이 일반 환경과 실내 농도를 0.0016 f/cc (Brenner et al., 1990)로 권고하고 있는 것과, 미국의 매사추세츠주가 일평균 0.0002 f/cc를 대기중의 허용농도로 제시하고 있는 경우 (USDHHS, 1993)를 제외하고는 대부분 외국에서도 아직 뚜렷한 기준이 마련되지 않고 있는 실정이다. 우리나라도 아직은 일반 대기와 실내환경에 대한 기준이 마련되어 있지 않고 다만 지하생활공간에 대한 환경기준 권고치로 0.01 f/cc가 마련되어 있다 (환경부, 1995).

건축자재에 사용되는 석면중 문제되는 것은 비고

형으로 건물의 표면에 살포되어 기류, 건물의 진동, 유지보수, 건물의 노후화 등의 문제로 쉽게 부스러져 유해한 석면섬유를 다량으로 발생시킬 우려가 있는 경우이다. 미국에서는 건물내에 석면의 사용을 금지하고 있으며, 건물내에 예전에 사용했던 석면 함유 건축자재가 있는 경우는 표면 보존상태가 좋으면 그 상태로 유지하도록 권고하고, 상태가 좋지 않을 경우는 제거, 밀폐, 덧씌우기 등을 권고하고 있다 (Morse, 1994). 그러나 우리나라에서는 이에 대한 인식이 낮아 아직도 건물내에 석면을 사용하고 있으며 사용된 건축자재도 유지관리가 잘 되어 있지 않고 체계적인 보수 등의 절차도 없다(김현옥, 1995).

우리나라에서 석면에 관한 연구는 아직도 매우 미약하며 그나마 대부분이 근로자를 대상으로한 작업 환경에 대한 것이 대부분이다. 지금까지 슬레이트 제조공장, 방직공장 등에 대한 석면농도가 조사되었으며 (백남원과 이영환, 1991), 일반 대기 중에서는 교통량이 많은 서울 중심지역에 대한 농도가 조사되었다 (유영식과 김종규, 1989). 그리고 최근에 와서 비고형 건축자재를 건물에 시공하는 현장에서 발생하는 석면 섬유의 농도 (유성환, 1993)와 또한 비고형 건축자재를 사용한 대형건물내에서 기중의 섬유 농도(김현옥, 1995)를 조사한 것이 전부이다. 현재까지 모든 연구는 정성분석은 편광현미경 (Polarized Light Microscopy, 이하 PLM)을, 정량분석은 위상차현미경 (Phase Contrast Microscopy, 이하 PCM)을 사용하였다.

최근에 김현옥(1995)은 건물내에서 채취한 시료 중 절반이상이 PCM의 검출한계인 0.01 f/cc이하로서 실내의 저농도 측정에는 PCM이 부적합을 지적하였으며, 또한 대기중이나 건물내에는 비석면섬유가 많이 존재하여 섬유의 종류를 판별하면서 섬유를 계수해야 하는 경우는 전자현미경 (Transmission Electron Microscopy, 이하 TEM) 방법을 사용하였을 제시하였다.

따라서 본 연구는 우리나라 대형건물내에 비고형

건축자재를 사용한 건물내에서 PCM을 이용하여 측정된 기중 섬유 농도를 TEM으로 재차 측정하여 두 방법간 공기중 석면농도를 비교하여 상관관계를 연구하고 PLM으로 정성분석한 물질시료내의 석면 함유 여부를 TEM Energy Dispersive X-ray (EDX) 분석을 통하여 정확히 파악하도록 하였다.

II. 대상 및 방법

1) 대상건물 및 측정장소

본 연구의 대상건물은 서울에 소재한 대형 건축물로 총 14곳이었으며 (김현욱, 1995), 이들 건물에서 기중 섬유농도의 측정은 각 건물내부 표면에 부서지기 쉬운 표면 살포된 건축재료가 노출되어 있는 장소로 주로 지하주차장으로 활용되는 곳과, 표면 살포된 재료가 천장 마감재로 덮혀있는 지상 실내공간 및 실내 오염과 대비할 수 있는 건물 밖의 외부 장소에서 실시하였다.

2) 방법

a. 시료채취방법

석면의 포집은 미국 NIOSH에서 추천하는 NIOSH 7400과 7402 방법을 사용하여 기중섬유를 포집하였다 (NIOSH, 1994). 이 방법은 직경 25mm, 기공 0.8 μ m, 셀룰로우스 멤브레인필터 (유효면적=385mm²)를 사용하여 50mm 카울이 장착된 포집기로 포집하는 방법으로 본 연구에서는 지하공간내 시료에 대해서 유속을 분당 1-2.5 리터로 하고 분석에 영향을 미치지 않도록 기중의 부유분진을 고려하여 충분한 시간동안 지역시료 채취방법을 이용하여 포집하였고, 옥외는 분당 16리터의 고유량 펌프를 사용하여 포집하였다.

석면 함유여부를 판정할 물질시료의 채취는 미국 EPA에서 추천하는 방법 (EPA, 1982, 1987, 1990, 1993)을 사용하여 건축재료의 균일성과 건축물의 면적에 따라 대표성이 있는 시료를 채취하도록 하였으며 시료 채취기구는 자체 제작하여 사용하였다.

b. 분석방법

기중 석면 섬유의 분석은 NIOSH 7402 (NIOSH, 1994)인 TEM방법을 사용하였으며,

TEM 시료를 준비하기 위해서는 직접전달(direct transfer)방법을 사용하였다. 이방법은 시료채취 방법에 의해 포집한 필터를 직접 아세톤/트리아세틴으로 투명하게 하고 고정(mounting)시킨 후에 vacuum evaporator 속에서 탄소코팅(carbon coating)을 한 다음에, 수술용 나이프로 가로와 세로를 약 3-4mm 크기로 절단하여 200 mesh 구리 격자(grid 평균 opening 면적=6675 mm²)위에 올려 놓았다. 탄소 코팅된 격자 위의 필터를 아세톤이 채워져 있는 Jaffe wick washer속에서 하루밤 정치한 후 격자를 꺼내서 건조시킨 후에 TEM 분석을 위한 시료로 사용하였다.

준비된 시료는 400배율의 PCM상에서 코팅 상태를 확인하고 75% 이상이 양호하다고 판단될때 TEM으로 관찰하였다. TEM상에서는 최대 10,500 배 배율에서 길이가 5 μ m 이상이고 길이대 직경비가 3:1 이상인 가늘고 긴 섬유를 세며, 세기(counting)는 격자 개구면(openings) 기준으로 농도에 따라서 최소 6면에서 최대 100면까지 세었으며, 섬유의 수가 100개를 넘으면 개구면 수에 관계없이 세기를 마쳤다.

물질시료와 기중 시료내 섬유 종류의 판정은 미국 NIOSH 7402 방법(NIOSH 1994)과 미국EPA-AHERA방법 (EPA, 1987)을 병용하였으며 섬유 굴절패턴과 EDX 분산첨두치(peak height) 결과를 해석하여 섬유의 종류를 판정하였다.

c. 결과분석

기중 섬유농도의 자료는 PC-SAS 6.11 윈도우용 프로그램을 이용하여 분석하였다. 공기중 농도의 분포검정 결과 대수 정규분포를 함에 따라 공기중 농도를 기하평균과 기하표준편차로 나타내었다. 각 측정장소별 농도의 차이는 분산분석으로 하였고 Scheffe test로 다중비교를 하였다. TEM과 PCM 간의 관계는 단순회귀분석을 실시하였다. 모든 통계 분석은 유의수준 0.05에서 실시하였다.

III. 결 과

1) 대상건물의 일반적 특징

표 1에 대상건물의 설립년도, 주차면적, 일일 평

균 주차대수, 비고형 자재의 위치 및 표면 상태, 그리고 현재 관리상태를 요약하였다. 대상건물은 85년 이전에 건축한 곳이 5곳, 86-90년도에 건축된 곳이 5곳, 그리고 90년대 이후에 건축된 곳이 4곳이었다. 지하 주차장내에 환기시설이 설치된 곳은 12곳이었으며 그중 가동 유무를 조사한 결과 절반 수준인 6곳에서만 가동되고 있었고, 나머지는 가동시키지 않고 있었다.

비고형 자재 분포 현황을 보면 조사대상 건물의 79%인 11개소에서 천장과 빔에 분무 살포되어 있었으며 이중 1개소는 벽면의 상부 절반 정도까지, 그리고 또 다른 1개소는 들어가는 통로에까지 광범위하게 살포되어 있었다. 나머지 3개소(21%)에서는 단지 빔에만 살포되어 있었다.

살포된 비고형 자재의 형태는 10개소에서 섬유상 물질이 매우 부서지기 쉬운 상태로 살포되어 있었고, 나머지 4곳에서는 결합재와 섞여져 살포되어 있었는데 손으로 만져 보았을 경우 약간 딱딱한 경우와 매우 단단한 경우가 각각 2곳이었다.

노출된 비고형 물질의 관리상태를 A: 관리상태 좋음, B: 부분적으로 파손/섬유방출 가능성 있음, C: 파손된 면적이 25% 이상인 경우와 같이 3가지로 구분하였을 때, A가 10곳, B가 3곳, 그리고 C가 1곳이었다. C로 구분된 곳은 시료 채취 당시에는 거의 40% 이상의 표면이 심하게 파손되어 있었다.

2) 물질시료의 분석 결과

건물내 노출된 표면에서 채취한 물질시료(Bulk Sample)를 NIOSH 7402 방법에 따라서 TEM으로 분석하였다. TEM의 EDX에서 Na-Mg-Si-Ca-Fe-Al에 대한 각각의 첨두치를 Si를 10으로 기준할 때 비로 환산한 결과를 표2에 수록하였다. 물질시료를 분석한 결과 14개 시료중 12개에서 유리섬유와 무기광물섬유(mineral wool)가 검출되었고, 1개 시료에서만 백석면(chrysotile)이 소량 검출되었다.

유리섬유는 Si가 주성분을 이루고 있었으며, 제품명을 알 수 없는 광물섬유는 Mg, Fe, Al 등이 소

Table 1. General characteristics of buildings surveyed

Bldg. code	Year built	Parking area(m ²)	No. of ¹⁾ cars	Venti- ²⁾ lation	Surface ³⁾ condition	Location of sprayed surface material & conditions
JG	1987	13950	250	Y	A	ceiling, soft, damaged(<5%)
SS	1985	6600	120	N	B	ceiling, soft, damaged(<10%)
DW	1994	2120	40	N	A	ceiling, soft, beam-med hard
HS	1992	9060	140	Y	A	beam only-med hard
SU	1992	1560	60	N	A	ceiling only, hard
YW	1984	1650	50	Y	C	beam, soft, damaged(>40%)
CK	1987	6600	60	Y	B	ceiling, soft, damaged(<10%)
CH	1984	8270	150	N	A	ceiling, beam & wall, hard
SY	1985	8930	30	N	A	ceiling & hallway, soft
KM	1984	330	25	N/A	A	ceiling & beam, soft
SB	1990	660	70	N	B	beam only, med-hard, damaged(<10%)
RE	1988	8760	100	Y	A	ceiling, soft
KS	1991	730	22	N/A	A	ceiling, soft
SO	1990	990	40	Y	A	ceiling, soft

NOTE: 1) No. of cars: Average number of cars parked per day

2) Ventilation operation: (Y-operating, N-Not operating, N/A-not installed)

3) Surface condition: A-well maintained, B-fair condition, C-bad condition(damaged)

soft: fibrous spray, fluffy & easily friable

med-hard: medium hard surface - cementitious spray

hard: cementitious spray (fiber mixed with bonding agent)

량 검출되고 있었다. DW, HS, CK를 제외한 대부분의 건물에서 발견된 광물섬유는 시중에서 판매되는 암면(rock wool)의 성분비(0-1.0-10-8.3-4.0-4.0)와 매우 근사하였다(유성환, 1993). 반면 DW, HS, CK 건물에서의 광물섬유는 Mg, Fe 등의 원소 침투치가 보다 높았다. CH 건물에서는 원소 성분비가 0-5-10-21-0-0의 EDX 값을 보이고 있어서 전

형적인 백석면 섬유(NIOSH, 1994)를 포함하고 있고, Si와 Ca만으로 구성된 유리섬유가 함께 섞여져 있었다. 모든 시료에서 공통으로 검출된 Ca는 결합재로 사용된 시멘트에서 비롯된 것으로 보였다.

그림 1은 물질시료에서 관찰한 무기광물섬유(KS 건물)와 백석면(CH 건물)에 대한 TEM/EDX 분석 값을 보여주고 있다. 그림 2는 지하주차장 공기중에

Table 2. Summary of results on fibers for TEM/EDX analyses

Bldg. code	Type of ¹⁾ fiber.	Normalized Elemental Profile ²⁾										
		Na	-	Mg	-	Si	-	Ca	-	Fe	-	Al
JG	GF, MW	0		2.4		10		12.8		1.6		4.0
SS	GF, MW	0		1.9		10		16.2		4.3		3.3
DW	GF, MW	0		2.5		10		52.5		7.5		5.0
HS	GF, MW	0		6.0		10		19.0		9.0		6.0
SU	GF, MW	0		1.0		10		3.0		0		2.3
YW	GF, MW	0		1.5		10		18.5		1.5		3.5
CK	GF, MW	0		1.5		10		22.3		10.0		3.1
CH	GF,	0		1.0		10		11.0		1.0		2.0
	CH,	0		5.0		10		21.0		0		0
SY	GF, MW	0		1.0		10		12.1		2.4		3.5
KM	GF, MW	0		1.0		10		27.0		2.0		3.0
SB	GF, MW	0		1.5		10		10.0		0.9		4.0
RE	GF, MW	0										
KS	GF, MW	0		1.9		10		11.9		0.9		4.1
SO	GF, MW	0		1.7		10		11.7		1.3		4.6

NOTE : 1) Type of fiber : GF-glass fiber, MW-mineral wool, CH-chrysotile

2) Normalized based on the Si spectrum, NIOSH 77402, Asbestos by TEM

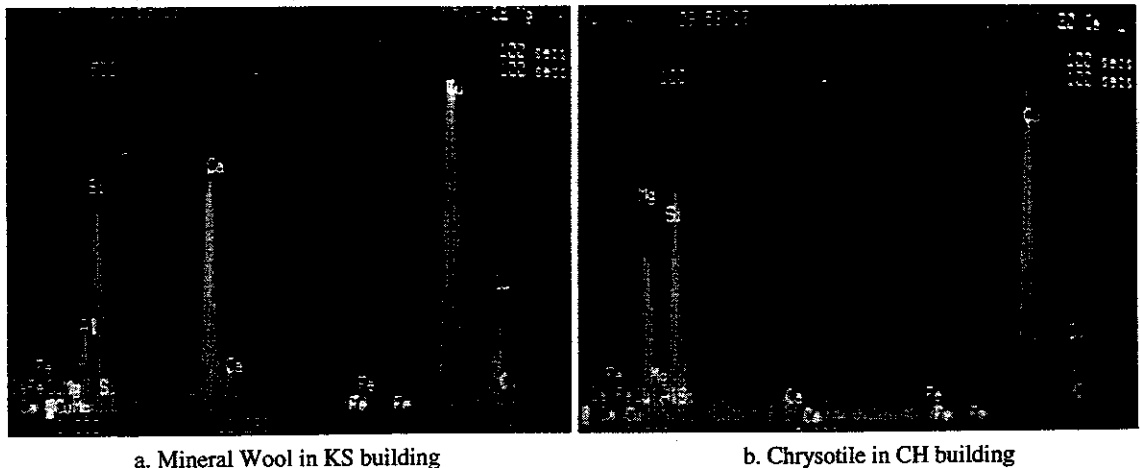


Fig. 1. Results of TEM/EDX on fiber in Bulk Sample

서 관찰된 광물섬유와 백석면의 모습이다.

3) 공기중 섬유농도의 분석결과

표 3에 기증 시료에 대한 섬유농도 분석 결과를 요약하였다. 지하주차장에서 채취한 시료 17개중 4개 (24%)는 TEM 분석을 위한 최소 공기유량 (400L) 이하의 시료이었으며, 대부분의 준비된 시료는 섬유밀도가 매우 낮아서 5 f/mm² 이하가 18개

(44%), 5-10 f/mm²가 14개 (34%), 10-15 f/mm²가 4개 (10%), 15-20 f/mm²가 2개 (5%) 그리고 20 f/mm² 이상이 3개 (7%)로서 NIOSH 7402에서 제시하는 섬유밀도인 100-1300 fiber/mm² 에 훨씬 못미치는 시료들이었다.

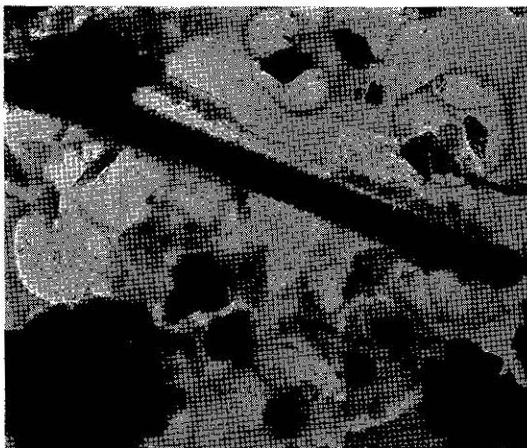
공기중 농도를 보면 지하주차장에서 0.0016-0.0147f/cc 범위였고, 실내 사무실의 농도는 0.0010-0.0151 f/cc, 그리고 실외의 주변농도는

Table 3. Summary of airborne concentrations by TEM (PCM) analyses

Bldg. code	Airborne samples TEM (PCM) - f/cc			
	Parking1	Parking2	Indoor	Outdoor
JG	-	-	0.0028 (0.0035)	-
SS	-	-	0.0076 (0.0061)	0.0016 (0.0020)
DW	-	-	0.0035 (0.0057)	0.0006 (0.0000)
HS	0.0023 (0.0044)	0.0031 (0.0025)	0.0070 (0.0076)	0.0054 (0.0099)
SU	0.0085*(0.0069)	0.0083*(0.0075)	0.0046 (0.0024)	0.0031 (0.0033)
YW	-	-	0.0086 (0.0140)	0.0042 (0.0062)
CK	-	-	0.0024 (0.0043)	0.0023 (0.0053)
CH	0.0147 (0.0134)	-	0.0151 (0.0288)	0.0010 (0.0013)
SY	0.0031 (0.0075)	0.0061 (0.0084)	0.0010 (0.0007)	-
KM	0.0051 (0.0066)	0.0060 (0.0059)	0.0113 (0.0144)	-
SB	0.0130*(0.0127)	0.0037*(0.0024)	0.0025 (0.0064)	0.0008 (0.0037)
RE	0.0065 (0.0048)	0.0016 (0.0011)	0.0023 (0.0060)	0.0020 (0.0016)
KS	0.0017 (0.0022)	0.0034 (0.0039)	0.0052 (0.0111)	-
SO	0.0036 (0.0033)	0.0083 (0.0049)	0.0011 (0.0051)	0.0015 (0.0020)

*: Sampled air volume was less than the limit of recommended volume of 400L.

*: The PCM results were taken from the article by Hyunwook Kim (1995).



a) Mineral Wool in SS building (x1,750)



b) Chrysotile in CH building (x10,500)

Fig. 2. Results of TEM on fiber obtained in parking lots

Table 4. Summary of airborne fiber concentrations by TEM analyses

	Underground Parking lots	Inside Building	Outdoor Ambient air
Number of Samples	17	14	10
GM(f/cc)	0.0048	0.0040	0.0018
GSD	1.93	2.27	2.04
Range (f/cc)	0.0016-0.0147	0.0010-0.0151	0.0000-0.0054
No.<Minimum air volume (400L)	4	0	0

GM : geometric mean,

GSD : geometric standard deviation

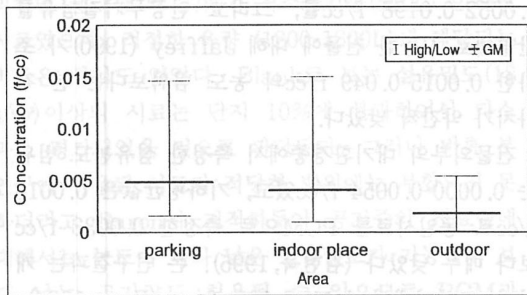


Fig. 3. Average airborne fiber concentration by area

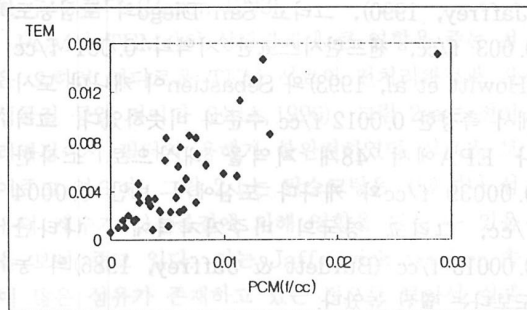


Fig. 4. Plot of Fiber Concentrations(>5 μ m in Length) determined by PCM & TEM

0.0000-0.0054 f/cc 범위였다. TEM 분석에 의한 공기중 섬유농도가 대수 정규분포를 함에 따라 각 그룹별로 평균농도를 기하평균과 기하표준편차를 이용하여 나타내었다 (표 4와 그림 3). 지하주차장에서 측정된 평균농도가 0.0048 f/cc로 가장 높았고, 건물내에서 측정된 농도가 0.0040 f/cc로 두 그룹간에 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나 건물밖 대기중에서 측정된 기하평균농도는 0.0018 f/cc를 보여 앞의 두 그룹과 비교해 통계적으로 유의하게 낮게 측정되었다 ($p < 0.01$).

4) TEM과 PCM 측정치의 비교

14곳의 대상 건물에서 채취하여 분석한 41개 시료에 대한 TEM 분석치와 동일시료에 대한 PCM 분석치와의 관계를 회귀분석한 결과 지하주차장에서 결정계수(그림 4) (R^2) 값이 0.74 ($p < 0.01$), 실내

에서 0.58 ($p < 0.01$), 외부공기에서 0.50 ($p < 0.05$)로 유의한 관계를 보였다. 측정된 장소에 관계없이 전체 농도를 대상으로 했을 때 회귀식은 $PCM = TEM \times (1.1355) - 0.2723$ ($R^2 = 0.52$) 이었다. 길이가 5 μ m 이상이고 직경비가 3이상인 섬유만을 대상으로 계수한 TEM/PCM 비는 0.2-2.2로 매우 폭넓게 분포되어 있었고 TEM/PCM 비가 0.5-1의 경우는 41.5%, 1-2 경우는 39% 이었다.

IV. 고 찰

본 연구는 우리나라 대형건물에 화재방지용이나 흡음재 등으로 천장이나 기둥 빔에 분무하여사용되고 있는 비고형 건축자재로부터 발생하는 공기중 섬유농도를 TEM으로 분석하기 위하여 실시되었다. 공기중 섬유의 종류를 쉽게 식별할수 있도록 조사대상 건물에 분무된 표면물질을 채취하여 물질시료로써 분석한 결과, 14개 시료 모두에서 유리섬유와 무기광물섬유가 발견되었으며, 그중 1개 건물에서는 백석면이 소량 포함되어 있었다. 따라서 본연구에서의 석면발견율은 7% 정도로 김현옥(1995)이 동일시료에서 PLM으로 분석한 10%의 석면발견율과 EPA에서 조사한 미국의 건물에 대한 20%를 밑돌고 있다. 이같은 결과는 PLM분석시 DW와 HS 건물에서 관찰된 백석면이 TEM 분석시에는 발견되지 않았기 때문이었다. 이러한 차이는 PLM 분석시 분석자의 분석능력, 물질시료내에 들어있는 광물질의 종류, 또는 물질시료를 분석할 때 채취부위에 따른 변동 등에 기인한 것으로 추정된다.

본 연구에서 채취된 대부분의 비고형 분무 시료에서 사용된 유리섬유와 광물섬유는 조사대상 건물이

시공되던 시기에 이미 널리 시판되고 있던 재료로 보인다. 이 같은 사실은 지하주차장에 대한 분무흡음재를 대상으로 조사한 연구 (유성환a, 1992)에서 90년대 초에 건축된 3개 건물 모두가 유리섬유와 암면으로 구성되었으며, SEM/EDX 조사에서 보인 원소성분비가 본 연구의 대상건물에 사용된 섬유와 매우 유사한 점에서도 알 수 있다. 따라서 수입되는 석면의 상당량은 건축자재중 석면섬유 자체가 직접 노출되지 않는 형태의 건축자재인 천장흡음재와 벽 내장재 등에 주로 사용되고 있을 것으로 판단된다.

석면이 사용된 자재가 직접 노출되지 않는 형태의 경우는 표면 유지상태가 좋다면 공기중으로 석면이 비산할 위험은 적을 것으로 사료되나, 표면 유지상태가 좋지 않거나 건물을 유지 보수할 때는 석면이 비산할 우려가 있음을 간접적으로 시사하고 있다. 또한 건축자재가 유리섬유와 광물섬유로 대체되지 않았던 90년도 이전에 건축한 건물들에 대해서는 석면에 대한 오염 비율이 본 조사의 결과보다 높을 수 있을 것이다.

본 조사에서 측정된 지하주차장에서의 공기중 섬유농도는 평균 0.0048 f/cc였고, 실내에서 0.0040 f/cc 그리고 건물 주변에서 0.0018 f/cc였다. 이러한 결과는 동일 건물에서 PCM으로 측정한 결과보다는 대체적으로 낮았으나 (김현욱, 1995), 분무재료가 살포된 지하 건물에서의 농도 범위 (0.001-0.0084 f/cc) 내에 속하고 있다 (유성환a, 1993). TEM으로 분석한 지하주차장에서의 농도는 측정된 시료의 89%가 PCM의 정량한계인 0.01 f/cc 이하의 농도를 보이고 있다. 또한 농도에 따라 다르나 TEM에서 한개의 섬유를 검색할 때마다 변하는 농도, 즉 분석민감도 (analytical sensitivity)인 0.005 f/cc에 못 미치는 시료수는 약 61%에 달하였다 (HEI. AR, 1990). 따라서 건물내에서와 같이 저농도 분석에는 PCM보다 TEM의 분석이 바람직한 것으로 사료된다.

대상건물내에서 TEM으로 측정된 섬유의 농도는 평균 0.0040 f/cc이었고 최대값은 0.0151 f/cc였다. 이 결과는 동일시료에 대해 PCM으로 측정한 결과치 (김현욱, 1995)와 비교할 때 훨씬 낮은 농도를 보였으나, 석면과 암면이 분무된 44층과 55층 두 건물을 대상으로 길이가 5 μ m 이상인 섬유를 TEM으로 계수한 Chatfield의 평균 농도 0.0034 f/cc, 그

리고 1986년 다른 건물내에서 조사된 평균농도 0.00243 f/cc와는 매우 유사한 농도를 보였다 (HEI. AR, 1990). 그러나 미국 EPA에서 공공건물에 대해 조사한 실내농도 0.00028-0.00056 f/cc (Hatfield et al, 1988) 그리고 Jaffrey (1990)가 인공무기질 섬유로 단열된 건물에서 측정한 농도 0.0005-0.002 f/cc와 Gazzzi, Pinchin, McCrone (HEI. AR, 1990) 등이 조사한 0.00004-0.0004 f/cc 보다는 높은 결과치를 보였다. 반면 Burdett & Jeffery (1986)는 비석면을 사용한 업무용 건물에서 0.0052-0.0198 f/cc를, 그리고 인공무기질섬유를 단열재로 시공한 건물에 대해 Jaffrey (1990)가 조사한 0.0015-0.049 f/cc의 농도 범위보다는 본 결과치가 약간씩 낮았다.

건물외부의 대기환경중에서 측정한 섬유농도 범위는 0.0000-0.0054 f/cc였고, 기하평균값은 0.0018 f/cc로 동일시료를 PCM으로 측정한 0.0033 f/cc 보다 매우 낮았다 (김현욱, 1995). 본 연구결과는 캐나다 도심지내의 농도 0.002 f/cc (Corn, 1994), 도심지 교차로에서 측정된 0.00055-0.0062 f/cc (Jaffrey, 1990), 그리고 San Diego의 도심농도 0.003 f/cc, 샌프란시스코만 지역의 0.001 f/cc (Howitt et al, 1993)와 Sebastien이 캐나다 도시에서 측정한 0.0012 f/cc 수준과 비슷하였다. 그러나 EPA에서 48개 지역을 대상으로 조사한 0.00039 f/cc와 캐나다 도심에서 보인 0.0004 f/cc, 그리고 영국의 비주거지역에서 나타난 0.00015 f/cc (Burdett & Jaffrey, 1986)의 농도보다는 훨씬 높았다.

이렇게 연구자마다 유사한 대상지역에 대한 결과값이 다른 것은 TEM에 의한 분석방법이 같다 하더라도 각 건물별 표면상태 및 건물내 활동 그리고 냉, 온방 등으로 인한 공기의 흐름 등 많은 변수가 영향을 미쳤을 것으로 추정된다. 그리고 동일시료에 대한 TEM 측정치가 PCM의 측정치보다 전체적으로 낮은 것은 많은 유리형태의 섬유가 직경이 비교적 커서 광학현미경으로 쉽게 분석될 수 있었기 때문이라고 Dodgson은 서술하고 있다 (HEI. AR, 1990). 그러나 본 연구에 보다 중요한 것은 공기중 섬유의 농도를 정밀하게 측정하고자 한 본 연구의 대상시료 자체가 작업장을 대상으로 PCM과 병행하여 사용하도록 한 NIOSH 7402 방

법과 EPA-AHERA 방법에서 권장하고 있는 기준 범위에 대부분 못 미치는 시료들이었다.

즉, 본 연구에서 보인 기중 섬유농도 분포는 우선 섬유밀도가 모두 NIOSH 에서 제시하는 측정범위 (100-1300 f/mm²)에 훨씬 못 미치고 있는 20 f/mm² 이하였다. 또한 본 시료들의 펄드당 섬유수도 필터의 Blank 수준 (5 f/100fields) 이하의 저밀도였으며, 최소한의 공기유량 (400L이하)에 밀도는 시료도 4개나 포함되었다. 아울러 물질시료와 공기중 석면 섬유를 대상으로 제정된 EPA-AHERA 방법에 의하면 본 시료의 27%가 최소공기량(560L) 이하의 시료였으며, 적절한 유량 (1200-1800L)에 해당되는 비율은 하나도 없었다. Blank로 보는 섬유밀도(18 s/mm²)이상의 시료는 단지 10%에 불과하여서 다소 과소 평가되었을 것으로 판단된다. 그러나 비록 본 연구에 사용된 시료가 적당한 범위에는 부합되지 못 하더라도 Baron이 지적하듯이 공기중의 시료들에 대해서는 농도에 따라 낮은 섬유밀도가 가능하며 보다 낮은 공기량도 허용될 수 있으므로 PCM과 TEM의 상관관계 도출을 위해 본 연구 결과가 이용될 수 있겠다 (Baron, 1993).

PCM과 TEM간의 상관관계에 큰 영향을 주는 것은 오히려 까다로운 TEM 시료의 전처리과정과 간섭물질 등일 것이다 (EPA, 1990). 그림 2.a는 전처리과정에서 필터의 용해가 불완전하였던 시료를 보여주고 있으며, 그림 2.b는 탄소코팅은 양호하나 섬유의 계수가 간섭물질에 의해 영향을 받을 수 있음을 보여 주고 있다. 이는 Jaffe-wick washer 속에 많은 섬유가 존재하고 있는 것으로 보아서 실제 전처리 과정에서 많은 섬유가 유실되고 있었다 (Burdett et al, 1983).

동일시료에 대한 TEM과 PCM의 측정치는 상관관계가 없는 것으로 일부에서 (Howitt et al, 1993)에서 밝히고 있으나, 다른 연구에서는 길이가 5 μ m 이상인 섬유에 대해서는 TEM 측정치와 PCM 측정치 사이에 일정한 상관관계가 성립될 수 있음을 주장하고 있다 (Dement et al, 1990, Schneider, 1986). 석면시멘트, 석면섬유, 석면 마찰재를 대상으로 연구하였던 Dement et al. (1990)은 TEM과 PCM에 의한 석면농도의 비교 연구에서 5 μ m이상의 섬유에 대한 TEM/PCM의 농도비가 0.5-2.0 에서 분포하고 있어서 작업장 노출지수의 측정방법으로

PCM이 매우 합당하며 TEM과 함께 사용할 수 있음을 시사하였다.

본 연구에서는 대상시료를 TEM으로 관찰하는 중 직경비가 3:1 이상이고 길이가 5 μ m 이하되는 섬유도 상당히 많이 발견되고 있었으나, 길이가 5 μ m 이상되고 직경비가 3:1 이상인 섬유만을 계수하였다. 따라서 TEM으로 계수한 유리섬유와 광물섬유는 직경이 0.5 μ m 이상이었기에 PCM에서도 관찰이 가능한 섬유들이었다. 직경이 0.5 μ m 이하의 미세한 석면섬유가 아닌 유리섬유와 무기광물섬유 등의 계수는 PCM과 TEM사이에 큰 차이를 발견할 수 없을 것으로 보여서 PCM과 TEM 간의 일정비율을 도출할 수 있다. 그러나 석면과 같이 미세한 굵기로 재차 세분되는 섬유는 TEM상에서만 관찰이 가능함으로 PCM으로 계수한 결과와 큰 차이를 보일 것으로 사료되어 TEM과 PCM 사이의 일정비율을 찾아 내는 일은 어려운 것으로 생각된다.

유리섬유와 광물섬유가 대부분인 본 연구의 TEM/PCM 비는 0.2-2.2로서 석면섬유만을 대상으로 한 Dement et al. (1990)의 연구보다 큰 폭으로 분포되고 있었으나, 80% 정도가 기율기 0.5-2.0 의 범위에 들고 있음으로 본 연구에 사용된 건물의 섬유 측정에는 PCM에 의한 농도 결과의 절반 수준을 보이는 비율을 적용할 수 있을 것으로 보인다. 따라서 직경이 0.5 μ m이상인 유리섬유 및 무기광물섬유로 구성된 시료들에 대해서는 공기중의 섬유농도를 NIOSH 7402 방법과 NIOSH 7400 방법에서 측정한 섬유농도간의 상관관계를 계산하여 PCM의 측정값을 TEM측정치로 환산할 수 있을 것으로 예측된다.

V. 결 론

서울 시내 소재 건물중 비교형 분무식 섬유재료를 사용한 건물 14개소에 대하여 비교형 물질내 섬유 형태를 TEM으로 분석하고, 지하 주차장, 건물 실내 그리고 건물 밖 대기중에서 기중 섬유농도를 TEM으로 분석함으로 동일 장소에서 PLM과 PCM으로 분석한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 조사된 14개 건물에서 채취된 비교형 물질의 섬유종류를 조사한 결과 14개 모두 유리섬유

와 무기광물섬유이었으며, 1개소에서만 백석면이 소량 함께 발견되었다.

- 2) 건물에 사용된 섬유의 EDX 원소 성분비율 (Na-Mg-Si-Ca-Fe-Al)은 무기광물섬유가 0-1.0-10-8.3-4.0-4.0 이었고, 백석면은 0-5-10-21-0-0 이었다.
- 3) 기중 섬유농도는 대수정규분포를 하고 있었으며, 가장 높은 지하주차장내에서 기하평균이 0.0048 f/cc (기하표준편차 1.93), 건물내가 0.0040 f/cc (2.27) 그리고 대기중 농도가 0.0018 f/cc (2.04)이었다.
- 4) TEM과 PCM으로 측정한 41개 시료는 조사 대상 측정장소 모두에서 통계적으로 유의한 상관관계를 보였으며, 분석대상 시료의 80%에서 TEM/PCM 섬유농도 비가 0.5-2 이었다.

이상의 결과에서 우리나라의 건물 내부에 비교형 건축자재를 사용한 건물중 대부분은 무기광물섬유와 유리섬유로서 석면 함유율은 매우 낮은 것으로 추정된다. 또한 실내와 대기중에서도 유리섬유와 무기광물섬유가 대부분을 차지하고 있어 실제 석면오염의 가능성은 매우 낮다고 볼수 있다. 공기중의 섬유가 석면이 아닌 유리섬유와 무기광물섬유일 경우에는 PCM과 TEM간의 어느 정도 상관관계가 성립됨으로 대기중 섬유농도 측정에 두가지 방법이 병행되어 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

(감사의 글: 본 연구를 수행하는데 미국 연수중 TEM 분석을 위해서 측정방법과 사진촬영 등을 적극 지원했던 신시내티 NIOSH의 Fernback, Joe 에게, 그리고 자료분석시 도움을 준 가톨릭대학교 통계학교실의 박용규 교수께 감사를 드립니다)

참고문헌

- 김현옥: 대형건물내 비교형 석면함유 건축자재에 의한 기중 석면오염 및 관리실태, 한국 산업위생학회지, 1995; 5(2):137-146
- 노동부: 유해물질의 허용농도, 노동부 고시 제 91-21 호, 1991
- 백남원: 우리나라 석면 취급근로자의 석면 폭로실태와 석면폐 발생에 관한 연구, 서울대학교 보건대학원, 노동부 직업병 예방을 위한 학술연구용역사업, 1994
- 백남원, 이영환: 석면취급 사업장 근로자의 석면폭로 특성에 관한 연구, 한국산업위생학회지, 1991; 1(2):144-153

유성환: 건축자재의 시공방법에 따라 발생하는 석면섬유와 인공무기질섬유의 특성 비교 연구, 고려대학교 박사학위논문, 1992

유성환: 건축재료에서 발생하는 석면입자의 특성연구, 한국대기보전학회지, 1993; 9(3):191-199

유영식, 김중규: 서울지역의 Asbestos 환경농도 분포, 한국대기보전학회지, 1989; 5(2): 36-41

환경부: 환경백서, 1995

Baron P.A.: Letters to the Editor, Am Ind Hyg Assoc J, 1993; 54(3):A-87-88

Brenner S, Ganor E, Anavi Z: Asbestos fibers in the ambient air of Israel. Environmental Management and Health, An International Journal 1990; 1:13-16

Burdett GJ, Jaffrey SAMT: Airborne asbestos concentrations in public buildings, Ann Occup Hyg, 1986; 30(2):185-189

Burdett GJ, Rood AP: Membrane-filter, direct-transfer technique for the analysis of asbestos fibers or other inorganic particles by TEM, Environ Sci Technol, 1983; 17(11): 643-648

Corn M: Airborne concentrations of asbestos in non-occupational environments, Ann Occup Hyg, 1994; 38(4):495-502

Dement JM, Wallingford KM: Comparison of phase contrast and electron microscopic methods for evaluation of occupational asbestos exposures, Appl Occup Environ Hyg, 1990; 5(4):242-247

Environmental Protection Agency: Interim Method for the Determination of Asbestos in Bulk Insulation Samples. EPA-600/M4-82-020, 1982

Environmental Protection Agency: Method for the Determination of Asbestos in Bulk Building Materials. EPA/600/R-93/116, 1993

Environmental Protection Agency: Interim Transmission Electron Microscopy analytical Methods - Mandatory and Nonmandatory- and Mandatory Section to Determine Completion of Response Actions. Federal Register, 1987; 52(210):41857-41893

Environmental Protection Agency: Comparison of Airborne Asbestos Levels Determined by Transmission Electron Microscopy (TEM) Using Direct and Indirect Transfer Techniques (EPA-560/5-89-004), 1990

Hatfield J, Ogden J, Stockrahm J, Leczynski B, Price B, Chesson J, Russell J, Ford P, Thomas J, Fitzgerald J, Roat R, Lee R, Van Orden D, Dunmyre G, Constant P, McHugh J: Assessing Asbestos Exposure in Public Buildings, EPA-560/5-88-002, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1988

Health Effects Institute-Asbestos Research(HEI.AR):

Asbestos in Public and Commercial Buildings: A Literature Review and Synthesis of Current Knowledge, HEIAR, 1990

Howitt DG, Hatfield J, Fishler G.: The difficulties with low-level asbestos exposure assessments in public, commercial, and industrial buildings, Am Ind. Hyg Assoc J, 1993; 54(5):267-271

Jaffrey SAMT: Levels of airborne man-made mineral fibres in U.K. dwellings. I: fibre levels during and after installation of insulation, Atmos Environ, 1990; 24A(1):133-141

Keyes D.L, Chesson J, Ewing WM, Faas JC, Hatfield RL, Hayes SM, Longo WE and Millette JR: Exposure to airborne asbestos associated with simulated cable installation above a suspended ceiling, Am Ind Hyg Assoc J, 1991; 52(11):479-484

Lippmann M: Review: Asbestos exposure indices.

Environ Resp, 1988; 46:86-106

Morse RG: Operations and maintenance practices recommended by regulatory agencies, Appl Occup Env Hyg, 1994; 9(11):793-798

National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH): Manual of Analytical Methods, 4th Ed., Asbestos and Other fibers by PCM : Method 7400, 1994

National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH): Manual of Analytical Methods, 4th Ed., ASBESTOS by TEM: Method 7402, 1994

Schneider T.: Man-made mineral fibers and other fibers in the air and in settled dust, Environ Int, 1986; 12:61-65

U.S.Department of Health and Human Services(USDHHS): Draft Toxicological Profile for Asbestos. 1993