

## 유리섬유 단열재 제조업 근로자의 공기중 유리섬유 폭로 특성 및 평가 방법에 관한 연구

신용철 · 이광용 · 박천재 · 이나루 · 정동인 · 오세민  
산업보건연구원

## Characterization and Evaluation of Worker's Exposure to Airborne Glass Fibers in Glass Wool Manufacturing Industry

Yong Chul Shin, Gwang Yong Yi, Chon Jae Park,  
Na Roo Lee, Dong In Jeong, and Se Min Oh  
*Industrial Health Research Institute*

### ABSTRACT

To characterize worker's exposure to glass fibers, to find the correlation between airborne total dust concentrations and fiber concentrations and to recommend an appropriate evaluation method for worker's exposure to fibrous dusts in glass wool industry, we carried out this study. Average respirable fiber levels at five factories were 0.013-0.056 f/cc, and fairly below the OSHA PEL, 1 f/cc. A factory showed the lowest airborne fiber level, 0.013 f/cc, which was different significantly from those of other factories of which average fiber concentration was 0.046 f/cc. The cutting and grinding operations of insulation products resulted in higher airborne fiber concentrations than any other processes ( $p < 0.05$ ). To characterize airborne fiber dimension, fiber length and diameter were determined using phase contrast microscope. The geometric means of airborne fiber lengths were 42-105  $\mu\text{m}$ . One factory had airborne fibers whose length distribution ( $GM = 105 \mu\text{m}$ ) was different from those of other factories ( $GM = 42-50 \mu\text{m}$ ). The percentages of respirable fibers less thinner than 3  $\mu\text{m}$  were 38.9-90.9% at four factories, and two factories of them had the higher percentages than others. The findings explain for variation of airborne fiber diameters between factories. On the other hand, between the processes were the difference of fiber-length distributions observed. The cutting and grinding operations showed shorter fiber-length distributions than the fiber forming one. However, fiber-diameter distributions or respirable fiber contents were similar in all processes. The airborne fiber concentrations and the dust concentrations had relatively weak correlation ( $r = 0.25$ ), thus number of fibers couldn't be expected reliably from dust amount. Fiber count is appropriate for assessing accurate exposures and health effects caused by fibrous dusts including glass fibers. Ministry of Labor have established occupational exposure limit to glass fibers as nuisance dust, but should establish it on the basis of respirable fiber concentration to provide adequate protection for worker's health

**Keywords:** airborne glass fibers, worker's exposure to glass fibers, respirable fibers, airborne fiber dimension

### I. 서 론

인조섬유(man-made mineral fibers, MMMF)는 산업이나 일반 생활에서 널리 이용되고 있는 물질이다. 인조섬유는 기본적으로 암석, 점토, 모래로부터 만들어지는 비결정형의 섬유상 무기 물질에 대한 명

칭으로 유리섬유(glass fiber, fibrous glass), 암면(rock wool), 내화성 세라믹 섬유(refractory ceramic fiber) 등이 있다.<sup>1,2)</sup>

유리섬유는 인공적으로 만들어진 다양한 종류의 borosilicate fiber를 통칭하는 용어로. International Agency for Research on Cancer(IARC)에서는 유리

섬유를 연속상의 섬유(continous filament 또는 textile)와 유리면(glass wool) 등 두 군으로 분류하고 있다.<sup>30</sup> International Programme on Chemical Safety (IPCS)와 International Labor Organization(ILO)은 연속상의 섬유, 보온면(insulation wool, glass wool) 및 특수 섬유(special purpose fiber, SPF) 세가지 종류로 분류하고 있다.<sup>159</sup>

유리면은 일반적으로 단열 및 방음용으로 널리 이용되고 있으며, 이와 관련된 제품으로는 파이프 보온재, 덕트 보온재, 공기 여과재, 천정 단열재, 자동차, 항공기, 주방기구 및 냉장고의 단열재 등이 있으며 제품은 솜(batt), 매트(mat 또는 blanket), 살포용 형태로 생산되고 있다. 내화성의 세라믹 섬유는 용해로와 같은 고온 설비의 단열재로 사용되고 있다.<sup>120</sup>

인조섬유의 건강 장애는 피부자극 작용이 가장 일반적이며 눈, 상기도에도 자극을 유발할 수 있다.<sup>121</sup>

유리 섬유, 압면, 슬래그 면에 폭로된 근로자를 대상으로 실시된 여러 역학연구에서 근로자의 호흡기 관련 암 사망률이 유의하게 증가되었다는 증거가 있으나 명확하고 일관성 있는 양-반응 관련성은 부족하다.<sup>26,71</sup> 늑막내에 유리섬유를 주사한 동물에게서 암이 유발되었으며 독성의 크기는 섬유의 길이가 길수록 그리고 직경이 작을수록 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>8,111</sup> 그러나 여러 연구자들이 동물에 대해서 흡입에 따른 발암성은 증명하지 못했다.<sup>84,122</sup>

현재까지 발표된 자료에 의하면 유리섬유, 압면 또는 슬래그면에 폭로된 근로자에 대한 발암 가능성은 의심되지만 확정되지는 않았다. 이들 역학 자료에는 일관성 있는 양-반응 관련성이 없으며, 정확한 폭로력에 대한 정보나 내재된 혼란변수로 인해 이들 자료로부터 명확한 결론을 이끌어 내는 것은 제한점이 있다.<sup>21</sup> IARC에서는 유리섬유를 "possible human carcinogen(Group 2B)"으로 분류하고 있으며 인체에 암을 일으킨다는 사실을 지지할 수 있는 과학적인 증거는 아직까지 불충분하다는 결론을 내리고 있다.<sup>31</sup>

석면의 경우 이미 그 유해성이 널리 알려져 있어 이의 사용이 금지되거나 엄격하게 관리되고 있는 반면, 인조섬유의 경우 그 유해성이 약한 것으로 인식되어 그의 관리가 소홀하였고, 심지어 지금까지 우리나라에서 인조섬유에 폭로되는 업종의 근로자의 섬유폭로 수준과 특성에 대해 보고된 자료가 없는 실정이다. 우리나라의 경우 현재 인조섬유를 일반 분진(nuisance dust)으로 인식하고 분진과 동일하게 취급

하고 있는 실정에 있다. 그러나 일부 인조섬유의 유해성이 계속 보고가 되고 있고 우리나라에서도 최근 유리섬유 공장 주변의 주민의 경우 과중양이 발생하여 사회적으로 문제가 된 바 있다.<sup>159</sup>

한편 우리나라에서는 인조섬유를 일반 분진과 동일하게 고려하기 때문에 근로자의 폭로평가도 종량법에 따라 실시되고 있는 실정이다. 또한 섬유의 유해성은 크기 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되어 있기 때문에<sup>8,111</sup> 작업환경에서 발생하는 섬유의 크기에 대한 특성을 파악하는 것이 작업환경의 위험 정도와 추후 근로자의 직업병 발생 가능성을 예측하는데 반드시 필요하리라 생각된다.

이 연구의 목적은 산업에 널리 이용되고 있는 유리섬유와 단열제품을 생산 및 취급하는 업체에서 종사하는 근로자의 섬유 폭로수준을 평가하고 공기중 유리 섬유 크기의 특성을 파악하는 데 있다. 또한 섬유 농도와 총분진 농도에 의한 유리섬유 폭로 평가 방법을 비교하고 현재의 유리섬유에 대한 허용기준을 고찰하여 근로자의 직업병 예방을 위한 적절한 허용기준을 제안하고자 실시하였다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 대 상

본 연구는 유리면 및 단열제품을 제조하는 4개 업체와 단열제품만을 생산하는 1개 업체를 대상으로 공기중 유리섬유 및 총분진 농도와 유리섬유 크기 특성을 파악하였다. 조사 대상업체에서 생산 및 취급하는 제품의 종류는 Table 1과 같다.

A, B 및 C 사업장은 생산한 섬유에 결합제나 수지를 첨가하여 섬유끼리 결합시킨 유리면과 여기에 일정한 압력을 가한 매트 제품을 생산하고 있었으며,

**Table 1.** Glass wool insulation products being manufactured in the factories surveyed

Factory	Product
A	Glass wool; insulation mat(cured); pipe cover(cured)
B	Glass wool; insulation mat(raw/cured); pipe cover(cured)
C	Glass wool; insulation mat(cured); pipe cover(cured)
D	Insulation mat(cured); wall insulation panel
E	Glass filaments; insulation mat(cured)

또한 이를 경화시켜 벽이나 천정에 설치하는 단열판 (insulation mat)과 파이프 보온재(pipe cover, pipe insulation)를 생산하고 있었다. D 사업장은 가압이나 경화처리가 되지 않은 유리섬유를 다른 업체로부터 구매하여 이를 수동으로 가압 및 경화시켜 판 모양으로 가공한 후 여기에 철판을 붙인 단열판 (panel)을 제조하고 있었다. E 사업장은 다른 업체와 다른 생산 방식을 이용하여 실모양의 유리섬사 (glass filaments)를 생산한 후, 이를 경화시킨 매트 를 생산하고 있었다.

## 2. 방 법

공기중 유리섬유의 농도는 National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH)의 Method 7400을<sup>11)</sup> 이용하여 측정하였다. 공기중 섬유 시료를 약 2 Lpm의 유량으로 0.8  $\mu\text{m}$ -cellulose ester membrane filter(Millipore AA Type, Millipore Co.)에 포집하여 필터의 일부를 acetone/triacetin으로 투명화 시킨 후, 위상차 현미경으로(Carl Zeiss, German) 400 배의 배율에서 섬유 수를 세었다. 계수 규칙은 호흡성 섬유(respirable fiber) 계수를 위한 B 규칙을 이용하여 길이가 5  $\mu\text{m}$  이상이고 직경이 3  $\mu\text{m}$  이하인 섬유중에서 길이대 직경의 비(aspect ratio)가 5:1 이상인 섬유만을 계수하여 공기중 농도를 산출하였다. NIOSH에서 제시하고 있는 섬유의 계수 방법으로는 B 규칙 외에 A 규칙이 있는데, A 규칙은 길이가 5  $\mu\text{m}$  이상이고 aspect ratio가 3:1 이상인 섬유는 모두 계수하도록 되어 있다. 이 두 계수방법의 가장 중요한 차이는 B 규칙의 경우 직경이 3  $\mu\text{m}$  이하인 섬유만 계수하도록 제한을 둔 점이다. 유리섬유의 호흡기관련 건강장해는 호흡기의 폐포까지 침투할 수 있는 호흡성 섬유에 의해 결정되므로 호흡성 섬유를 측정하는 것이 정확한 평가방법이다. 일반적으로 호흡성 섬유는 직경이 3  $\mu\text{m}$  이하인 섬유로 정의하고 있으며,<sup>1,5,15,16)</sup> NIOSH에서는 유리섬유의 경우 B 규칙을 적용하도록 권고하고 있다.

섬유의 길이와 직경은 400배의 배율에서 micrometer를 현미경에 삽입하여 측정하였다. 위상차 현미경에 의한 직경의 가시 한계는 약 0.2  $\mu\text{m}$ 로 알려져 있다.<sup>11)</sup> 따라서 직경이 매우 작은 섬유는 측정 에 포함되지 않았으나 유리섬유 제조산업에서 발생 되는 섬유의 직경은 이보다 큰 것으로 알려져 있어 위상차 현미경을 사용하여 섬유 크기를 측정해도 큰 오차는 없다고 본다.

공기중 총분진 농도는 NIOSH의 Method 0500을<sup>17)</sup> 이용하여 측정하였으며, 다만 섬유농도를 동시에 측정하기 위해서 37 mm의 cellulose ester membrane filter에 시료를 포집하여 천칭(Sartorius, Model 2000)으로 무게를 재었다. 분진의 무게를 잰 필터 시료는 유리섬유 분석에 이용하였다.

공기중 유리 섬유농도는 대수 분포를 하는 것으로 알려져 있으며,<sup>18)</sup> 본 자료의 분포를 확인한 바 대수 정규분포를 하는 것으로 확인되었기 때문에 각 농도 자료는 로그 변환한 후 SAS 통계 패키지를 이용하여 통계분석을 하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 공기중 섬유 농도

#### 1) 사업장별 근로자의 섬유 노출농도

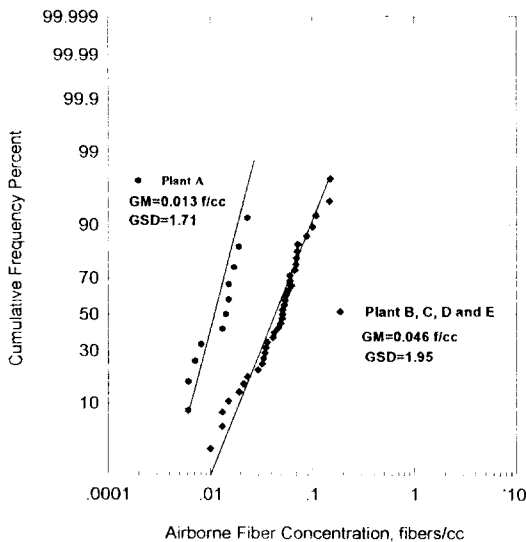
5개 업체에 종사하는 근로자의 유리 섬유 폭로농도는 Table 2 및 Fig. 1과 같다. 공기중 섬유는 크게 총 섬유(total fibers)와 호흡성 섬유로 구분되는데, 호흡성 섬유라 함은 총 섬유중 두께가 3  $\mu\text{m}$  이하인 섬유를 말하나,<sup>1,5,15,16)</sup> 일반적으로 Method 7400의 B 규칙에 따라 측정된 직경이 3  $\mu\text{m}$  이하이고 길이가 5  $\mu\text{m}$  이상인 섬유의 농도를 말하기도 한다. 따라서 Table 2에 제시된 자료는 공기중의 호흡성 섬유 농도를 나타낸 것이다.

사업장별 평균 섬유농도는 한 사업장을 제외하고는 4개 사업장이 비슷한 폭로 농도를 보이고 있어 대상 사업장을 두개 폭로군으로 나누어 공기중 유리 섬유 농도를 나타내었다. 농도 수준이 유사한 4개 사업장의 전체 평균 농도는 0.046 f/cc (0.041~0.056 f/cc)이었으나 나머지 한 사업장의 경우 농도가 0.013 f/cc로 다른 사업장에 비해 유의하게 낮았다( $p < 0.01$ ). 섬유 농도가 다른 업체에 비해 특히 낮은 A 사업장은 다른 업체의 생산 공정과 유사하였으나 pipe cover 제조 라인의 성형공정에서 차이가 있었다. 이 사업장의 성형공정은 다른 업체와 달리 제품의 마무리를 위한 가장자리 부분의 절단공정이 필요 없는 연속성형 공정이었다. 또한 매트 생산 공정에서는 폭발단에 의해 발생하는 유리섬유 잔재물들이 자동으로 용해로로 회수되고 있어 유리섬유 분진의 발생이 억제되고 있었다. 그리고 환기설비의 효율등 전반적인 작업환경관리가 다른 업체에 비해 양호한 것으로 판단되며 이러한 요인으로 인해 섬유 농도가 낮은 것으로 추정된다.

**Table 2.** Worker's exposure level to airborne respirable fibers by factory

Factory	Product/Line	N	GM, f/cc	GSD	Min, f/cc	Max, f/cc
A	Wool	4	0.010	1.726	0.006	0.019
	Board	4	0.010	1.721	0.006	0.017
	Pipe cover	4	0.019	1.376	0.014	0.027
	Total	12	0.013	1.712	0.006	0.027
B	Grinding	2	0.086	1.368	0.069	0.108
	Wool	6	0.029	1.657	0.015	0.051
	Board	8	0.050	1.741	0.021	0.150
	Pipe cover	4	0.057	1.395	0.035	0.071
	Total	20	0.046	1.773	0.015	0.150
C	Pipe cover	7*	0.046	2.246	0.013	0.146
D	Board	5	0.056	2.815	0.010	0.150
E	Board	7	0.041	1.902	0.013	0.088
	Total	51	0.034	2.333	0.006	0.150

\* One sample was loaded heavily with particulates, and couldn't be counted by microscope. Total dust concentration of this sample is equal to 47.7 mg/m<sup>3</sup>.



**Fig. 1.** The distribution of airborne fiber concentrations in the glass wool manufacturing industry.

생산되는 제품은 유리면 매트, 파이프 카바 그리고 경화과정을 거치지 않은 유리 원면이었으며 각 제품의 제조 공정은 약간 차이가 있었으나 발생하는 유리 섬유 농도에에는 차이가 없는 것으로 나타났다 ( $P>0.05$ ).

여러 연구자들이 보고한 유리면, 매트 및 파이프 단열재를 생산하는 근로자의 공기중 호흡성 섬유 농도는 본 연구 결과와 유사하였다. Jacob 등은<sup>19)</sup> 유리 섬유 제조공장의 공기중 평균 총 유리섬유(total fiber) 농도는 0.002~0.14 f/cc이고 이 중 호흡성 유리섬유 농도는 0.001~0.07 f/cc로 보고하였는데 본 연구 결과와 유사하였다. Corn 등은<sup>20)</sup> 대상 사업장 3개소 중 2개 공장의 평균 호흡성 섬유 농도는 0.006~0.07 f/cc이고 다른 한 공장은 0.21~1.41 f/cc라고 보고하였다. Ottery 등이<sup>21)</sup> 유리면 및 단열재를 생산하는 4개 사업장의 공정별 평균 호흡성 섬유농도는 0.003~0.03 f/cc로 보고하였다. Cherri 등은<sup>22)</sup> 4개 사업장의 공정별 호흡성 섬유 농도는 1개 사업장의 1개 공정 (2차 생산)에서 가장 높은 0.16 f/cc이고 다른 공정과 다른 사업장의 모든 공정의 호흡성 섬유 농도는 0.01~0.07 f/cc로 보고하였으며, Esmen 등은<sup>23)</sup> 4개 사업장의 평균 호흡성 섬유 농도는 0.0017~0.04 f/cc라고 보고하였다. 그러나 TIMA<sup>24)</sup> 및 Head 등은<sup>25)</sup> 유리섬유 제조업체의 평균 농도가 각각 0.11 f/cc 및 0.11 f/cc로 보고하였는데 본 연구 결과보다는 섬유농도가 비교적 높았다. 또한 TIMA에서는 광물 섬유 제조 업종에서의 사업장의 평균 농도는 0.001~1.59 f/cc 이었고 세라믹 제조업 및 취급업의 평균 농도는 각각 0.65 f/cc 및 1.17 f/cc라고 발표하였다.<sup>24)</sup> Bender 등은<sup>1)</sup> 미세 섬유

를 제조하거나 가공하는 공정의 호흡성 섬유 평균 농도 각각 1~2 f/cc 및 0.42 f/cc로 보고하였다. 이들이 조사한 업종의 근로자는 유리 섬유 제조업보다는 높은 농도의 섬유에 폭로되는 것을 알 수 있다.

유리면 또는 압면 단열재를 설치하거나 살포하는 작업자의 경우 비교적 높은 섬유 농도에 폭로되는 것으로 보고되고 있다. Head 등은<sup>25)</sup> 유리섬유 단열재를 설치하는 작업에서의 공기중 노출농도는 평균 0.38~1.02 f/cc라고 보고하였다. Lees 등은<sup>26)</sup> 주택 단열재인 유리면(fiber glass batt), 결합제 없는 유리섬유 단열제품, 살포용 압면(loose blowing rock wool)을 시공할 때 공기중의 섬유 농도는 각각 평균 <math><1.08\text{ f/cc}</math> (8hr-TWA=0.3 f/cc), 7.67 f/cc (8hr-TWA=1.96 f/cc), 1.94 f/cc (8hr-TWA=0.97 f/cc)라고 발표하였다. Bender 등이<sup>27)</sup> 여러 연구자들이 발표한 연구결과를 고찰한 결과, 유리섬유 단열재를 시공하는 작업에서의 섬유 노출 농도는 대부분 0.1 f/cc 이하이지만 일부 연구자의 결과는 1 f/cc에 근접하는 수준이라고 하였다. 특히 밀폐 공간에서 유리면을 살포하는 작업(1~18 f/cc)과 동력 절단기로 절단하는 작업(0.2~4 f/cc)에서는 고농도의 섬유에 폭로되는 것으로 보고하였다.

지금까지 발표된 자료를 종합하면 유리면 및 단열재 제조업의 호흡성 섬유의 평균 농도는 대부분의 경우 0.1 f/cc 이하로 이 업종에서의 근로자 노출 농도는 미국의 법적 허용기준 1 f/cc보다 낮은 것을 알 수 있다. 그러나 미세 유리섬유를 제조하는 업종에서는 공기중 섬유 농도가 높은 것으로 보고되고 있으며, 단열재를 시공하는 업종에서의 섬유 농도는 연구자에 따라 크게 다르며, 작업상태, 작업조건 등에 따라 섬유 발생량이 차이가 있는 것으로 보인다. 전반적으로 이들 업종의 근로자는 제조업보다는 높은 수준의 섬유농도에 노출되는 것으로 알려져 있으며 많은 연구에서 섬유농도가 1 f/cc 이상이라고 발표하였다.

우리나라노동부와 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서는 공기중 유리섬유의 허용기준은 섬유 농도가 아닌 총분진 농도로 설정하고 있다.<sup>27,28)</sup> 미국의 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)과 네덜란드에서는 직경 3  $\mu\text{m}$ 이고 길이대 직경이 비가 5:1 이상인 호흡성 유리섬유의 허용 농도를 1 f/cc로 제안하고 있으며,<sup>1,29)</sup> 미국의 NIOSH에서는 직경 3.5

$\mu\text{m}$  이하인 호흡성 섬유의 허용기준을 3 f/cc로 권고하고 있다.<sup>14)</sup> 본 연구 대상 업체의 평균 섬유 농도는 OSHA와 NIOSH의 허용 기준보다 훨씬 낮은 수준이었다. 그러나 C 사업장의 분쇄공정 근로자의 경우 총분진의 농도가 47.7 mg/m<sup>3</sup>로 허용기준 10 mg/m<sup>3</sup>을 4 배 이상 초과하였다. 이 시료는 분진이 과다하게 포집되어 유리섬유 농도를 산출하지는 못했지만 미국 OSHA의 허용기준인 1 f/cc를 초과할 것으로 의심된다. 이 업체의 분쇄공정은 다른 업체와 달리 근로자가 분쇄기에 밀착한 상태에서 작업을 하고 있어 과다한 분진에 폭로되는 것으로 판단된다. 다른 업체의 경우 근로자는 분쇄기와 일정한 거리를 둔 채로 투입구쪽에서 분쇄할 제품을 공급하고 있어 C 사업장보다는 비교적 적은 양의 분진에 폭로되는 것으로 보인다.

대상 사업장의 총분진의 평균농도가 허용기준을 초과하는 사업장은 없었다. 다만 폐제품을 재생하기 위해서 이를 분쇄하는 근로자의 노출 농도가 47.7 mg/m<sup>3</sup>으로 허용기준을 훨씬 초과하였다. 섬유농도가 가장 낮은 A 사업장의 평균 총분진 농도는 0.29 mg/m<sup>3</sup>였고 이를 제외한 사업장들의 평균농도는 0.42~0.59 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다.

전체적으로 유리섬유 제조 공정의 유리섬유와 분진 노출 농도는 비교적 낮은 것으로 나타났다. 이는 밀폐된 설비내에서 용융된 유리로부터 형성된 섬유 표면에 결합제를 가하기 때문에 섬유의 공기중 비산이 억제되는 것은 물론, 특히 단열재 제조업은 가공 또는 취급 업종과는 달리 분쇄 또는 연마 공정을 제외하고는 분진이나 섬유 발생을 조정하는 공정이 많지 않은 것이 주요 요인이라 판단된다.

## 2) 공정별 섬유 농도

Fig. 2는 대표적인 유리면, 매트, 보드, pipe cover의 제조공정도를 나타낸 것이다. 유리섬유는 용융된 유리를 spinner의 작은 구멍으로 회전시켜 넣거나 불어 넣음으로써 생산된다. 유리면을 생산하는데 사용되는 spinner의 직경에 따라 생산되는 섬유의 크기가 결정된다. 유리섬유 단열 제품의 생산공정은 생산되는 제품에 따라 약간 차이가 있다. 생산되는 제품으로는 유리솜, 유리 섬유 매트 및 pipe cover가 있으며 용융된 유리로부터 섬유화 공정을 거쳐 생성된 유리면에 결합제나 수지를 첨가하고 일정한 압력을 가하여 제조한다. 또한 추가적인 경화공정을 거쳐 일정한 크기로 잘라 매트나 파이프보온재를 생산한다.

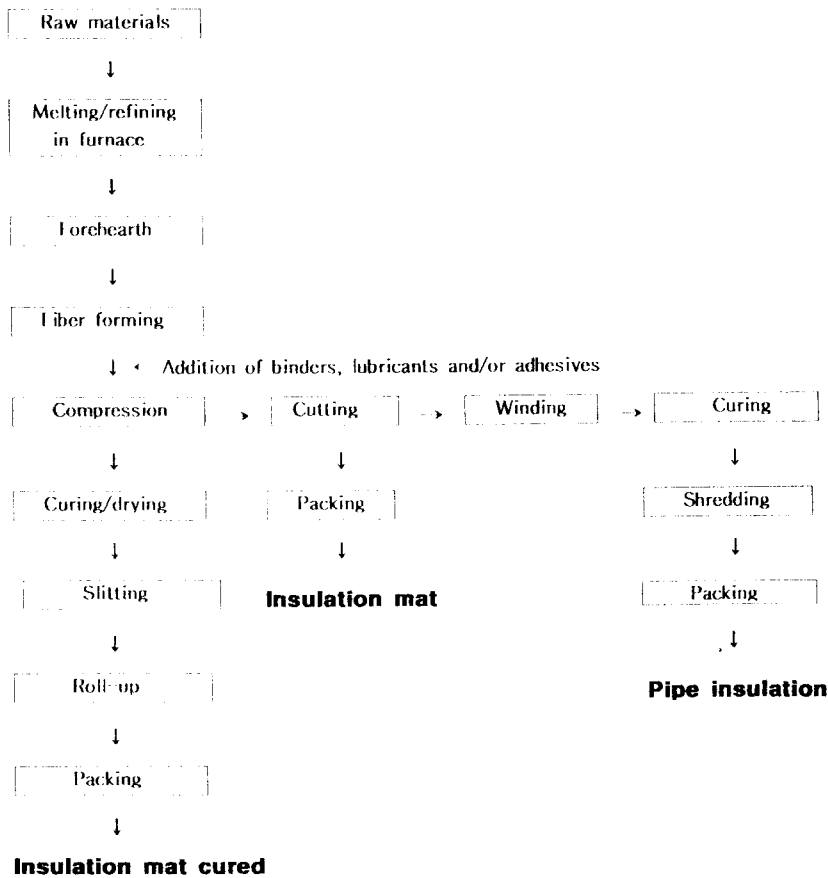


Fig. 2. Simplified flowchart for glass wool insulation production.

Table 3. Airborne respirable fiber concentrations by process

Process	Personal Sample			Area Sample		
	N	GM	GSD	N	GM	GSD
Wool forming	8	0.020	2.430	6	0.020	2.940
Wool loading	4	0.030	1.640	1	0.040	-
Molding	9	0.050	2.140	6	0.010	1.620
Cutting	1	0.150	-	6	0.100	2.010
Packing	18	0.040	2.140	-	-	-
Grinding	4	0.090	1.230	-	-	-
Maintenance	3	0.020	1.550	1	0.009	-
Transportation	3	0.020	3.010	-	-	-

Table 3에는 공정별 섬유 농도를 나타내었으며 공정 간 농도차이를 Duncan 다중 검정법으로<sup>30)</sup> 검정한 결과, 분쇄공정과 절단 공정은 다른 공정에 비해 유의하게 높았다(p<0.05). 이 두 공정을 제외하고는 차이가 없는 것으로 나타났다. 섬유화 공정, 성형, 포장, 보수

관리, 운반 공정의 경우 근로자의 평균 노출 농도가 0.02~0.03 f/cc 수준이었고 절단 공정은 평균 0.15 f/cc, 분쇄 공정은 평균 0.10 f/cc로 나타나 이 두 공정의 근로자의 경우 비교적 높은 농도에 폭로되기 때문에 특별한 관리가 요구된다.

2. 공기중 섬유유 크기 특성

1) 사업장별 공기중 섬유유 크기 특성

석면과 마찬가지로 인조섬유유 크기 특성과 건강장해는 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 직경이 작을수록 그리고 길이가 길수록 그 유해성이 큰 것으로 알려져 있다.<sup>6,11)</sup> 특히 Stanton은 섬유유 건강유해성은 직경이 >0.25~1.5 μm이고 길이가 8 μm보다 큰 섬유유 수와 밀접한 관련이 있다고 하였다.<sup>10)</sup>

섬유유 크기 특성 중 섬유유 직경은 인체의 호흡기에 흡입되는 정도를 결정하는데 가장 중요한 요소이다. 다른 성질이 동일하다면 직경이 작은 섬유유가 공기중에 많이 존재할수록 폐속 깊이 침투하는 섬유유 수가 더 많을 것이다. 따라서 생산되는 섬유유 제품의 종류 또는 형태, 생산 공정 등에 따라 발생하는 섬유유 크기 특성이 다르므로 근로자의 노출을 평가할 때 근로자의 노출량 뿐만 아니라 섬유유 크기의 특성을

아는 것이 중요하다.

Fig. 3은 400배의 배율에서 위상차 현미경으로 촬영한 공기중 유리섬유유의 모양을 보여주고 있으며 섬유유 외에도 다수의 비섬유상 입자도 관찰된다.

Table 4~Table 8 및 Fig. 4에는 유리면과 단열제품을 생산하는 공장에서 채취된 공기중 섬유유 크기 분포를 각 사업장별로 나타내었다. 길이의 특성을 살펴보기 위해 섬유제조 설비에서 인접한 위치에서 작업하는 근로자의 호흡위치에서 채취된 시료를 선택하여 관찰하였다. 공기중 유리섬유유는 유리섬유 제조 설비와 이를 취급하는 공정이 주 발생원이며 분쇄 및 절단 공정과 같은 특정 공정과 인접하여 작업하는 근로자를 제외하고는 대부분의 근로자는 유리섬유 제조 설비에서 발생하는 유리섬유에 노출된다고 볼 수 있다. Table 5의 B 사업장의 경우 섬유제조 설비에 인접한 위치에서 측정된 결과 뿐만 아니라 공정에 따른 크기 특성을 살펴보기 위해 절단 및 분쇄 공정에서 측정된 결과도 제시하였다.

Table 4~Table 7에서 보는 바와 같이 유리섬유 제조공정에 인접한 위치에서 채취한 공기중 섬유유 대부분은 길이가 10 μm 이상인 것으로 나타나, 유리섬유 제조업에서는 길이가 비교적 긴 섬유유가 발생하는 것을 알 수 있다. 유리섬유를 제조하는 4개 사업장별로 채취된 섬유유 길이 분포를 살펴본 결과, A 사업장은 길이가 다른 사업장들과는 다른 특성을 보이고 있었다. Table 8 및 Fig. 4에서 보는 바와 같이 A 사업장의 섬유제조설비에서 발생된 섬유유 길이는 GM이 105 μm로 다른 사업장에서 발생하는 섬유유 길이 (GM의 범위: 42~50 μm) 보다 2 배 이상 긴 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 유리 섬유를



Fig. 3. Photomicrograph of glass fibers in an air sample under 400X magnification.

Table 4. Percentage of airborne fiber numbers by dimension in factory A

Length, μm	Diameter, μm				Total %	Cumulative %
	<1	1-3	3-5	5<		
<5	-	-	-	-	-	-
5-10	-	-	-	-	-	-
10-20	-	3.5	1.8	-	5.3	9.8
20-30	-	2.9	1.2	0.6	4.7	10.0
30-40	0.6	4.7	0.6	4.1	10.0	20.0
40-50	0.6	4.1	-	1.2	5.9	25.9
50-100	1.2	11.2	7.1	3.5	22.9	48.8
100<	-	10.0	11.2	30.0	51.2	100
Total %	2.4	36.5	21.8	39.4	100	
Cumulative %	2.4	38.9	60.6	100		

N=170

**Table 5.** Percentage of airborne fiber numbers by dimension in factory B

Process	Length, $\mu\text{m}$	Diameter, $\mu\text{m}$				Total %	Cumulative %
		<1	1-3	3-5	5<		
Wool forming (N=225)	<5	-	-	-	-	-	-
	5-10	-	0.4	-	-	0.4	0.4
	10-20	3.6	7.6	-	0.4	1.6	1.6
	20-30	2.7	8.0	0.4	-	16.4	27.5
	30-40	1.3	8.4	-	1.3	11.6	39.2
	40-50	3.6	5.8	1.3	0.9	14.3	53.4
	50-100	8.4	12.4	0.9	3.1	33.9	87.3
	100<	7.1	12.9	5.8	3.6	12.7	100.0
	Total %	26.7	55.6	8.4	9.3	100	
	Cumulative %	26.7	82.3	90.7	100		
Cutting (N=130)	<5	0.8	-	-	-	-	0.8
	5-10	1.5	3.8	-	-	0.8	6.2
	10-20	3.8	12.3	0.8	0.8	5.4	23.8
	20-30	3.1	13.8	2.3	-	17.7	43.1
	30-40	1.5	6.2	3.1	1.5	19.2	55.4
	40-50	1.5	4.2	1.5	0.8	8.5	63.8
	50-100	1.5	20.2	3.1	1.5	26.2	90.0
	100<	2.3	6.2	1.5	-	10.0	100
	Total %	16.2	66.9	12.3	4.6	100	
	Cumulative %	16.2	83.1	95.4	100		
Grinding (N=266)	<5	0.4	-	-	-	0.4	0.4
	5-10	4.5	4.5	0.4	0.4	9.8	10.2
	10-20	6.4	15.4	0.8	0.4	22.9	33.1
	20-30	5.6	12.4	0.8	-	18.8	51.9
	30-40	1.5	4.1	0.8	1.5	7.9	59.8
	40-50	1.5	2.6	1.9	0.4	6.4	66.2
	50-100	3.4	9.4	2.6	1.5	16.9	83.1
	100<	0.4	8.3	6.8	1.5	16.9	100
	Total %	23.7	56.8	13.9	5.6	100	
	Cumulative %	23.7	80.5	94.4	100		

**Table 6.** Percentage of airborne fiber numbers by dimension in factory C

Length, $\mu\text{m}$	Diameter, $\mu\text{m}$				Total %	Cumulative %
	<1	1-3	3-5	5<		
<5	-	-	-	-	-	-
5-10	1.0	1.6	-	-	2.6	2.6
10-20	4.5	11.0	-	2.6	18.1	20.7
20-30	4.2	8.7	1.3	0.6	14.9	35.6
30-40	2.9	6.1	0.3	0.6	10.0	45.6
40-50	1.3	5.2	0.3	3.6	10.4	56.0
50-100	1.6	10.0	4.5	9.1	25.2	81.2
100<	1.0	11.0	3.9	2.6	18.8	100
Total %	13.9	32.7	1.9	7.4	100	
Cumulative %	13.9	46.6	48.5	100		

N=309



**Table 7.** Percentage of airborne fiber numbers by dimension in factory E

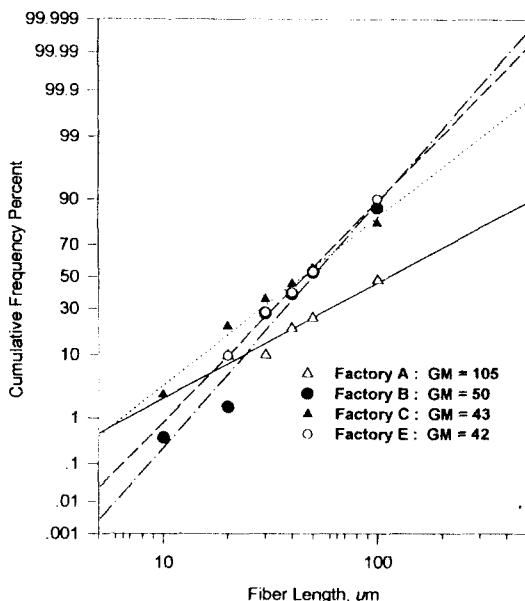
Length, $\mu\text{m}$	Diameter, $\mu\text{m}$				Total %	Cumulative %
	<1	1-3	3-5	5<		
<5	-	-	-	-	-	-
5-10	-	-	-	-	-	-
10-20	3.9	5.9	-	-	9.8	9.8
20-30	3.3	13.1	1.3	0.7	18.3	28.1
30-40	5.2	5.2	0.7	0.7	11.8	39.9
40-50	7.8	5.9	1.3	-	15.0	53.9
50-100	13.7	18.3	2.0	1.3	35.3	90.2
100<	1.3	7.2	0.7	0.7	9.8	100.0
Total %	35.3	55.6	5.9	3.3	100	
Cumulative %	35.3	90.9	96.7	100		

N=153

**Table 8.** The summary of size characteristics of airborne fibers by factory and process.

Factory	Process	Length		Diameter
		GM, $\mu\text{m}$	GSD	Respirable*/Total**, %
A	Wool forming	105	4.0	38.9
B	Wool forming	50	2.0	82.3
	Cutting	35	2.9	83.1
	Grinding	33	2.9	83.1
C	Wool forming	42	2.4	83.1
E	Wool forming	43	2.3	46.6

\* Respirable fiber \*\* Total fiber



**Fig. 4.** The distribution of airborne fiber-length by factory.

제조하는 설비의 차이에서 기인하는 것으로 보이며 A 사업장의 경우 용융된 유리 용액이 통과하는 spinner의 구멍이 다른 사업장에 비해 크기 때문인 것으로 생각된다.

Jaffery 등은<sup>31)</sup> 공기중 유리면의 섬유 길이는 28.5  $\mu\text{m}$ 이고, 암면의 섬유 길이는 39.6  $\mu\text{m}$ 라고 보고하였다. 우리나라에서 백 등이<sup>32)</sup> 석면취급 업종별로 공기중 석면 섬유의 특성에 대해 발표하였는데, 석면 방직업의 경우 섬유 길이의 기하 평균이 16.3  $\mu\text{m}$ , 브레이크 라이닝 제조업의 경우 13.8  $\mu\text{m}$ , 그리고 슬레이트 제조업의 경우 13.8  $\mu\text{m}$ 로 보고하였다. 본 연구에서는 사업장의 평균 섬유길이가 40~100  $\mu\text{m}$  정도로 나타나 석면의 길이보다 긴 섬유가 발생됨을 알 수 있다.

섬유의 독성의 크기는 직경과도 관련이 있는 것으로 알려져 있는데, 일반적으로 호흡성 섬유로 규정하고 있는 직경이 3  $\mu\text{m}$  이하인 섬유의 분포는 Table 8에서 보는 바와 같이 두 군으로 분류되는 양상을 보이고 있었다. A 및 C 사업장의 경우 호흡성 섬유의 비율이 각각 38.9 % 및 46.6 %로 비교적 낮

있고 B 및 E 사업장의 경우 각각 82.3%(섬유형성공정) 및 90.9%로 대부분의 섬유가 호흡성인 것으로 나타났다. 본 연구결과 섬유 형성 공정에서의 섬유 직경의 기하평균은 Table 4~Table 7에서 보는 바와 같이 1~5  $\mu\text{m}$  사이에 있는 것으로 나타났다. 특히 A 사업장은 섬유직경의 기하평균은 3~5  $\mu\text{m}$ , 다른 사업장은 모두 1~3  $\mu\text{m}$ 로 나타나 A 사업장의 섬유 직경이 더 큼을 알 수 있었다. 일반적으로 유리 섬유 제조사업장에서 발생하는 섬유의 직경과 길이는 석면 사업장이나 세라믹 제조업체에 비해 큰 것으로 판단된다.

사업장별 섬유 크기 특성과 공기중 섬유농도를 종합하며 고찰해 본 결과, A 사업장의 경우 길이와 직경이 큰 섬유가 대부분 발생되며, 섬유농도는 낮은 것으로 나타났다. 이 사업장의 호흡성 섬유 농도는 다른 업체에 비해 낮은 이유는 나타났는데 공정이나 작업환경관리 상태의 차이 외에 섬유 크기 특성이 주요 요인으로 작용했기 때문인 것으로 보인다. 즉 이 사업장은 다른 업체에 비해 크기가 큰 섬유가 주로 발생하므로 총 섬유중 호흡성 섬유의 비율이 적어 호흡성 섬유의 농도가 낮은 것으로 보인다. C 사업장은 길이와 직경이 A 사업장 보다는 상대적으로 작은 섬유가 발생되나 호흡성 섬유의 비율이 B, E 업체보다 낮은 것으로 보아 길이는 작으나 직경이 비교적 큰 섬유가 발생하는 것을 알 수 있다. 한편, D 사업장의 섬유크기 분포를 조사하지는 않았으나 B 사업장에서 생산된 원면을 가공하기 때문에 이 업체의 크기분포와 유사하리라고 추정된다.

B 및 E 사업장은 크기 특성이 유사한 섬유가 발생되며 길이와 직경이 비교적 작은 호흡성 섬유가 대부분 공기중에 존재하는 것으로 나타났다. E 사업장은 유리 섬유(glass filament)를 생산하는 업체로서 유리섬유 생산공정과 생산된 섬유의 외관상 형태는 유리면을 생산하는 다른 업체들과는 차이가 있었다. 그러나 공기중에 발생된 섬유의 크기 특성은 B 사업장과 매우 유사하게 나와 공기중 섬유의 크기 특성은 다른 요인이 작용하는 것으로 추정된다. 따라서 공기중 섬유의 크기 특성에 영향을 주는 요인에 대한 심층적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

여러 연구자들이 인조섬유와 단열제품의 명목 직경(nominal diameter)과 섬유의 크기에 대해 발표하였다. Jefferys는<sup>31)</sup> 유리면의 공기중 섬유의 직경은 평균 1.42  $\mu\text{m}$ 이고 압면의 공기중 섬유의 직경은 2.3  $\mu\text{m}$ 라고 하였으며, Konzen 등은<sup>30)</sup> 유리섬유 단열제

품의 섬유 직경이 1~4  $\mu\text{m}$ 라고 보고하였다. Kojola 등은<sup>2)</sup> 일반적인 유리섬유의 명목 직경은 2 - 9  $\mu\text{m}$ 라고 발표하였고 Cherri 등은<sup>22)</sup> 유리면 공장에서의 섬유직경의 중위값은 0.3~2.5  $\mu\text{m}$ 라고 하였다. Esmen 등은<sup>24)</sup> 생산되는 유리섬유의 직경이 큰 군과(1~6  $\mu\text{m}$ )과 작은 군(0.05~1.6  $\mu\text{m}$ )으로 분류하여 보고하였으며 명목직경이 6  $\mu\text{m}$ 인 섬유를 제조하는 사업장의 경우 호흡성 섬유의 비율이 40% 미만이었다고 보고하였다. Reidiger 등은<sup>34)</sup> 유리섬유제조업의 4개 공장에서 조사한 섬유직경의 중위값은 0.4~0.7  $\mu\text{m}$ 로 작았다고 발표하였다. Christensen 등은<sup>35)</sup> 단열재를 생산하는 공장에서 섬유의 직경은 유리섬유 단열재 1~8  $\mu\text{m}$ , 압면 및 슬래그울 2~5  $\mu\text{m}$ , 세라믹 섬유 0.3~3.9  $\mu\text{m}$ , 그리고 특수 섬유 평균 0.6  $\mu\text{m}$ 이라고 발표하였다.

이와 같은 연구결과들을 살펴보면 유리섬유를 포함한 인조섬유 제조업의 경우 사업장에 따라 섬유의 크기는 크게 차이가 있는 것으로 알 수 있으며 인조 섬유의 종류에 따라 생산되는 섬유의 직경은 다른 것으로 알 수 있다. 유리면이나 압면의 섬유 직경은 유사하고 세라믹이나 특수섬유의 직경은 비교적 작은 것을 알 수 있다. 본 연구대상인 4개 사업장의 공기중 섬유 직경의 기하 평균은 1~5  $\mu\text{m}$ 있고 직경이 3  $\mu\text{m}$ 보다 작은 호흡성 섬유의 비율은 38.9~90.9%로 나타나 다른 연구자들이 발표한 자료와 유사한 것으로 나타났으며 사업장 간에도 직경 특성과 호흡성 섬유비율의 차이가 있는 것으로 판단된다.

## 2) 공정별 공기중 섬유의 크기 특성

공정별로 섬유 크기 특성을 살펴본 결과는 Table 5, Table 8 및 Fig. 5와 같다. 표에는 섬유형성공정 뿐만 아니라 생산된 단열재 판을 적당한 크기로 절단하거나 가장자리를 마무리하기 위해 절단하는 공정과 이 공정에서 발생하는 부산물이나 품질이 나쁜 제품을 분쇄기로 분쇄하는 공정에서 발생하는 섬유의 크기 특성을 나타낸 것이다. Table 5에서 보는 바와 같이 섬유형성 및 분쇄공정에서 발생하는 1  $\mu\text{m}$  이하인 섬유의 비율이 각각 26.7% 및 23.7%로 절단 공정(16%)에 비해 작은 섬유가 더 존재하나 직경이 3  $\mu\text{m}$  이하인 호흡성 섬유의 비율은 세 공정 80% 정도로 거의 유사하였다. 유리섬유의 경우 횡축으로만 분열되며 종축으로 분열되지 않기 때문에 물리적인 힘이 가해지더라도 섬유 직경에는 줄어 들지 않는다. 공정과 관계없이 직경이 일정한 상태로 유지된다고 볼 수 있다. 본 연구결과 공정간의 직경 분포는

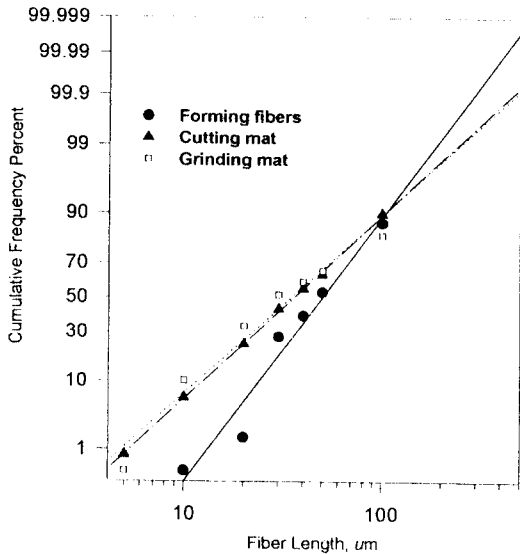


Fig. 5. The distribution of airborne fiber-length by process.

차이가 없는 것으로 나타나 유리섬유의 이러한 특성을 잘 설명해 주고 있다.

그러나 길이의 경우, Table 8 및 Fig. 8에서 보듯이 섬유형성 공정은 50 μm인 반면 절단 및 분쇄 공정은 33~35 μm로 나타나 절단과 분쇄 공정은 서로 유사한 크기 특성을 지닌 섬유가 발생하나 섬유형성 공정과는 차이가 있음을 알 수 있다. 섬유화 공정과 절단·분쇄 공정의 섬유 길이 특성의 차이를 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 적합도 검정법으로 검정한<sup>30)</sup> 결과, 차이가 있는 것으로 나타났다(p<0.05). 절단공정과 분쇄공정은 검정결과 유사한 길이의 섬유가 발생하는 것으로 나타났다(P>0.05). 이 세 공정을 제외한 다른 공정은 섬유화 공정과 유사한 크기 분포를 보일 것으로 추정된다. 왜냐하면 섬유화 공정에서 생성된 유리 섬유는 절단 및 분쇄 공정을 제외하고는 크기를 변화시킬 수 있는 물리적 힘이 가해지지 않기 때문에 원래 생성된 유리섬유의 형태를 그대로 유지되리라 본다. 절단 및 분쇄는 일부의 위치에서 발생되므로 사업장의 전체 섬유 크기 특성에는 큰 영향을 미치지 않으리라 보기 때문에 유리섬유 제조업의 전반적인 유리 섬유의 길이는 섬유화 공정에서 발생된 길이와 유사하리라 본다.

이와 같은 결과로 미루어 보아 유리 섬유를 생산하는 업체 및 공정에 따라 섬유의 크기는 차이가 있는 것으로 나타났으며 근로자의 건강에 미칠 수 있

는 영향의 정도에도 차이가 있을 것으로 판단된다. 섬유의 유해성은 일반적으로 폭로량, 크기 특성 및 인체 내에서의 지속성과 관계되는 것으로 알려져 있다. 본 연구결과 유리섬유 제조업에서의 폭로 수준은 석면 사업장보다 낮은 것으로 나타났다. 또한 섬유는 직경이 작고 길이가 길수록 유해성이 큰 것으로 보고되고 있기 때문에 유리섬유 제조업의 경우 섬유의 길이가 길지만 직경이 석면 사업장에서 발생되는 석면섬유 직경에 비해 훨씬 크다. 따라서 유리섬유 사업장은 이와 같은 차이에 근거할 때 석면 사업장보다 건강장해가 발생할 위험이 낮은 것으로 추정된다. 아울러 유리 섬유의 경우 석면에 비해 체내에서 분해가 더 쉽게되므로 지속기간이 짧다고 알려져 있어 인체에 미치는 독성이 상대적으로 적을 것으로 판단된다.

그러나 유리섬유 단열재를 설치 및 제거하는 작업에서의 노출 농도는 제조업보다 높은 것으로 알려져 있으므로<sup>1,2)</sup> 국내에서도 이와 같은 업종에서의 폭로량과 섬유 크기 특성에 대한 평가가 필요하리라 본다. 한편 유리섬유 외에 다른 인조섬유(특히 세라믹 섬유)의 크기의 크기특성을 유리섬유 단열재 제조업에서 발생하는 섬유와 차이가 있고 독성이 강한 것으로 보고되고 있기 때문에 근로자의 건강 장해를 예측하고 예방하기 위해 다른 인조섬유의 대해서도 근로자의 노출 실태나 섬유 특성 등에 대한 심층적인 연구가 필요하리라 생각된다.

### 3. 유리섬유 농도와 분진 농도의 비교

유리섬유를 비롯한 인조섬유를 제조 및 취급하는 근로자의 노출 평가를 할 때, 근로자의 건강장해는 섬유상의 분진과 밀접한 관련이 있다. 그러나 우리나라에서는 일반적으로 유리섬유를 비롯한 인조섬유를 일반 분진으로 간주하여 측정하고 평가하는 실정에 있다. 분진농도로 인조섬유에 노출되는 수준을 평가하는 것은 간단하기는 하지만 이 방법이 근로자의 섬유 노출에 대한 평가방법으로 적합하기에 대해서는 연구자들이 부정적인 견해를 보이고 있다.<sup>1,20,21, 31,33)</sup> Corn 등은<sup>20)</sup> 섬유수는 분진농도와 연관성이 없으며 총분진으로부터 섬유수를 신뢰성있는 수준으로 추정할 수 없다고 하였으며 섬유가 미세할수록 섬유 농도는 높게 산출된다고 하였다. Lees 등은<sup>26)</sup> 분진 중량과 섬유수와 상관상은 약하게 나타나 분진 농도로서 섬유 농도를 예측할 수 없으며 발생원의 비섬유상의 분진에 의해 영향을 많이 받는다고

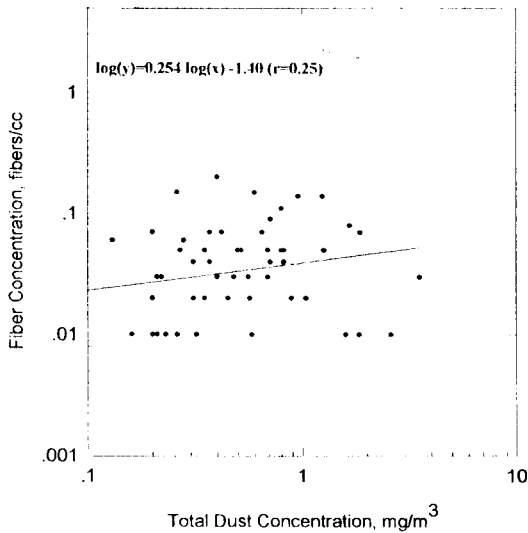


Fig. 6. The relationship between airborne fiber and total dust concentrations.

하였다. Bender 등은<sup>1)</sup> 유리섬유 평가할 때 중량법을 사용하면 건설업에서와 같이 비섬유상의 분진이 많이 존재하는 환경에서는 근로자의 섬유 노출 수준을 과대평가할 수 있고 1  $\mu\text{m}$  보다 작은 직경의 제품을 취급하는 작업에서는 섬유수에 비해 분진 무게는 낮은 값이 초래될 수 있다고 하였다. 한편, Berum 등<sup>36)</sup> 과 Schneider 등은<sup>37)</sup> 작업환경에서는 분진 농도와 섬유농도는 상관관계가 있는 것으로 보고하고 있어 앞의 연구자들과는 다른 연구결과를 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 유리면 제조업에서의 측정된 분진 농도와 섬유 농도의 상관성을 조사하여 분진 농도로 섬유 농도를 예측할 수 있는지를 살펴보고 있는데 그 결과는 Fig. 6과 같다.

공기중 유리섬유 농도와 총분진 농도의 상관 계수는 0.25로 두 변수간의 상관성은 약하게 나타나 분진 농도로 섬유 농도를 예측하는 것은 타당하지 않는 것으로 나타났다. 총분진의 농도와 섬유농도의 관계는 섬유상의 분진의 크기와 비섬유상 분진의 함량과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 조사대상 사업장은 제조업체로서 섬유상 외 다른 분진의 발생원은 없는 것으로 판단되었으나 Fig. 3에서 보는 바와 같이 공기중 시료에서 섬유 뿐 만 아니라 많은 수의 비섬유상 분진이 관찰되었는데 이 것이 분진량과 섬유수와의 상관성을 약하게 한 주요요인으로 판단된다.

결론적으로 근로자의 건강에 대한 위험을 예측하기 위해서는 노출되는 섬유에 초점을 맞추어 평가하여야 되리라 본다. 만약 섬유상의 분진의 노출 수준을 중량법으로만 평가한다면 근로자의 정확한 노출량을 파악하는 데 문제가 있을 것이다. 근로자의 질환이 섬유상의 분진에 의해 일어나는 것이라면 근로자의 섬유 노출량을 평가하고 관리하는 것이 바람직하다.

#### 4. 인조섬유의 허용농도

앞에서 언급한 바와 같이 우리나라와 ACGIH에서는 유리섬유에 대한 허용기준을 총분진으로 10 mg/m<sup>3</sup>으로 설정하고 있으며 섬유 농도로 규정된 허용기준은 설정되어 있지 않다.<sup>27,28)</sup> 미국의 OSHA에서는 1992년에 건설업에서의 인조섬유에 대한 허용기준을 채택하였으며 세라믹 섬유를 제외한 인조섬유의 허용농도를 1 f/cc로 설정하고 있다.<sup>29)</sup> 네덜란드의 경우 인조섬유 종류에 따라 그 허용기준이 설정되어 있는데 세라믹 섬유와 slag wool에 대해 1 f/cc로 유리면과 암면은 5 f/cc로 설정하여 근로자의 폭로를 관리하고 있다. 다만 연속상의 유리 filament는 비활성 분진으로 취급하고 있다. 스웨덴은 인조섬유의 허용기준을 1 f/cc로 설정하고 있고 미국 NIOSH에서는 3 f/cc로 권고하고 있다. 이들 국가 및 기관에서 규정하고 있는 허용기준은 일반적으로 직경 3  $\mu\text{m}$  이하이고 길이대 직경의 비가 3 이상인 호흡성 섬유를 대상으로 하고 있다.<sup>1)</sup>

인조섬유는 그 종류가 매우 다양하고 일부 인조섬유의 경우 일반 분진과는 다른 독성을 가질 수 있다. 현재까지 보고된 자료에 따르면 유리섬유는 발암성이나 폐섬유화증과 같은 치명적인 질병을 일으킨다는 확증은 없으나 자극성이 매우 강하고 시야에 장애를 주는 등 다른 영향을 일으킬 수 있는 것으로 알려져 있으므로 일반 분진과는 차별성을 두어 관리해야 할 것이다. 또한 최근에 유리섬유 보온재 공장 주변 주민의 집단적인 종양 발생이 공장으로부터 누출된 유리섬유로 오염된 지하수와 관련이 있다는 보고서가<sup>13)</sup> 나왔기 때문에 아직까지는 유리섬유의 안전성에 대해서 안심할 수는 없다. 따라서 인조섬유의 폭로를 최소화하도록 하며 근로자의 폭로를 올바르게 평가하는 방법이 확정되어야 하겠고 또한 허용기준도 섬유 농도로 규정되어야 한다.

현재 우리나라의 석면에 대한 허용기준은 백석면(chrysotile)인 경우 2 f/cc로,<sup>27)</sup> 미국 등 여러나라에

서 설정하고 있는 유리섬유와 암면의 기준  $1 \text{ f/cc}^{1,2)}$  보다 낮다. 아직까지 석면에 비해 유해성이 작은 것으로 알려져 있고 발암성이 확정되지 않은 유리섬유나 암면에 대해 발암성이 외국의 허용기준을 그대로 채택하여 석면보다 낮게 설정하는 것은 타당하지 않다. 그러나 현재 우리나라의 석면의 허용기준은 근로자의 건강을 보호하기에는 적절하지 않는 것으로 판단된다. 노동부에서 석면의 허용기준을 규정할 때 ACGIH에서 권고하는 Threshold Limit Values (TLVs)를 채택하였으나, ACGIH에서는 석면의 허용기준을 석면의 종류에 관계없이  $0.2 \text{ f/cc}$ 로 개정할 것을 공고하였으며<sup>20)</sup> 조만간  $0.2 \text{ f/cc}$ 로 확정될 것으로 보인다. 미국 정부 OSHA의 법적 허용기준은  $0.2 \text{ f/cc}$ 로 이미 개정된 바 있다. 따라서 우리나라에서도 근로자의 건강을 보호하기 위한 석면에 대한 허용기준을 현재보다 낮게 개정하여야 한다고 판단된다. 우리의 현실을 고려하여 미국의 허용기준과 같은 수준으로 낮추는 것은 어려움이 있다. 그러나 오등이<sup>30)</sup> 우리나라의 석면 노출농도의 변이를 고려하여 석면허용 기준을  $0.5 \text{ f/cc}$ 로 낮추도록 제안한 바 있으므로 일차적으로  $0.5 \text{ f/cc}$ 로 낮추고 작업환경 개선 방법을 연구하여 단계적으로 허용기준을 더 낮추는 것이 타당하리라 본다. 이와 동시에 유리 섬유 등에 대해 현재 충분진으로 규정되어 있는 허용기준을 섬유 농도로 적절하게 재정하여야 할 것이다.

내화성의 세라믹 섬유의 경우 역학 연구가 아직 충분히 확보되지 않아 인체에 대한 발암성 여부는 확정되지 않았으나, 동물 흡입 실험결과 발암성이 다른 섬유에 비해 더욱 강하다는 증거가 있으므로 이에 대해서는 특별한 주의와 관리가 요구된다. 미국의 경우에도 이 섬유에 대한 허용기준이 아직까지 확립되어 있지 않고 있으나 여러 연구자나 인조섬유 관련 자문위원회에서는 OSHA의 석면과 동일한 허용기준을 설정하여 관리하도록 주장하고 있다.<sup>1,2)</sup>

현재의 석면과 유리섬유의 허용기준은 우리나라 산업보건의 발전과 국제적인 추세에 비해 시대에 뒤떨어진 기준이라 볼 수 있다. 빠른 시일내에 석면에 대한 허용기준 개정에 관한 논의와 이와 아울러 인조섬유의 허용기준에 대한 논의가 있어야 할 것이다.

#### IV. 결 론

본 연구는 유리면 및 단열재 제조 사업장 근로자의 섬유 및 분진 노출 농도를 평가하고, 건강장해와

밀접이 관련이 있는 것으로 알려진 공기중 섬유의 크기 특성을 파악하고자 실시하였다. 또한 중량법에 의한 충분진 농도와 섬유계수법에 의한 섬유농도의 관계를 살펴봄으로써 유리섬유 취급 업종 근로자의 올바른 노출 평가방법을 제시하였으며 연구결과는 다음과 같다.

1. 유리섬유와 단열재를 제조하는 5개 사업장을 대상으로 섬유 농도를 평가한 결과, 대상 사업장 근로자의 평균 섬유 노출 농도는  $0.013 \sim 0.056 \text{ f/cc}$ 로, OSHA의 허용기준(PEL)인  $1 \text{ f/cc}$ 보다 훨씬 낮은 노출 수준을 보였다. 가장 낮은 농도 수준을 보인 사업장의 평균 농도는  $0.013 \text{ f/cc}$ 였고 이 사업장을 제외한 4개 사업장의 노출 농도는  $0.046 \text{ f/cc}$ 로 앞의 사업장과는 유의한 차이가 있었다( $p < 0.05$ ). 공정별로는 절단 공정 및 분쇄공정의 섬유 농도가 다른 공정보다 유의하게 높게 나타나( $p < 0.05$ ), 이 공정에서는 특별한 관리가 필요한 것으로 판단된다.

2. 각 사업장의 공기중 섬유의 크기 특성을 살펴본 결과, 한 사업장의 섬유 길이의 기하평균이  $105 \mu\text{m}$ 이고 이를 제외한 다른 사업장들은  $42 \sim 50 \mu\text{m}$ 의 길이 분포를 보였다. 섬유 직경의 분포를 살펴본 결과, 공기중 섬유직경의 기하평균이  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  범위에 있는 것으로 나타났다. 호흡성 섬유에 해당되는 직경이  $3 \mu\text{m}$  이하인 섬유의 비율은 2개 사업장이 각각 38.9 및 46.6 %로 유사하였고 나머지 2개 사업장은 각각 82.3 % 및 90.9 %로 유사하였다.

3. 절단 및 분쇄 공정의 섬유의 길이 분포는 기하평균이 각각  $35 \mu\text{m}$  및  $33 \mu\text{m}$ 로 매우 유사하였으나, 섬유형성 공정의 섬유 길이의 기하 평균은  $50 \mu\text{m}$ 로 나타나 절단 및 분쇄 공정과는 차이가 있었다. 그러나 섬유 직경은 공정에 관계없이 거의 유사한 분포를 보였다.

4. 섬유계수법과 중량법에 의한 결과간의 상관계수는 0.25로 나타나 두 방법간의 상관성은 비교적 약한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 섬유의 직경 및 비섬유상의 분진의 영향에 기인한다고 판단되며, 따라서 분진농도로 섬유농도를 예측하는 것은 타당치 않으며, 건강상의 영향을 초래하는 주요 물질은 섬유이기 때문에 근로자의 정확한 노출 평가는 섬유계수법에 의한 섬유농도에 근거하여야 한다.

5. 유리 섬유를 비롯한 인조섬유는 피부 자극성이 강하고 발암성이 의심되고 있기 때문에 현재와 같이 유리 섬유의 허용농도를 충분진과 동일하게  $10 \text{ mg/m}^3$ 으로 설정하는 것은 적합하지 않다. 적어도 피부

자극을 고려한다면 2종 분진의 허용농도인 5 mg/m<sup>3</sup>로 낮추는 것이 타당하며, 유리 섬유를 비롯한 인조섬유의 경우 섬유 농도로서 허용기준을 설정하는 것이 더욱 바람직하다. 외국의 경우 일반적으로 1 f/cc를 허용기준으로 채택하고 있으나 우리나라는 석면섬유의 허용기준이 2 f/cc로 설정되어 있는 실정이므로 앞으로 석면과 함께 인조섬유의 허용기준을 개정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1) Bender, J.R., J.L. Konzen, G.E. Devit: Occupational Exposure Toxic Properties, and Work Practice Guidelines for Fiber Glass. Fairfax, VA, AIHA, 1991.
- 2) Kojola, W.H. and J.B. Moran: Exposure Limits for Man-Made Mineral Fibers. Position of the Building and Construction Trades Department, AFL-CIO. Appl. Occup. Environ. Hyg. 7(1):724-733. 1992.
- 3) International Agency for Research on Cancer (IARC): Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human Man-Made Mineral Fibers and Radon. Vol. 43, World Health Organization/International Agency for Research on Cancer, Lyon, France, 1988.
- 4) International Programme on Chemical Safety: Environmental Health Criteria 77: Man-Made Mineral Fibers. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1988.
- 5) International Labor Organization: Safety in the Use of Mineral and Synthetic Fibers-Working Document. Meeting of Mineral and Synthetic Fibers, International Labor Office, Geneva, Switzerland. April 17-25, 1989.
- 6) Engholm, G., A. Englund, A.C. Fletcher, N. Hallin: Respiratory Cancer Incidence in Swedish Construction Workers Exposed to Man-Made Mineral Fibers and Asbestos. Ann. Occup. Hyg. 31, 663-675, 1987.
- 7) Gardner, M.J. C. Magnani, B. Pannett: Lung Cancer Among Glass Fiber Production Workers: A Case-Control Study. Br. J. Ind. Med. 45, 613-618, 1988.
- 8) Wagner, J.C., G.B. Berry, R.J. Hill: Animal Experiment with MMM(V)F - Effect of Inhalation and Intrapleural Inoculation in Rats. In: Biological Effect of Man-Made Mineral Fibres, Vol. 2, pp. 209-233. Proceeding of a WHO/IARC Conference, April 20-22, 1982. Copenhagen. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, 1984.
- 9) Smith, D.M., L.W. Ortiz, R.F. Archuleta, N.F. Johnson: Long-Term Health Effects in Hamsters and Rats Exposed Chronically to Man-Made Vitreous Fibres. Ann. Occup. Hyg. 31, 731-754, 1987.
- 10) Stanton, M.F., M. Layard, A. Tegeris: Carcinogenicity of Fibrous Glass: Pleural Response in the Rat in Relation to Fiber Dimension. J. Natl Cancer Inst. 58, 587-603, 1977.
- 11) Lippman, M.: Man-Made Mineral Fibers (MMMF): Human Exposure and Health Risk Assessment. Toxicol. Ind. Health 6(2), 225-246, 1990.
- 12) Bunn III, W.B., J.R. Bender, T.W. Hesterberg, G. R. Chase, J.L. Konzen: Recent Study of Man-Made Vitreous Fibers. Journal of Occupational Medicine, 35(2):101-113, 1993.
- 13) 임현술, 정해관, 김지용, 정희경: 유리섬유에 장기간 폭로된 지역 주민의 건강 장애에 관한 역학 조사. 서울대학교 보건대학원 산업보건학교실 10주년 기념학술대회, 서울대 산업보건동우회 1995년 10월.
- 14) National Institute for Occupational Safety and Health: Method 7400: Asbestos and Other Fibers by PCM. In: NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th ed. DHHS(NIOSH) Pub. No. 94-113, NIOSH, Cincinnati, Ohio, 1994.
- 15) Timbrell, V.: Aerodynamic Considerations and Other Aspect of Glass Fiber. In Occupational Exposure to Fibrous Glass-A Symposium (NIOSH Pub. No. 76-151). Washinton, D.C.: Department of Health, Education, and Welfare, 1976.
- 16) World Health Organization(WHO): Reference Methods for Measuring Airborne Man-Made Mineral fibers. World Health Organization, Copenhagen, 1985.
- 17) National Institute for Occupational Safety and Health: Method 0500: Particulates Not Otherwise Regulated, Total. In: NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th ed. DHHS(NIOSH) Pub. No. 94-113, NIOSH, Cincinnati, 1994.
- 18) Schneider, T., E. Holst: Man-Made Mineral Fiber Size Distributions Utilizing Unbiased and Fiber Length Biased Counting Methods and Biased Counting Methods and the Bivariate Log-Normal Distribution. J. Aerosol Sci., 14(2), 139, 1983.
- 19) Jacob, T.R., J.G. Hadley, J.R. Bender, W. Eastes: Airborne Glass Fiber Concentrations During Manufacturing Operations Involving Glass Wool Insulation. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 54(6), 320-326, 1993.
- 20) Corn, M. and E.B. Sansone: Determination of Total Suspended Particulate Matter and Airborne Fiber Concentrations at Three Fibrous Glass Manufacturing Facilities. Environ. Res. 8, 37-52,

- 1974.
- 21) Ottery, J. J.W. Cherri, J., Dodgson and G.E. Harrison: A Summary Report on Environmental Conditions at 13 European MMMF Plants. In Biological Effects of Man-Made Mineral Fibers: Proceedings of a WHO/IARC Conference Volume I. Copenhagen, Denmark: World Health Organization, 20-22 April 1982, pp.83-117, 1984.
  - 22) Cherri, J. J. Dodgson, S. Groat and W. Maclaren: Environmental Surveys in the European Man-Made Mineral Fiber Production Industry. Scan. J. Work Environ. Health 12 (Supp. 1), 18-25, 1986
  - 23) Esmen, N.A., M. Corn, Y.Y. Hammand: Summary of Measurements of Employee Exposure to Airborne Dust and Fiber in Sixteen Facilities Producing Man-Made Mineral Fibers. Am. Ind. Hyg. assoc. J. 40, 108-117, 1979.
  - 24) Thermal Insulation Manufacturing Association: Health and Safety Aspects of Man-Made Vitreous Fibers. Submitted by TIMA in Response to NIOSH's Request for Comments and Secondary Data Relevant to Occupational Exposure to Synthetic and Natural Mineral Fibers. Fed. Reg. 55: 5073, February 13, 1990.
  - 25) Head, I.W.H. and R.M. Wagg: A Survey of Occupational Exposure to Man-Made Mineral Fiber Dust. Ann. Occup. Hyg. 23, 235-258, 1980.
  - 26) Lees, P.S.J., P.N. Breyse, B.R. McArthur, M.E. Miller, B.C. Rooney, C.A. Robbins and M. Corn: End User Exposure to Man-Made Vitreous Fibers: I. Installation of Residential Insulation Products. Appl. Occup. Environ. Hyg. 8(2), 1022-1030, 1993.
  - 27) 노동부: 유해물질의 허용농도, 노동부 고시 제91-21호, 노동부, 1991.
  - 28) American Conference of Governmental Industrial Hygienists: TLVs Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1995-1996. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio, 1995
  - 29) U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration: Preamble and Proposed Rule to Revised Air Contaminant Standards for Construction, Maritime and Agriculture. Fed. Reg. 57(114):26457, 26202, 26208, June 12, 1992.
  - 30) 이승욱 편저: 통계학의 이해 - 보건학 의학 생물학 관련 자료 중심, 자유아카데미, 1990.
  - 31) Jaffery, T.S.A.M: Levels of Airborne Man-Made Mineral Fibres in U.K. Dwellings. I - Fibre Levels During and After Installation of Insulation. Atmospheric Environment, 24A(1), 133-141, 1990.
  - 32) 백남원, 이영환: 석면취급 사업장 근로자의 석면폭로 특성에 관한 연구. 한국산업위생학회지, 1(2), 144-153, 1991.
  - 33) Konzen, J.L: Results of Environmental Air Sampling Studies Conducted in Owens-Corning Fiberglass Manufacturing Plants. In Occupational Exposure to Fiberglass Proceedings of a Symposium(DHEW/NIOSH Pub. No. 760151). Washington D.C., Government Printing Office, pp. 115-120, 1976.
  - 34) Reidiger, G.: Measurements of Mineral Fibers in the Industries Which Produce and Use MMMF. In Biological Effects of Man-Made Mineral Fibers: Proceedings of a WHO/IARC Conference. Vol. 1. Copenhagen, Denmark, World Health Organization. pp. 133-177, 1984.
  - 35) Christensen, V.R., W.E. Eastes, R.D. Hamilton, A.W. Struss: Fiber Diameter Distributions in Typical MMVF Wool Insulation Products. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 54(5):232-238, 1993.
  - 36) Berum, N.O., E. Holst, and T. Schneider: Evaluating Occupational Exposure to Man-Made Mineral Fibre Dust by a Screening Test. Staub Reinhalt Luft 46, 276-283, 1986.
  - 37) Schneider, T.: Mass Concentration of Airborne Man-Made Mineral Fibres. Ann Occup. Hyg. 31, 211-217, 1987.
  - 38) 오세민, 신용철, 박두용, 박동욱: 석면취급사업장의 석면폭로 및 개선방안에 관한 연구, 한국산업위생학회. 3(1), 1993.