

## 건축재료에서 발생하는 석면입자의 특성 연구

### The Characteristics of Dispersed Asbestos Fibers Produced From Building Materials

유 성 환

관동대학교 이공대학 환경공학과  
(원고접수: 1993. 6. 28)

Sung-Whan Yu

Department of Environmental Engineering,  
College of Science and Engineering, Kwandong University  
(Received 28 Jun 1993)

#### Abstract

This paper describes the results of a systematic study to determine the characteristics of particle generated from various types of asbestos containing material(ACM) and man-made fiber material(MMFM) during operations of cutting and grinding in laboratory and workplace. Tests were conducted with a specially designed glove box which allowed complete sampling of the generated asbestos fibers. Specifically, air measurements were made during ACM and MMFM installation in building. All personal air samples collected were identified by polarized light microscopy(PLM), X-ray diffraction(XRD) and scanning electron microscope with energy dispersive X-ray analysis(SEM/EDXA). Also, the samples were counted by phase contrast microscope(PCM) in order to compare the results with the permissible exposure standard for workplace.

Results indicate that the characteristics of fibers found in the roofing sheet, the ceiling and the wall insulation boards were identical to those of asbestos, while the characteristics of fibers found in the ceiling insulation board, the floor tile and the sprayed on insulation products in parking area were identical to those of rock wool. The concentrations of airborne fibers from various building materials cut by a grinder for 5 minutes were in the ranges of 0.09~1.71 fibers/cc(f/cc). The highest concentration(1.71f/cc) was found during grinding the wall insulation board which also contains rock wool. The airborne fiber concentrations generated by installing at workplace were ranged from 0.0009 to 0.029 f/cc. All asbestos fibers from the ceiling insulation board at workplace were less than 20 $\mu$ m in length and more than 20% of them had the average aspect ratio greater than 20. Therefore, for the purpose of decreasing asbestos and man-made fiber concentrations at the workplace, the ceiling and wall board should use strong binding material to increase the binding force with fiber. Also, the permissible exposure standard for workplace(2.0f/cc) in Korea should be constituted below the maximum available concentration measured at glove box.

### 1. 서 론

기원전 2500년경부터 사용되기 시작한 석면(asbestos)은 물리·화학적 특성인 고강도, 고탄성율, 단열성, 내약품성, 내알칼리성, 고절연성, 방음성, 내마찰성 등이 우수하여 절연재, 보강재, 충전재, 수지의 유통흐름을 제어하는 조절재, 분산제, 비연마제 등의 용도로 건축자재, 마찰재, 방직품, 도료 등의 공업재료로 광범위하게 이용되어 왔다(Dunnigan and Seymoar, 1990). 이중 약 80% 정도가 건축자재인 석면슬레이트, 바닥타일 및 단열재, 뿌질 단열재(sprayed insulation) 등으로 제품화되었으며 마찰재로 약 7%, 기타 방직품, 석면지 등의 재료로 사용되었다(산업기술연구원, 1992).

그러나 석면제품의 표면이 손상되면 섬유질(fibers)이 공기중으로 방출되고, 공기중에 오랜 동안 잔류하게 되면, 호흡기를 통해 체내로 들어와 석면폐증(asbestosis), 폐암(lung cancer) 및 중피종(mesothelioma) 등 불치의 질병을 발생시킨다(Mattison, 1987). 석면으로 인한 질병은 비단 석면을 취급하는 근로자뿐만 아닌 공장주변의 주민에게도 피해를 주고 있으며, 심지어는 일반 대기중에서도 저농도의 석면에 장기간 폭로되면 중피종과 그 밖의 암을 일으킬 수 있다는 보고도 있다(Enterline, 1983).

더욱이 건물의 신축이나 개축시 현장에서 사용되는 건축용 석면제품(ACM; Asbestos Containing Materials)은 연삭(grinding), 절단(cutting), 펀칭(punching), 뿌질(spraying) 등의 시공과정에서 석면 섬유질이 발생되고 있다. 석면의 유해성 때문에 세계각국은 규제를 강화하고 있다(AIA, 1987). 우리나라도 1987년 11월부터 청석면(Crocidolite), 황석면(Amosite)의 수입을 금지하였으며, 작업장 내의 환경기준을 2fibers/cc로 설정하였다(노동부, 1991). 또한 석면분석을 위한 공정시험법을 대기환경보전법에 추가로 제정하였다(환경처, 1991).

현재 석면재료 전량을 수입에 의존하고 있는 우리나라는 1980년대 중반까지 평균 연간 6만 6000톤 정도의 석면을 수입하였으나, 1991년에는 8만 8000톤으로 증가 추세를 보이고 있다(관세청, 1992). 자재에 따라 5%에서 100%의 석면을 포함하고 있는 건축자재는 1991년 현재 연간 사용량은 7만 5000톤으로 추정되며 건물 내 설치시 시공중 발생하는 석면섬유도 상당하리라고 예측되나 아직까지 규제는 가해 지지 않고 있다. 특히 건물 내에서 건축자재를 설치하는 2차 가공업체들은 대부분이 영세한 데다가 규모가 작기 때문에 그 수효조차도 전혀 파악할 수

없으며 시공과정중에 석면으로부터 이들을 보호하기 위한 방법도 강구되어 있지 못한 실정이다.

따라서 시공자와 인근 주민들의 건강을 위하여 건축자재를 설치 시공할 때 발생하는 석면의 양과 섬유 종류 및 특성을 조사할 필요성이 있다. 본 연구에서는 5가지 용도(지붕, 천장, 바닥, 벽, 내화용)로 생산되는 건축자재 중 석면제품과 인공섬유제품(MMFM; Man-Made Fiber Materials)을 포함한 15종류를 대상으로 시공할 때 발생하는 섬유의 종류를 식별하고, 다량으로 사용되는 5종류의 자재에 대해서 연삭할 때 발생하는 섬유의 최대 농도 및 특성을 조사하였고, 아울러 실제 시공중 발생하는 섬유의 농도를 조사하여 상호 비교하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험재료

우리나라에서 사용하는 건축용 내·외장재 중 용도(바닥, 천장, 벽, 지붕, 내화용)별로 가장 많이 사용되는 15종의 제품을 구입하여 본 실험의 대상재료로 삼았다. 각각의 제품의 용도 및 특성은 표 1과 같다.

#### 2.2 실험장치

자재별로 연삭시 발생하는 최대농도를 조사하기 위한 목적으로 시공방법별로 작업시 용이하도록 한 glove box를 사용하였다. glove box는 절단 등의 작업을 실행할 수 있도록 한 일종의 소형 clean room으로 Lundgren et al.(1990)이 사용한 장치를 축소하여 제작하였다. 그림 1과 같이 전면, 측면, 하부

Table 1. Classification of experimental materials.

Materials No.	Use	Goods	Density(g/cm <sup>3</sup> )*	
FL-1	Floor tile	Unknown PVC	2.04 ± 0.03	
2	"	'W'	"	2.04 ± 0.03
3	"	'H'	"	2.03 ± 0.02
4	"	'J'	"	2.05 ± 0.02
5	"	'R'	"	2.07 ± 0.02
RF-1	Roofing board	Slate	1.81 ± 0.03	
2	"	asphalt single	1.76 ± 0.03	
CP-1	Ceiling board	Tex	1.58 ± 0.03	
2	"	'S' board	0.70 ± 0.03	
3	"	'K' Tex	0.36 ± 0.03	
WA-1	Wall board	Lite	2.13 ± 0.02	
2	"	Color Lite	2.13 ± 0.02	
MF-1	Fireproof	Rock wool	0.04 - 0.20	
2	"	Unknown sprayed	0.25 - 0.36	
3	"	Glass wool	0.016 - 0.096	

\* estimated value

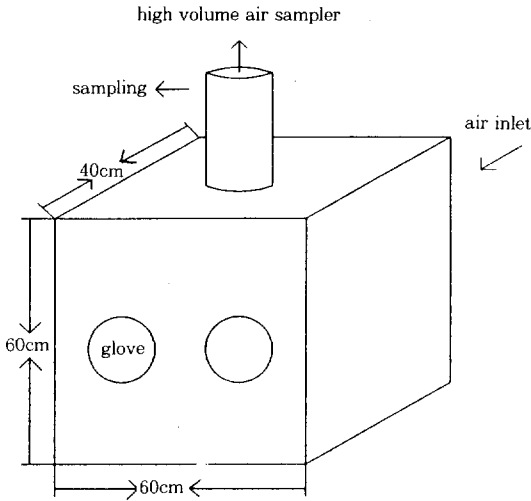


Fig. 1. Schematic diagram of glove box.

면이 투명한 유리로 된 정육면체(가로 60×세로 40×높이 60cm)로 내부에서 작업을 할 수 있으며 또한 육안으로 확인할 수 있도록 하였다. 후면과 상부면은 10mm 철판으로 밀봉되어져, 후면에서는 공기의 유입을, 상부면에서는 흡입장치를 고정하여 설치할 수 있도록 하였다. 또한 시료의 주입과 제거를 쉽게 하기 위해서 glove가 부착된 시료주입구를 전면에 결합시키고 분리할 수 있도록 제작하였다. glove box 내의 분진 등을 제거하고 일정한 유속이 유지되도록 상부에 high volume air sampler (HVAS : Model KIMOTO 120)를 연결하였고 계속해서 깨끗한 공기 유입을 위해서는 후면에 필터 (GELMAN : A/E glass fiber filter)를 고정하였다. 아울러 작업활동에 필요한 시료 지지대(support jack)와 시료를 가공하는 도구들을 내부에 설치하였다.

2.3 실험방법

건축자재에 함유된 섬유유의 종류를 식별하기 위하여 glove box 내에서 재료별로 물질시료(bulk sample) 분석을 위한 전처리로 분쇄작업을 하였다(NIOSH, 1989a; USEPA, 1982). 자재별로 발생하는 섬유발생량 실험은 glove box 내에서 약 5분간 자재를 연삭하여 절단하였다. 스톨차(砥石)의 회전속도는 현장에서 사용하는 연삭속도인 1750RPM 으로 가동시켰고, 작업시간은 현장에서의 1회 절단시간 범위인 5분으로 하였다. 발생하는 섬유시료를 채취하기 위하여 스톨차로부터 30cm 상부에 50mm cowl이 부착된 3-piece filter holder(Millipore : MAWP025AC)를 설

치하였고 여과지는 mixed cellulose ester membrane filter(Millipore : AAWP0025AC)를 사용하였다. 개인용 공기 채취펌프(MSA, Flow-Lite)는 유량을 3 l/분으로 채취시간은 5분 정도로 하였다. 1회의 절단실험이 끝난 후 HVAS를 최대 흡입 유량인 1.7m<sup>3</sup>/분으로 20분간 가동시켜 잔류하는 공기중 분진을 제거하였고 바닥에 남아 있는 큰 고형입자들은 진공청소기를 사용하여 제거하였다. 자재의 강도에 따라 RF-1, WA-1, FL-5 경우 약 10회 실시하였고, CP-1과 CP-3은 5~6회 정도 실시하였다.

13개소의 신·개축 건물의 현장을 대상으로 바닥 자재, 지붕자재, 벽 자재 및 천장 자재의 시공시 발생하는 섬유유 특성과 농도를 조사하였다. 각각의 현장에서 1~3m 떨어진 지점에, 지상 1~1.3m 높이에 개인용 공기시료 채취기 2대를 설치하고 2~3 l/분의 흡입유량으로 3시간에서 7.5시간 범위로 가동하여 시공시간 동안 발생된 섬유유를 포집하였다.

2.4 분석방법

15종의 자재별 물질시료 분석은 미국국립산업안전보건연구소(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 PLM법(NIOSH, 1989a), USEPA의 XRD법(USEPA, 1982) 그리고 AIA의 SEM/EDXA법(AIA, 1984)에 의해 섬유유를 식별(identification)하였다. PLM을 이용한 석면의 식별은 우선 현미경의 재물대를 회전시 섬유가 NE-SW(북동-남서)방향을 가리킬 때 섬유유 색이 청색이 되고 다시 재물대를 90° 회전했을 때 황색이 나타나면 석면으로 판단하였다. XRD법에서 Scan speed는 2°/분을 사용하였으며, Step scan 조건은 30KV, 15mA의 가속전압과 전류로 Cu K $\alpha$  radiation을 사용하였고, 0.1°당 40초의 preset time을 주었고 1°의 DS를 사용하여 나타난 3곳의 peak position( $^{\circ}2\theta$ ) 값을 계산하여 석면의 여부를 판단하였다. SEM을 사용하기 위한 전처리로서 우선 재료 등에 함유된 칼슘 등의 불순물을 450°C에서 회화(ashing)처리한 후 코니칼비커에 담아 초음파세척기 내에서 약 15분간 분산시키고 이를 다시 필터에 여과시켜 투명처리한 다음 Carbon과 Gold로 코팅 처리하였다. 전처리된 필터상의 섬유유를 SEM상에서 확인하고 이어 EDXA에 나타난 peak의 위치와 크기를 계산하여 석면의 여부를 결정하였다.

필터에 포집된 공기중의 섬유유 농도 측정은 NIOSH의 공정시험법인 'Method 7400' (NIOSH, 1989b)에 따라 위상차 현미경(PCM; NIKON)을 사용하였으며, Walton-Beckett graticule(Graticule; G22 Type)을 삽입하여 작업환경기준과 비교

하기 위하여 'A'규칙에 따라 길이 5 $\mu$ m 이상, 중형비 3 이상되는 섬유만을 계수하였다. 아울러 필터 상에 포집된 섬유는 물질시료 분석과 동일하게 AIA의 SEM/EDXA방법(AIA, 1984)을 사용하여 전처리시킨후 석면섬유를 식별하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자재별 섬유의 종류

국내에서 일반적으로 많이 사용되는 염화비닐계 열의 바닥타일(FL-1, 2, 3)은 섬유상 입자를 발견할 수 없었으나 FL-4, 5 자재에서는 섬유상 입자가 다량 포함되어 있었다. 지붕용 자재인 슬레이트(RF-1)와 아스팔트싱글(RF-2)에서는 각각 석면과 유리면으로 보이는 섬유가 보였고, 천장용도의 CP-1과 CP-3에서는 각기 석면과 암면의 입자가 포함되어 있었으나 CP-2에서는 섬유상 입자가 보이지 않았다. 벽·칸막이 용도로 사용되는 WA-1, 2 자재에서는 석면입자가 시멘트 등의 결합물질과 함께 다

량 식별되었다. 내화용으로 지하시설 등에 사용되는 MF-1, 2는 동일한 암면 섬유를 보였고, MF-3은 유리면으로 구성되었다. 이상 15 종류의 실험자재에 대해서 PLM, XRD, SEM/EDXA 분석결과를 종합하면 표 2와 같이 11 종류의 자재가 섬유상 물질을 포함하고 있었다. 그림 2는 슬레이트(RF-1)에 포함된 섬유의 XRD,SEM/EDXA 결과를 보여주고 있으며, 그림 3은 천장흡음판(CP-3)에서 보인 암면섬유의 특성을 보여주고 있다.

3.2 자재별 섬유의 발생 농도 및 특성

건축자재별로 발생이 가능한 섬유의 최대 농도를 측정하기 위하여, 자재별로 5분간 연삭(grinding)하여 절단하였을 때 분쇄되어 발생하는 공기중 섬유 농도를 표 3에 나타내었다. 연삭부분으로부터 30cm 떨어진 공기중에서 가장 높은 섬유농도를 발생시키는 자재는 암면을 사용한 CP-3으로 평균 1.71f/cc를 보여 다른 자재에 대해 유의차를 보였다(p<0.001). 다음으로 농도가 높은 자재는 석면을

Table 2. Analysis results for identification of fiber contained in construcion materials using by XRD and SEM/EDXA.

Type of Materials	Identification of fiber	K-ratio by SEM/EDXA						Peak Position by XRD(° 2 $\theta$ )
		K <sub>Si</sub> /K <sub>Si</sub>	K <sub>Mg</sub> /K <sub>Si</sub>	K <sub>Ca</sub> /K <sub>Si</sub>	K <sub>Fe</sub> /K <sub>Si</sub>	K <sub>Al</sub> /K <sub>Si</sub>	K <sub>Cu</sub> /K <sub>Si</sub>	
FL-4	Unknown MMF	1	—	0.60	—	0.24	0.07	12.4, 24.0, 36.0
FL-5	Rock Wool	1	0.13	1.27	—	0.31	—	10.5, 23.0, 36.0
RF-1	Chrysotile	1	0.71	0.57	0.08	—	—	12.1, 24.3, 36.0
RF-2	Glass fiber	1	—	—	—	—	—	—
CP-1	Chrysotile	1	0.61	0.57	0.07	—	—	12.1, 24.3, 36.5
CP-3	Rock wool	1	0.12	0.96	0.05	0.34	—	13.2, 21.7, 27.7
WA-1	Chrysotile	1	0.55	0.61	0.06	—	—	12.1, 24.4, 36.0
WA-2	Chrysotile	1	0.55	0.61	0.06	—	—	—
MF-1	Rock wool	1	0.09	0.77	0.05	0.35	—	13.3, 21.4, 27.2
MF-2	Rock wool	1	0.10	0.88	0.03	0.35	—	13.0, 21.7, 27.7
MF-3	Glass fiber	1	—	—	—	—	—	—

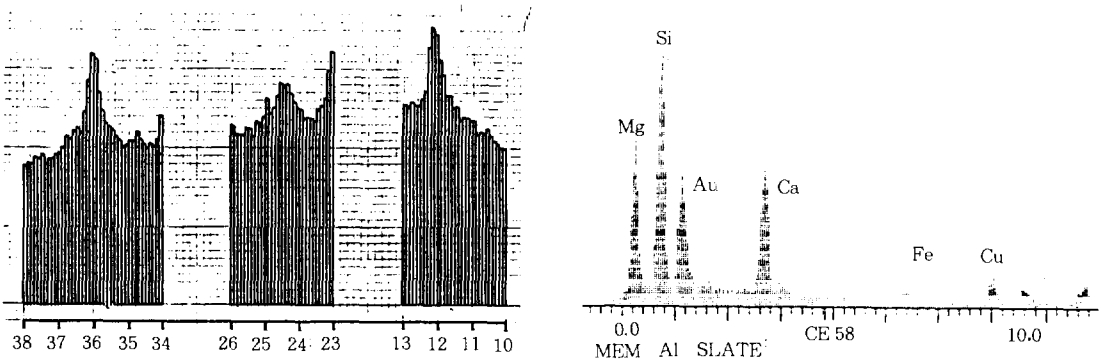


Fig. 2. Results of XRD and SEM/EDXA on asbestos fiber contained in slate(RF-1).

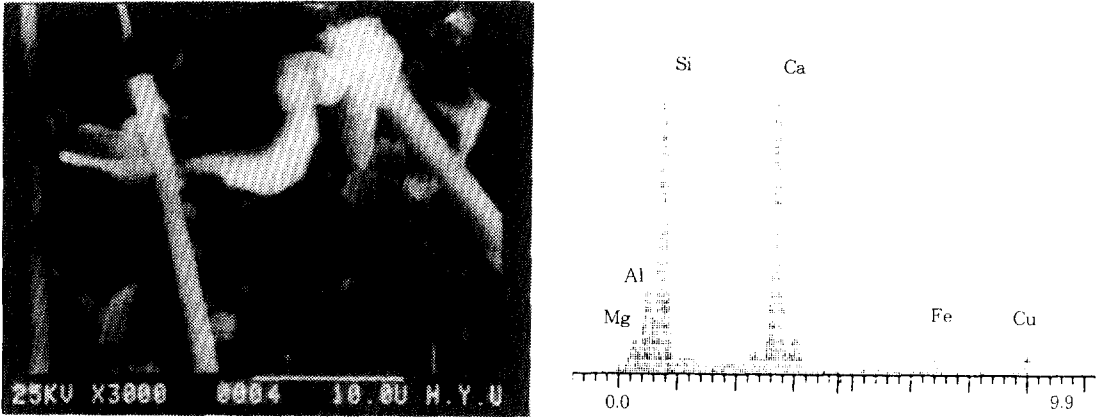


Fig. 3. Results of SEM/EDXA on rockwool fiber contained in ceiling board(CP-3).

Table 3. Airborne fiber concentration by type of materials on grinding in glove box.

Type of Materials	Average fiber concentration by grinding(f/cc)				n
	GM	84.1%	GSD	Range	
RF-1	0.184	0.284	1.54	0.072 - 0.405	18
WA-1	0.21	0.35	1.67	0.087 - 0.463	21
CP-1	0.11	0.18	1.64	0.055 - 0.293	19
CP-3	1.71*	2.70	1.59	0.590 - 3.723	15
FL-5	0.09	0.17	1.89	0.043 - 0.286	28

\* p<0.001

사용한 WA-1로 평균치는 0.21f/cc였다. 슬레이트(RF-1)를 연삭할 때의 공기중 석면농도는 평균 0.184f/cc였으며 최대농도는 0.405f/cc였다. 간섭물질이 많은 천장텍스(CP-1)은 평균농도가 0.11f/cc로 범위는 0.055~0.293f/cc였고, 가장 낮은 농도를 보이는 FL-5 시료는 평균 0.09f/cc로서, 범위는 0.043~0.286f/cc였다. FL-5 시료는 재질이 매우 단단하며 표면이 비닐 등으로 코팅되어 있어서 훼손된 단면에서 발생된 섬유가 다른 자재에 비해 상대적으로 매우 낮은 것으로 보인다. 우리나라의 작업장 내 허용농도인 2f/cc를 기준으로 볼 때, 모든 자재를 연삭할 때 발생하는 평균농도는 허용기준 내였으나, CP-3 자재만은 84.1%를 보이는 농도가 2.7f/cc로 허용기준치를 상회하였다. 그러나 미국 OSHA의 0.2f/cc를 기준할 때는 CP-3, WA-1이 보인 평균치가 기준을 초과하였다(US OSHA, 1986).

자재별로 연삭시 발생된 공기중 섬유의 길이와 종횡비의 분포는 대수 정규분포한다고 Leidel et al.(Bragg et al., 1986)은 밝혔다. 이에 따라 자재별로 연삭시 발생하는 섬유길이의 분포 상태를 대수 확률그래프에 표시하여 얻은 대표치로서 기하평균

치(geometric mean; GM)와 기하표준편차(geometric standard deviation; GSD)를 산출하여 표 4에 나타내었다.

자재별로는 CP-1과 CP-3에서 발생되는 섬유의 길이가 30~31 $\mu$ m로 가장 길었고, FL-5에서 발생되는 암면이 12 $\mu$ m로 가장 짧았다. 이같은 현상은 발생섬유농도에서와 마찬가지로, 시멘트로 강하게 결합된 자재를 가공할 때 마모단면이 상대적으로 다른 재료에 비해 매우 작기 때문으로 보인다. 같은 암면섬유를 사용한 CP-3는 FL-5에 비해 길이가 2.5배나 되었고, 석면섬유를 사용한 제품은 CP-1이 가장 길었고 RF-1, WA-1 순으로 길이가 감소하

Table 4. Geometric mean(GM) and geometric standard deviation(GSD) of fiber size by type of materials on grinding in glove box.

Type of Materials	GM, $\mu$ m	84%, $\mu$ m	GSD
RF-1	21	51	2.43
WA-1	15.1	43	2.85
CP-1	31	90	2.90
CP-3	30	93	3.10
FL-5	12	34	2.83

Table 5. Distribution of aspect ratio by type of materials on grinding in glove box.

Aspect Ratio	RF-1		WA-1		CP-1		CP-3		FL-5	
	cum.		cum.		cum.		cum.		cum.	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3~5	0.6	0.6	2.9	2.9	1.8	1.8	12.6	12.6	32.1	32.1
6~10	13.7	14.3	17.7	20.6	14.0	15.8	16.6	29.2	36.2	68.3
11~15	19.0	33.3	20.2	40.8	8.8	24.6	19.2	48.4	11.6	79.9
16~20	17.3	50.6	14.8	55.6	17.5	42.1	11.6	60.0	6.8	86.7
>20	49.4	100	44.4	100	57.9	100	40.0	100	13.3	100
Mean	17		16		21.5		14		5.5	

\* Cum. = Cumulative

였다. 따라서 2종류의 섬유를 사용한 자재 모두에서 밀도가 작을수록, 섬유의 크기는 길어지고 있어 건축기술자에게 폭로되는 긴 섬유량을 통제하기 위해서 CP-1, CP-3과 같은 낮은 밀도의 자재를 설치할 때 시공방법을 고려해야 할 것이다.

중형비의 분포를 표 5에 요약하였다. 표에서 보듯이 RF-1, WA-1, CP-1, CP-3는 40% 이상의 섬유가 중형비 20 이상을 보였는데 평균중형비에서 CP-1 자재가 가장 높은 21.5이고 다음으로 RF-1이 17, WA-1이 16, CP-3는 14였다. FL-5는 평균중형비가 5.5로 가장 낮았고 20% 이상의 중형비를 보이는 섬유의 비율도 낮았다. 따라서 절단시 흡입됨으로 보다 높은 유해성을 보이는 자재는 RF-1, WA-1과 CP-1, 3으로 보인다. 바닥자재들은 중형비 3~10에서 가장 큰 분포를 보였다. 특히 암면으로 구성된 CP-3, FL-5는 높은 중형비를 보이는 입자들이 ACM 자재와 비교할 때 상대적으로 낮은 비율을 보였다. 이는 절단시 석면 섬유질이 직경이 작고 길이가 긴 개개의 섬유로 조각되는 것과 달리, 길이만이 잘게 부서지면서 직경은 변하지 않는 non-asbestiform 형태의 인공무기질섬유의 특성과 관련이 깊은 것으로 보인다.

### 3.3 시공현장에서의 섬유농도 및 특성

건물용도가 각기 다른 13개소에서 천장, 바닥 및

벽 등에 건축자재를 설치, 시공할 때 발생하는 섬유의 농도를 자재별 시공방법에 따라 표 6에 요약하였다. 가장 높은 농도를 보이는 자재는 천장용(CP-3)자재를 시공할 때로 평균 0.029f/cc의 농도를 보였으며 다음으로 벽·칸막이 자재(WA-1)를 연삭 시킬때 평균 0.018f/cc의 농도를 보여 다른 자재의 농도에 대해 유의한 차이를 보였다( $p < 0.05$ ). 그리고 천장텍스자재(CP-1)를 시공할 때는 0.005f/cc의 농도를 보였다. 지붕용(RF-1)자재와 바닥용 타일(FL-5)은 0.0018f/cc 이하의 낮은 농도를 발생시켰다. 시공중 사용된 작업도구는 밀도가 큰 WA-1, RF-1 등은 슛돌차를 사용하여 절단하였고, 밀도가 작은 CP-1, CP-3, FL-5는 절단기(cutter)를 사용하여 절단하였다. 시공현장에서 발생한 공기중 섬유의 농도가 실험실에서 슛돌차로 5분간 절단시 보인 농도의 1/12~1/570 정도로 큰 차이를 보이고 있다. 이는 현장에서 시료를 채취한 개인용 공기 채취기의 위치가 시공 인부들로부터 1~3m 떨어진 곳이고, 지상으로부터 1~1.3m 상공이었기 때문에 시공인부의 안면부분인 호흡구역에서의 공기중 시료가 아닌 장소시료(area sample)로 준비되었기 때문으로 보인다. 또한 시공현장에서의 섬유농도는 실제 PCM에 의한 측정 한도를 벗어난 저농도로서 현미경에 의한 측정오차 그리고 채취기의 위치와 호흡효율 등을 제고한다면 이보다 훨씬 높은 농도를

Table 6. Airborne fiber concentration by type of materials on workplace.

Type of Materials	Average fiber concentration produced by installation(f/cc)					
	Work 1	Work 2	Work 3	GM	Range	n
RF-1	0.0005	0.0016	0.0035	0.0018	0.000 - 0.0038	6
WA-1	0.010	0.018	0.022	0.018*	0.010 - 0.029	4
CP-1	0.002	0.004	0.012	0.005	0.002 - 0.015	6
CP-3	0.029	-	-	0.0290*	0.019 - 0.038	2
FL-5	0.0004	0.0012	0.0013	0.0009	0.000 - 0.0018	6

\*  $p < 0.05$

보이리라 생각된다(Lundgren et al., 1991a, b).

시공중 발생하는 공기중 섬유유 의 크기 분포를 표 7과 표 8에 요약하였다. 천장자재(CP-3)를 설치할 때 압축공기를 사용시 발생하는 섬유유 길이는 평균 80 $\mu$ m로 매우 긴 반면, CP-1을 절단기로 시공중에는 이보다 짧은 21 $\mu$ m를 보였다. 또한 벽자재(WA-1), 바닥재(FL-5), 천장재(RF-1)에서는 섬유유 길이가 14.5~21 $\mu$ m로 보다 짧았다. 분쇄되어 발생된 섬유유 의 중량비(표 8)를 보면 천장재(CP-3)가 20 이상을 중량비 비율이 80.9%로 가장 높았고, 벽자재(WA-1)가 53.8%를 보여서 길이가 길거나 직경이 큰 섬유유를 발생시키고 있는 반면, 천장재(CP-1), 바닥재(FL-5) 및 지붕재(RF-1) 등은 26.3% 이하의 보다 낮은 비율을 보였다. 그러나 중량비가 16 이상인 비율은 전체의 40% 이상을 차지하고 있어 여전히 흡입되어 유해성이 큰 입자의 형상을 보이고 있다. 특히 CP-3를 시공시 압축공기를 이용한

설치방법이 평균 중량비 값이 37을 보임으로 자재에 큰 충격을 가하는 것으로 보여서 작업 후 공기중에 노출되어 장시간 체류시는 일상활동으로 인한 2차적인 마모 및 충격으로 보다 작고 긴 섬유로 세분되어 인체에 흡입될 가능성이 증가할 것으로 생각된다.

Table 7. Geometric mean(GM) and geometric standard deviation(GSD) of fiber size by type of materials on workplace.

Type of Materials	Type of Work	GM, $\mu$ m	84.1%, $\mu$ m	GSD
RF-1	grinder	14.5	50	3.45
WA-1	grinder	16	37	2.31
CP-1	cutter	21	48	2.28
CP-3	air pin	80	150	1.87
FL-5	cutter	21	43	2.05

Table 8. Distribution of aspect ratio by type of materials on workplace.

Aspect Ratio	RF-1		WA-1		CP-1		CP-3		FL-5	
	%	Cum.	%	Cum.	%	Cum.	%	Cum.	%	Cum.
		%		%		%		%		%
<3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3~5	6.7	6.7	8.8	8.8	5.3	5.3	0	0	15.4	15.4
6~10	13.3	20.0	17.6	26.4	21.0	26.3	3.6	3.6	23.1	38.5
11~15	13.3	33.3	11.0	37.4	21.1	47.4	8.3	11.9	23.0	61.5
16~20	26.7	80.0	8.8	46.2	26.3	73.7	7.2	19.1	15.4	76.9
>20	20.0	100	53.8	100	26.3	100	80.9	100	23.1	100
Mean	20		19		12		37		10	

3.4 시공현장 및 발생실험간의 발생량 비교

자재별 발생실험 및 시공현장에서 실측한 농도를 그림 4에 비교하였다. 본 실험실에서 측정된 자재별 발생량은 5분간 연삭시켜 절단하였으므로 실제 작업현장에서의 해당 시공시간과 시공방법에 대한 최대 발생가능량으로 볼 수 있겠다. 실측한 시공현장의 농도는 자재별 발생량의 1/12~1/750 정도로 큰 차이를 보이고 있는데 이는 시공방법 및 도구의 차이, 시료 채취 시간과 채취 위치 등으로 생길수 있다. 즉 대부분의 현장이 외부와의 공기 흐름이 원활한 상태에서 주위로 쉽게 분산되는 것으로 보며, 개인용 공기 채취기의 흡인유량이 충분치 못한 것으로 보인다. 반면 실험실은 좁은 공간에서의 발생량중 상당량이 포집가능하기에 상대적으로 더 높은 섬유농도를 보인 것으로 생각된다. 시공현장과 자재별 발생 가능량과의 측정치를 상호 비교한 문헌은 없으나 Lundgren et al.(1991b)이 바닥타일을 대상으로 조사한 유사한 모형실험결과와 비교하면 대체

로 시공현장에서 ACM과 MMFM을 설치할 때 발생하는 농도는 매우 낮아 PCM의 측정한계인 0.02f

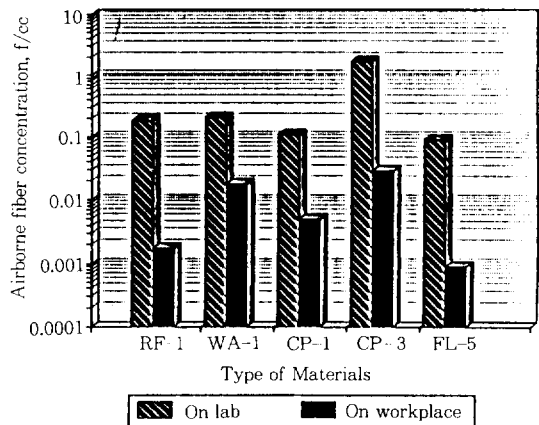


Fig. 4. Comparison of fiber concentration by type of materials on workplace and in glove box.

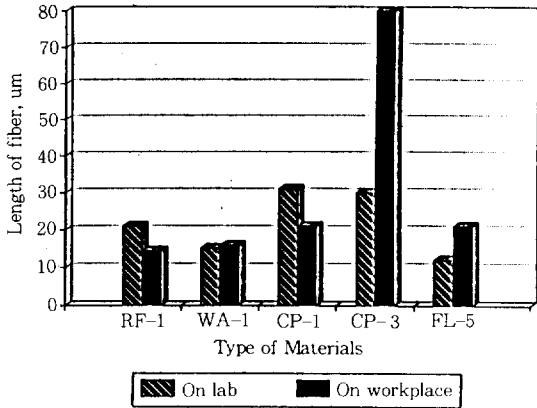


Fig. 5. Comparison of fiber size by type of materials on workplace and in glove box.

/cc를 벗어난 농도로 SEM과 TEM 등에 의한 측정 분석만이 가능하다고 보았다. 실험실 내에서 ACM과 MMFM를 연삭할 때의 발생농도는 CP-3과 WA-1이 매우 높았으나 우리나라 작업장의 허용농도 기준인 2.0f/cc에는 미치지 못하여 실제 시공중 발생하는 섬유는 어려운 실정이다. 따라서 미국 OSHA의 기준인 0.2f/cc와 같이 낮게 재설정되어야만 효과적인 규제가 가능하리라고 사료된다.

WA-1, CP-1, RF-1 석면제품은 실험실과 시공중에 발생한 섬유의 크기와 분포비율이 비슷하였으나, CP-3과 FL-5는 큰 차이를 보이고 있어 실험실 내에서의 절단방법보다 시공중 설치방법이 매우 부주의한 것으로 보인다(그림 5). 또한 이같이 ACM과 MMFM 사이에 발생섬유의 크기가 상이한 것은 밀도가 작은 자재일수록 섬유 길이가 길은 결과를 보여서, 이는 분쇄시 섬유 길이가 같은 절단방법에서도 자재에 사용된 섬유 결합물질과 깊은 관련이 있는 것으로 생각된다. 특히 바닥용(FL-5)자재는 연삭시와 시공중에서 발생한 섬유가 모두 크기가 짧고 종횡비가 낮은 특성을 보이고 있었다. 이같은 섬유는 자재속에서 쉽게 분리되어 이탈되고 MMFM의 특성과 관련된 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

석면섬유와 인공무기질섬유를 사용한 건축자재를 시공할 때에 발생하는 섬유의 종류를 식별하기 위하여 지붕, 천장, 바닥, 벽, 내화용으로 사용되는 건축자재중 15종류를 대상으로 실험실에서 물질 시료 분석을 하였고, 이중 섬유상을 보이는 5종류의 대상 자재에 대한 발생실험과 13개소의 시공현장에서

발생되는 섬유의 농도 및 특성을 비교 조사하였다. 발생한 모든 섬유의 식별은 편광현미경(PLM), 주사전자현미경(SEM/EDXA), X-선 회절(XRD)방법을 사용하였고 농도는 현재 작업장에서 적용되는 작업환경기준과 비교하기 위하여 위상차현미경(PCM)으로 계수하여 결정하였다. 자재별 섬유의 종류, 자재별 발생실험 그리고 시공현장에서의 농도 조사에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 자재별로 구성된 물질중 지붕용(RF-1), 천장용(CP-1), 벽·칸막이용(WA-1, 2)은 석면(chrysotile)섬유를 포함하였고, 바닥타일용(FL-5), 천장용(CP-3), 뽕질용(MF-2)에는 암면(rockwool)섬유를 포함하고 있었다.

2) SEM/EDXA를 사용한 결과 발생한 석면 섬유는  $K_{Mg/Si}$  비가 0.55~0.71,  $K_{Fe/Si}$  비가 0.06~0.08을 보였고, 암면섬유는  $K_{Mg/Si}$  비가 0.09~0.13,  $K_{Al/Si}$  비가 0.31~0.35였다. XRD를 사용한 결과 석면섬유는 Peak Position( $2\theta$ )이 12.1, 24.3~24.4, 36.0~36.5의 3곳에서 발생하였고, 암면섬유는 10.5~13.2, 21.4~23.0, 27.2~36.0에서 발생하였다.

3) 5분간 연삭할 때의 자재별 발생량은 천장(CP-3)(1.71 f/cc) > 벽·칸막이(WA-1)(0.21f/cc) > 지붕(RF-1)(0.184 f/cc) > 천장텍스(CP-1)(0.11f/cc) > 바닥용(FL-5)(0.09f/cc) 순이었다. 시공현장에서의 발생농도는 천장(CP-3)(0.029f/cc) > 벽(WA-1)(0.018 f/cc) > 천장텍스(CP-1)(0.005f/cc) > 지붕(RF-1)(0.0018f/cc) > 바닥(FL-5)(0.0009f/cc) 순이었다.

4) 시공현장에서 천장용(CP-3)자재를 설치할 때 발생하는 암면섬유는 다른 자재와 비교할 때 길이가 가장 긴 80 $\mu$ m를 보였고, 종횡비 20 이상을 보이는 비율도 80.9%로 높아서, 작업 후 공기중에 장시간 노출될 경우 일상적인 활동 등으로 인한 2차 충격으로 보다 작고 긴 섬유를 발생시켜 인체에 흡입될 가능성이 클 것으로 사료된다.

5) 현재 우리나라의 건축현장에서 발생하는 섬유 농도를 규제하는 기준이 설정되어 있지 않으나, 미국의 건축현장 기준인 0.2f/cc에 준할 때 연삭 가공시 발생하는 농도는 자재에 따라 이를 상회함으로써 시공현장에서의 섬유 농도를 감소시키기 위하여 현재 적용중인 작업환경기준(2.0f/cc)은 재설정되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감 사

이 논문은 1990년도 문교부지원 한국학술진흥재단의 지방대육성 학술연구조성비에 의하여 연구되



있음.

참 고 문 헌

- 관세청(1992) 무역통계연보.
- 노동부(1991) 유해물질의 허용농도, 노동부 고시 제91-21호.
- 산업기술연구원(1992) 석면의 사용규제 및 대체품 개발현황, 세계기술뉴스 브리프, 115(92-31).
- 환경처(1991) 대기오염 공정시험방법, 환경처 고시 제91-73호.
- AIA(1984) Method for the Determination of Airborne Asbestos Fibres and Other Inorganic fibres by Scanning Electron Microscopy, AIA Health and Safety Publication, RTM 2.
- AIA(1987) Summary of Main Features of Asbestos/Health Regulations at the Workplace, AIA Information Memorandum(AIM) No. 3 /80.
- Bragg, G. M. and R. G. Carothers (1986) The Control of Asbestos Dust, The Asbestos Institute, Quebec.
- Dunnigan, J. and N. K. Seymoar (1990) A Scientific Update on Asbestos and Health, The Asbestos Institute.
- Enterline, P. E. (1983) Cancer Produced by Nonoccupational Asbestos Exposure in U. S. A., J. APCA., 33(4), 318-322.
- Lundgren, D. A., R. W. Vanderpool, and B. Y. H. Liu (1990) Aerosol Generation from the Sanding, Cutting and Breaking of Floor Tiles, Part. Part. Syst. Charact., 7, 121-126.
- Lundgren, D. A., R. W. Vanderpool, and B. Y. H. Liu (1991a) Measurement of Asbestos Fiber Concentration above Floor Tile, Part. Part. Syst. Charact., 8, 229-232.
- Lundgren, D. A., R. W. Vanderpool, and B. Y. H., Liu (1991b) Asbestos Fiber concentrations Resulting from the Installation, Maintenance and Removal of Vinyl Asbestos Floor Tile, Part. Part. Syst. Charact., 8, 233-236.
- Mattison, M. L. (1987) Asbestos and Asbestos Related Diseases, Asbestos Information Centre.
- NIOSH (1989a) NIOSH Manual of analytical Methods: Asbestos(Bulk): Method 9002.
- NIOSH (1989b) Asbestos Fibers in Air: Method 7400, DHHS(NIOSH) Pub. No. 84-100.
- US Department of Labors, OSHA (1986) Occupational Exposure to Asbestos, Tremolite, Anthophyllite and Actinolite, 29 CFR parts 1910 and 1926, Occupational Safety and Health Standards, Fed. Reg. 51, 22612.
- USEPA (1982) Interim Method for the Determination of Asbestos in Bulk Insulation Samples, EPA-600/M4-82-020.