

세라믹 섬유 제조 및 가공 공정에서 발생된 공기중 섬유의 농도 및 크기 분포

신 용 철[†]

인제대학교 산업안전보건학과

Determination of Airborne Fiber Size and Concentration in RCF Manufacturing and Processing Factories

Yong Chul Shin[†]

Dept. of Industrial Safety and Health, Inje University

(Received 26 August 2000 ; Accepted 25 November 2000)

ABSTRACT

Various man-made mineral fibers (MMMF) including refractory ceramic fiber (RCF) have been used widely in industries as insulation materials. The effect of fibrous dust on human health depends on fiber size, concentration (exposure level), and durability in biological system. Therefore, these parameters should be determined to evaluate accurately the potential risk of fibers on human health. The purpose of this study was to characterize the size of airborne fiber and the workers' exposure to airborne fibers in refractory ceramic fiber manufacturing and processing factories. Airborne fibers were collected on 25-mm mixed cellulose ester membrane filters at personal breathing zones, and analyzed by A and B counting rules of the National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Method # 7400. The average ratios of the fiber density by B rule to the fiber density by A rule was 0.84. This result indicates that the proportion of respirable fibers (< 3 μm diameter) in air samples was high. The average diameter and length of airborne fibers were 1.05 μm and 35 μm , respectively. The average fiber concentrations (GM) of all personal samples was 0.26 f/cc, and the average concentration was highest at blanket cutting and packing processes. The fifty seven percent of personal air samples was exceeded the proposed American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) Threshold Limit Value (TLV), i.e. 0.2 f/cc. It was concluded that the RCF industrial workers had the higher potential health risk due to small fiber diameter, long fiber length, and high exposure level to the airborne fibers.

Keywords : Man-made mineral fibers, Refractory ceramic fiber, Airborne fiber diameter and length, Exposure to airborne fiber

I. 서 론

인조 광물섬유(man-made mineral fiber, man-made vitreous fiber, synthetic mineral fiber, or MMMF) 중 내화성 세라믹 섬유(refractory ceramic fiber, RCF)는 고령토(kaoline clay)로부터, 알루미나(alumina), 실리콘(silicon), 또는 기타 금속 산화화합물로부터, 그리고 드

풀지만 실리콘 카바이드(silicon carbide) 또는 실리콘 나이트라이드(silicon nitride)와 같은 산화합물로부터 제조되기도 한다. 천연 섬유는 결정성인 반면에 대부분의 MMMF는 비결정성형의 규산이다. 다만, 대부분의 세라믹 섬유는 제조 단계에서는 비결정형이나 고온(>1000 °C)에서는 일부 결정형의 물질(cristobalite, mulite)로 변성될 수 있다(IPCS, 1988).

세라믹 섬유는 산업장 용해로와 같은 고온 조건 하에서의 단열재(thermal blanket)나 연결 접합부의 충전재로 사용되고 있다(IPCS, 1988). 우리나라의 세라믹 섬유 생산업체 수는 2개소로 이들 업체의 1997년도 세라믹 섬유 생산량은 502.3톤이고, 같은 해 수입량은

[†]Corresponding author : Department of Industrial Safety and Health, Inje University, 607 Obang-Dong, Kimhae, 621-749 Korea
Tel: 055-320-3676, Fax: 055-325-2471
E-mail: ycshin@ijnc.inje.ac.kr

1,274.6톤이었다(관세청, 1998).

동물흡입 시험결과, 세라믹 섬유에 의해 폐종양 발생이 유의하게 증가하였다는 보고가 있다(IARC, 1988). 세라믹 섬유는 다른 인조광물 섬유에 비해 체내에 오래동안 잔류하는 것으로 알려져 있다. 쥐의 복막 내에 주사했을 때 종피종이 발생하였다는 보고가 있으나 아직까지 산업장 근로자에 대한 역학자료가 부족한 상태이다. 그러나 동물에 대한 발암성이 있는 것으로 확인되었으며 미국 Environmental Protection Agency (EPA, 1991)에서는 사람에게 심각한 발암성이 있다는 결론을 내렸다.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH, 2000)에서는 Threshold Limit Values(TLV) 개정공고판(Notice of Intended Changes)에 내화성 세라믹 섬유를 인체발암의심물질(suspected human carcinogen, A2) 및 허용농도 0.2 f/cc로 공고하였다. 미국 Occupational Safety and Health Administration(OSHA, 1992)는 1992년에 세라믹 섬유를 비롯한 인조광물섬유에 대한 Permissible Exposure Limit(PEL)를 1 f/cc로 제안한 바 있으며 National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH, 1988)에서는 미국 OSHA의 석면 기준과 동일하게 관리하도록 주장한 바 있다. 현재 우리나라 노동부는 세라믹 섬유에 대한 노출기준을 규정하고 있지 않다. 다만 유리 섬유의 노출기준을 일반 분진(nuisance dust)과 동일한 10 mg/m^3 로 설정하고 있다(노동부, 1991).

이와 같이 인조광물 섬유는 동물발암물질이며 인체발암물질로 의심되는 물질이기 때문에 구미에서는 이 물질의 유해성을 인식하여 건강 장해를 예방하기 위해 관리를 하고 있다. 그러나 국내에서는 광물섬 섬유의 유해성에 대한 인식이 부족하고 관리가 소홀한 실정이며, 특히 작업환경 공기중 세라믹 섬유 농도와 크기에 대한 자료는 없다. 따라서 본 연구의 목적은 세라믹 섬유 제조 및 가공 공정에서 발생되는 섬유의 크기와 농도 분포를 파악하고, 근로자의 세라믹 섬유 노출에 의한 건강 위험 수준을 평가하는데 있다.

II. 대상 및 방법

1. 대상

우리나라의 세라믹 섬유 제품 제조업체는 2개소로 본 연구는 이 두 업체를 대상으로 하였다. 이들 업체에서는 원료로부터 섬유를 생산한 후 세라믹 울(ceramic wool), 블랭킷(blanket), 보드(board) 및 모듈(module)과

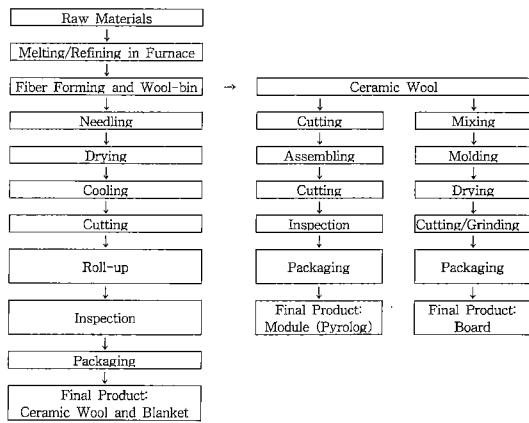


Fig. 1. Simplified flowchart for ceramic wool and insulations production.

같은 단열재를 생산하고 있었다.

Fig. 1은 세라믹 울, 블랭킷, 보드 및 모듈 생산 공정의 흐름을 나타낸 것이다. 세라믹 울 제조공정은 유리면 또는 암면의 제조공정(신용철 등, 1996)과 유사하나, 다만 세라믹 울에는 바인더를 첨가하지 않고 나들링 머신(needling machine)으로 재단을 함으로써 울이 압축된 상태로 유지되게 하였다. 재단된 세라믹 울을 건조기에 통과시킨 다음 양 가장 자리를 회전날로 절단하였다. 다음으로 수직 절단기로 일정한 길이로 자르고 근로자는 이를 감아 포장을 하였다. 근로자는 용해로 설비를 포함한 제조 설비를 점검하거나 포장 작업에 주로 종사하였다. 간헐적으로 제품 품질에 이상이 있으면 중간 단계에서 제품을 제거하는 과정에서 다량의 섬유가 발생되고 있었다.

이와 같이 생산된 세라믹 울을 가공하여 모듈, 보드 등의 단열재 제품을 생산하고 있었다. 조사기간 동안 한 업체(KR)에서 모듈을, 다른 업체(KK)에서는 보드를 생산하고 있었다. 모듈은 세라믹 울을 일정한 크기로 절단하고 이를 용해로 벽에 부착시킬 수 있는 부품과 조립된다. 이와 같이 조립된 중간 제품은 마무리한 후(가장 자리를 절단기로 더듬음) 근로자가 완성된 제품을 직접 포장하였다. 모듈 생산 공정에서는 고농도의 분진이 발생되고 있었고 이 공정과 인접한 세라믹 울 포장 작업자도 모듈 생산공정에서 발생되는 섬유에 노출될 우려가 있었다. 보드는 세라믹 울(재생 울이 대부분분임), 석회 등과 물과 혼합한 분산액을 주형(mold)에 넣어 성형한다. 일정한 모양으로 성형된 보드는 오븐에서 건조하고 다음으로 연마, 절단 등의 기공 공정을 거친 후 포장한다. 조사당일 가공 공정 작업이 없었다. 근로자는 혼합조에 원료를 투입하고 조정하는 작업, 성

형설비의 제어판을 조정하는 작업, 가공 작업, 포장 작업에 종사하고 있었다.

2. 방법

1) 공기중 섬유 시료 채취 및 분석

공기중 섬유농도는 NIOSH Method #7400(NIOSH, 1994)을 이용하여 측정하였다. 여과지의 일부를 잘라 acetone/triacetin으로 투명화시킨 후, Walton-Beckett graticule^o 삽입된 위상차현미경(Axioscop 20, Carl Zeiss, German)으로 400배의 배율에서 섬유 수를 측정하였다. 여과지상의 섬유 계수는 두 가지 계수규칙 ("A" 및 "B" 규칙) 모두 적용하여 분석하였다. A 규칙에 따라 길이가 5 μm를 초과하고 길이 대 직경비(aspect ratio)가 3:1 이상인 섬유를 계수하였으며, B 규칙에 따라 길이가 5 μm를 초과하고 길이대 직경의 비가 5:1 이상인 섬유중에서 직경이 3 μm 미만인 섬유만을 계수하였다.

2) 근로자 섬유 노출 농도 평가

공기중 섬유 농도는 대수평균분포를 하므로 기하평균(geometric mean, GM)과 기하표준편차(geometric standard deviation, GSD)를 구하였다. 각 요인에 따른 공기중 섬유농도 차이는 일원분산분석 통계량을 이용하여 검정하였다. 근로자의 섬유 노출 농도는 2000년에 개정고시된 ACGIH의 TLV인 0.2 f/cc(A2)에 근거하여 평가하였다.

3) 공기중 섬유 크기 결정

섬유 직경 및 길이의 특성을 살펴보기 위해 섬유제조 설비에서 인접한 위치에서 작업하는 근로자의 호흡위치에서 채취된 시료를 선택하여 위상차현미경으로 관찰하였다.

'A' 규칙에 의한 값에 대한 'B' 규칙에 의한 값의 비를 산출하여 업체 및 공정별 섬유 크기 특성을 파악하였다. A 규칙은 길이 대 직경의 비가 3:1 이상을 만족하는 모든 섬유를 측정하나 B 규칙은 길이 대 직경의 비가 5:1 이상이고 직경이 3 μm 미만인 섬유를 측정한다.

대부분의 연구자들은 직경 3 μm를 호흡성 섬유(respirable fiber)의 분류기준으로 사용하고 있다(Timbrell, 1976). Head와 Wagg(1980) 호흡성 섬유를 직경이 3 μm 미만이고 길이가 5 μm보다 큰 섬유라고 규정하였다. A 규칙은 섬유 계수시 직경의 한계를 정하지 않은 반면, B 규칙은 계수되는 직경의 한계를 3 μm 미만으로 정하고 있다. 따라서 두 계수 규칙에 의해 구한 섬유 밀도의 비(B/A)를 구하여 섬유의 크기 분포를 간접적으로 살펴보았고, 이와 함께 위상차현미

경으로 400배의 배율에서 섬유의 직경과 길이를 재어 섬유의 크기 분포를 파악하였다.

III. 결 과

1. 공기중 섬유의 크기 분포

1) A 규칙 계수결과에 대한 B 규칙 계수 결과의 비: Table 1은 A 규칙에 의한 계수 결과에 대한 B 규칙에 의한 계수 결과의 비(B/A)를 보여주고 있다. 전체 시료의 B/A 값은 0.84로 나타났다. A 규칙을 만족하는 섬유중 직경이 3 μm 미만인 호흡성 섬유의 비율은 84%로 섬유의 직경이 비교적 작은 분포를 보이고 있었다. 업체간의 B/A 값은 통계적으로 유의한 차이가 없었다($p>0.05$).

Table 2에는 생산제품 또는 공정별로 B/A 값을 제시하였다. 각 공정에 조사된 B/A 값은 최소 0.83, 최고 0.90이었으나 B/A 값은 공정에 따른 유의한 차이는 없었다($p>0.05$).

2) 현미경에 의한 섬유길이 및 직경 측정결과

Table 3 및 Fig. 2는 섬유 직경 분포를 나타낸 것으로 섬유 직경 분포는 1 μm 미만인 섬유의 비율이 가장 높고, 2 μm 미만의 섬유는 전체 섬유의 약 80% 정도

Table 1. Ratios of Count Results by B Rule to Count Results by A Rule by Fiber Type and Factory

Factory	Product or Operation	N	Ratio of B Rule to A Rule, GM (GSD)
SWKK	Fiber; blanket production; board production	67	0.86 (1.32)
KR	Fiber; blanket; module production	39	0.81 (1.25)
Total		106	0.84 (1.30)

Table 2. Ratios of Count Results by B Rule to Count Results by A Rule by Operation

Operation	N	Ratio of B Rule to A Rule
Fiber/blanket production	81	0.83 (1.29)
Module production	10	0.90 (1.44)
Pyrolog production	15	0.83 (1.26)
Total	106	0.84 (1.30)

Table 3. Diameter Distribution of Airborne RCF Fibers

Diameter, μm	<1	1~2	2~3	3~5	5~10	>10
Proportion, %	46.0	35.8	12.4	4.4	1.4	0

Note: No. of measured fibers = 140.

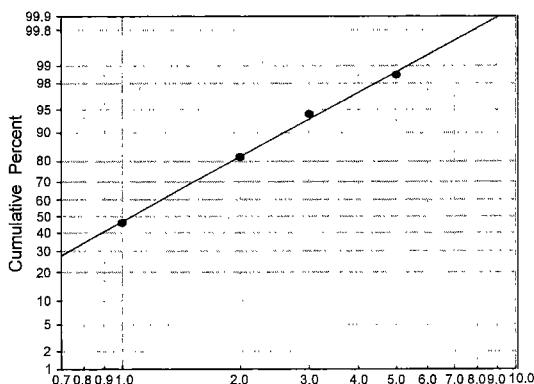


Fig. 2. Diameter distribution of airborne RCF fibers.

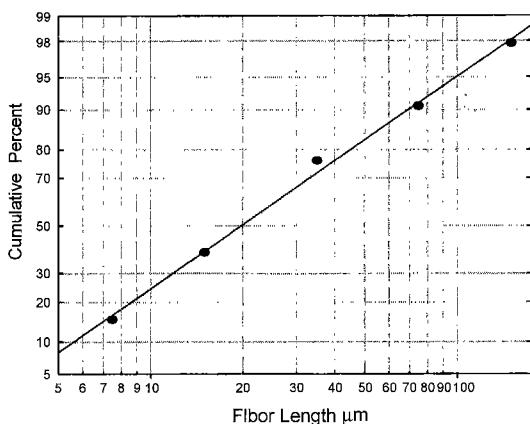


Fig. 3. Length Distribution of airborne RCF fiber.

의 비율을 차지하였다. 전체 섬유중 직경이 3 μm 미만인 섬유의 비율은 94.2%로 나타났다.

Table 4. Length Distribution of Airborne RCF Fibers

Length, μm	<5	5-<10	10-<20	20-<50	50-<100	>100
Proportion, %	0	15.0	23.6	37.9	14.3	9.2

Note: No. of measured fibers = 140.

공기 시료중 섬유의 직경은 앞의 결과에서 보듯이 약 1 μm로 제품의 섬유 직경 (2.5-3.5 μm)보다 작았다. 섬유 형성, 가공, 및 취급중에 크기가 작은 섬유는 공기 중으로 쉽게 비산되고, 또한 크기가 큰 섬유는 빨리 침강되지만 작은 섬유는 정체 시간이 길어 공기중에는 작은 섬유가 높은 비율로 존재하리라 본다. 이러한 결과로 미루어 보아 근로자가 노출되는 공기중 섬유의 직경을 제품의 직경으로부터 추정하는 것은 부정확하다.

대상 사업장의 공기중 세라믹 섬유질이 분포는 Table 4 및 Fig. 3에서 보듯이 20-50 μm인 범위에서 가장 높은 비율로 분포하고 있었다.

2. 공기중 섬유 농도 분포

1) 개인시료

가. 사업장 및 생산품별 농도

Table 5는 각 업체 근로자의 세라믹 섬유 노출 농도 분포를 생산 제품에 따라 나타낸 것이다. 두 개 사업장에서 채취한 전체 개인 시료의 농도는 0.044-1.4 f/cc의 범위에 있었고 평균은 0.26 f/cc이었다.

KR 사업장의 섬유/blanket 및 모듈 제조 라인의 섬유 농도는 각각 0.29 및 0.34 f/cc이었고 두 라인의 평균 농도는 0.32 f/cc이었다. 이 사업장 대상 근로자의 78.9%가 개정 고시된 ACGIH TLV(ACGIH, 2000)인 0.2 f/cc를 초과하는 것으로 나타났다. KK 사업장의 섬유 및 보드 제조 라인의 섬유농도는 각각 0.21 및

Table 5. Airborne Fiber Concentrations by Factory and Product

Factory	Product	N	Fiber Conc.		No. of Samples Exceeding the the TLV ^A (%)
			GM, f/cc (GSD)	Range, f/cc	
KR	Fiber/Wool/Balnket	7	0.29 (2.07)	0.088-0.74	5 ^B (71.4)
	Module (Pyrolog)	12	0.34 (2.23)	0.044-0.70	10 (83.3)
	Subtotal	19	0.32 (2.14)	0.044-0.74	15 (78.9)
KK	Fiber/Wool/Blanket	12	0.21 (3.12)	0.059-1.4	4 (33.3)
	Board	4	0.16 (2.44)	0.073-0.53	1 (25)
	Subtotal	16	0.20 (2.88)	0.073-1.4	5 (31.3)
Total		35	0.26 (2.54)	0.044-1.4	20 (57.1)

Note:

GM: Geometric mean; GSD: Geometric standard deviation.

^AThe TLV for refractory ceramic fiber, 0.2 f/cc, was listed in the Notice of Intended Changes.

^BNumber of samples exceeding the ACGIH TLV. The values in parenthesis are percent.

Table 6. Personal Exposure Levels to Fibers by Task

Production Facility	Operation	N	Fiber Conc.	
			GM, f/cc(GSD)	Range, f/cc
Ceramic wool/ blanket	Operation of fiber forming facility and furnace	5	0.10	1.7 0.059-0.23
	Maintenance of facilities	6	0.14	1.2 0.061-0.26
	Packaging	5	0.61	4.4 0.30-1.4
	Packing & maintenance of facilities	3	0.34	1.9 0.18-0.62
Module (Pyrolog)	Cutting	3	0.61	1.2 0.53-0.70
	Assembling	5	0.32	1.7 0.044-0.69
	Packing	3	0.43	1.6 0.28-0.69
	Repair man	1	0.04	
Board	Packaging	2	0.08	1.2 0.073-0.090
	Mixing	2	0.31	2.1 0.18-0.53

Note: GM: Geometric mean; GSD: Geometric standard deviation.

Table 7. Airborne Fiber Concentration in Area Samples in Ceramic Fiber Industry

Production Facility	Sampling Location	N	Fiber Conc.	
			GM, f/cc	GSD
Ceramic fiber/ blanket	Fiber-forming facility	19	0.12	3.38
	Needle machine	7	0.48	2.76
	Compress machine	3	0.15	1.18
	Cutting machine	13	0.14	2.12
	Packing site	9	0.23	1.42
	Grinding/recovery facility	5	0.20	3.22
Module (Pyrolog)	Background level	5	0.16	3.16
	Cutting machine	3	0.043	7.63
	Assembling machine	2	0.22	1.11
Board	Molding machine	4	0.04	1.74
	Mixing machine	3	0.56	1.55
	Near other facilites	3	0.03	1.61

Note: GM: Geometric mean; GSD: Geometric standard deviation.

0.16 f/cc이었고 두 라인의 평균 농도는 0.20 f/cc이었다. 이 사업장 대상 근로자의 31.3%가 개정 고시된 ACGIH TLV를 초과하는 것으로 나타났다. 두 사업장에서 채취한 전체 개인 시료중 57.1%는 개정 공고된 ACGIH TLV인 0.2 f/cc를 초과하였다. KR 업체의 평균 섬유농도가 높은 경향을 보이고 있으나 통계적인 검정결과 공기중 섬유 농도의 차이가 크므로 업체간에 유의한 차이는 없었다($p>0.05$).

나. 업무별 개인 노출 농도

Table 6에서 보듯이 두 사업장의 근로자의 업무별 섬유 농도로 업무에 따라 섬유 노출농도는 유의한 차이가 있었다($P<0.05$). 이들 업무중 포장 작업자의 노출 수준은 0.61 f/cc로 가장 높았으며 포장 작업과 설비를 관리하는 작업자의 노출수준은 0.34 f/cc로 포장 작업

자 다음으로 높았다. 모듈 제조 공정에서는 제품 절단 작업자, 포장 작업자 및 세라믹 보드 노출 수준은 각각 0.61 f/cc 및 0.43 f/cc이었다. 세라믹 보드 제조 공정에서는 원면을 배합하는 근로자의 농도가 0.31 f/cc로 비교적 높게 나타났다. 연구 대상 사업장중 KK 업체의 보드 제조 공정에서는 건조된 보드를 더듬거나 일정한 크기로 절단하는 공정이 있었으나 이들 공정에서 작업이 없어 측정에 포함되지 않았다. 이러한 연마 및 절단 공정에서는 다른 공정에 비해 비교적 높은 섬유분진이 발생되리라 추정되므로 이 공정에 대한 추가적인 조사가 필요하다.

2) 지역 시료

Table 7은 지역시료에서 채취한 시료의 섬유 농도로 공정에 따라 공기중 섬유 농도는 차이가 있었다

($p<0.05$). 세라믹 울/blanket 생산설비별로 본 공기중 섬유 농도는 needling 설비 0.48 f/cc, 포장 설비 0.23 f/cc, 파쇄/회수 설비 0.2 f/cc로 다른 설비에서 측정된 농도보다 높았다. Needling 설비에는 국소배기 장치가 설치되어 있었으나 효율이 낮은 것으로 보인다. 모듈 제조 공정에서는 섬유 분진이 발생되는 발생원에 국소 배기 장치가 설치되어 있지 않거나 일부 설치된 장치도 성능이 매우 불량하였다.

모듈 조립 및 절단 공정에서 채취한 시료의 섬유 농도는 각각 0.22 f/cc 및 0.043 f/cc로 나타났다. 절단 공정의 섬유농도는 조립공정보다 낮으나 가장 낮은 농도를 보인 시료는 작업이 이루어지지 않은 시간도 포함되어 있어 이를 제외한 나머지 시료의 평균 농도는 조립공정과 유사하였다. 세라믹 보드 생산공정에서는 배합공정에서 채취한 시료의 농도가 0.56 f/cc로 가장 높았으며, 성형공정의 평균 농도는 0.04 f/cc 성형설비에서 떨어진 거리에 따라 0.02-0.06 f/cc의 농도 분포를 보였다.

IV. 고 칠

섬유의 크기 특성(특히 직경)은 섬유노출에 따른 건강위험을 결정하는 중요한 요인중의 하나이므로 노출 평가시 섬유의 크기 특성을 고려하여야 한다. 생산되는 섬유의 종류 형태, 생산 공정 등에 따라 발생하는 섬유 크기 특성이 다르므로 근로자의 노출을 평가할 때 근로자의 노출량 뿐만 아니라 섬유 크기의 특성을 파악하는 것이 필요하다.

공기중 세라믹 섬유의 직경에 대해 발표된 다른 문헌을 보면 Christensen *et al.*(1993)은 0.3-3.9 μm , Rood(1988)은 0.5-1.0 μm , Hori *et al.*(1993)은 0.85-1.2 μm 라고 보고하였다. 본 연구결과는 이들 논문에서 보고한 결과와 유사하였다.

Christensen *et al.*(1993)은 광물섬유중 유리섬유의 직경은 1-8 μm , 암면 및 슬래그울의 직경은 2-5 μm 로 보고하였다. Jeffery(1990)는 공기중 유리섬유의 직경은 평균 1.42 μm 이고 암면 섬유의 직경은 2.3 μm 라고 하였으며, Konzen(1976)은 유리섬유 단열제품의 섬유 직경이 1-4 μm 라고 보고하였다. Cherri *et al.*(1986)은 유리섬유 제조 공장에서의 섬유직경의 중위값은 0.3-2.5 μm 라고 보고하였다. 이러한 연구결과에 근거했을 때 공기중 세라믹 섬유의 직경 분포는 유리섬유와 같은 다른 광물성 섬유에 비해 작다는 것을 알 수 있다.

Rood(1988)는 공기중 세라믹 섬유의 길이는 8-23 μm 으로, Hori *et al.*(1993)는 11-18.8 μm 로 보고하였다.

본 연구결과 공기중 세라믹 섬유의 길이는 평균 35 μm 로 이들이 발표한 값보다 크게 나타났다. 한편, Jaffery(1990)가 보고한 유리섬유(28.5 μm), 암면 섬유길이(39.6 μm)와 유사하였다. 국내에서는 백남원 및 이영환(1991)이 석면 방직업의 경우 섬유 길이의 기하 평균이 16.3 μm , 브레이크 라이닝 제조업의 경우 13.8 μm , 슬레이트 제조업의 경우 13.8 μm 라고 보고하였는데, 세라믹 섬유의 길이는 석면 섬유의 길이보다 길다는 것을 알 수 있다.

석면과 마찬가지로 인조광물섬유의 크기 특성과 전장 장하는 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 직경이 작을수록 그리고 길이가 길수록 그 유해성이 큰 것으로 알려져 있다(Wagner *et al.*, 1984; Smith *et al.*, 1987; Stanton *et al.*, 1977; Lippman, 1990; Bunn III *et al.*, 1993). 특히 Stanton *et al.*(1977)은 섬유의 독성은 직경이 0.25-1.5 μm 이고 길이가 8 μm 보다 큰 섬유의 수와 밀접한 관련이 있다고 하였다. 본 대상 사업장의 경우 이 범주에 해당되는 섬유가 많이 분포하고 있는 것으로 나타났다.

국내에서는 세라믹 섬유 제조 및 취급 사업장 근로자의 섬유 노출에 대해 보고한 논문은 없다. 외국의 경우 TIMA(1990)가 세라믹 섬유 제조업에서의 평균 섬유 농도는 각각 0.65 f/cc로 보고한 바 있다. Hori *et al.*(1993)은 2개 세라믹 섬유 제조 및 가공업체에서 채취한 개인시료의 섬유농도 범위가 0.09-3.69 f/cc이라고 보고하였다. 본 연구에서 얻은 개인 시료의 섬유 농도는 평균 0.26 f/cc, 범위 0.044-1.4 f/cc로서 다른 연구자들이 보고한 농도보다 낮은 수준이었다. 이러한 차이는 작업조건, 설비, 공학적인 관리 등의 차이에 따른 것으로 여겨진다.

국내에서는 신용철 등(1996)이 유리섬유 제조업체 5개소에 대해 조사한 근로자의 섬유노출 농도는 0.013-0.056 f/cc라고 보고한 바 있다. Jacob *et al.*(1993)은 유리섬유 제조 공장의 공기중 평균 총 유리섬유(total fiber) 농도는 0.002-0.14 f/cc이고 이 중 호흡성 유리섬유 농도는 0.001-0.07 f/cc로 보고하였다. Corn and Sansone(1974)은 2개소의 유리섬유 제조업체에서의 호흡성 섬유의 평균 농도는 0.006-0.07 f/cc이고 다른 1개소의 농도는 0.21-1.41 f/cc라고 보고하였다. Ottery *et al.*(1984)이 유리 섬유와 이의 제품을 생산하는 4개 사업장의 공정별 평균 호흡성 섬유농도는 0.003-0.03 f/cc로 보고하였다. 따라서 세라믹 섬유 업체 근로자의 섬유노출농도는 유리섬유 사업장에 비해 현저하게 높은 수준임을 알 수 있다.

유리섬유 사업장과 세라믹 섬유 사업장에서의 농도

차이가 큰 이유는 다음과 같이 추정된다. 첫째, 유리섬유 제조공정에서는 섬유간의 결합력을 유지시키기 위해서 결합제를 첨가하는데 이것이 공기중 섬유분진의 발생을 억제시키는 효과가 있는 반면, 세라믹 섬유 사업장의 경우 결합력을 유지하기 위해 결합제 대신 바느질(needling)로 재단하기 때문에 섬유의 비산이 잘 될 것이다. 둘째, 세라믹 섬유의 직경이 유리 섬유의 직경 보다 작아 호흡성 비율이 높기 때문이다. 공기중에 존재하는 섬유의 크기 특성, 즉 호흡성 섬유 비율의 차이는 근로자의 섬유 노출량을 결정하는데 있어 중요한 요인으로 작용한다. 작업환경의 총 섬유농도가 높다고 하더라도 호흡성 섬유의 비율이 적은 경우, 근로자의 노출평가는 호흡성 섬유에 근거하기 때문에 근로자의 실제 섬유노출농도는 낮게 나타날 것이다. 그러나 세라믹 섬유의 경우 총섬유 발생량은 비슷하더라도 호흡성 섬유의 비율이 높기 때문에 근로자의 실제 섬유 노출량은 높게 나타날 것이다.

섬유의 유해성은 섬유 직경, 농도 및 체내 지속성 등이 3가지 요인에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 세라믹 섬유는 다른 섬유에 비해 생체내에서 분해가 잘 되지 않는 다. 그리고 본 연구결과에서 보듯이 세라믹 섬유 사업장에서 발생된 공기중 섬유 직경은 작고 근로자의 섬유 노출 농도는 높은 수준이기 때문에 다른 인조광물섬유 사업장에 비해 건강위험성이 크다. 그러므로 다양한 인조광물섬유중 세라믹 섬유를 제조하거나 가공하는 업종에 종사하는 근로자들의 경우 우선적인 노출 관리가 필요하다.

한편, 단열재를 생산하는 공정보다는 시공 공정에서의 섬유농도는 일반적으로 높은 것으로 보고되어 왔다. 그러므로 세라믹 섬유 제품을 시공하는 근로자는 건강 위험도가 더욱 크리라 예상되므로 향후 이 업종 근로자들의 섬유 노출 양상에 대한 연구가 필요하다.

V. 결 론

본 연구는 세라믹 섬유 제조 및 가공업체 2개소를 대상으로 공기중 섬유의 크기 분포와 농도 분포를 파악하고 근로자의 노출 수준을 평가하였으며 결론은 다음과 같다.

- NIOSH 방법의 A 규칙에 의한 섬유 밀도에 대한 B 규칙에 의한 섬유밀도의 비는 0.84로 나타나 길이가 5 μm 이상인 섬유중에서 직경이 3 μm 미만인 섬유의 비율이 높았다. 이와 같은 결과는 공기중 존재하는 섬유중 직경이 작은 호흡성 섬유의 비율이 높다는 것을 의미한다.

- 공기중 세라믹 섬유의 직경은 측정한 140개의 시료중 1 μm 미만의 섬유는 46%, 3 μm 미만의 섬유는 94.2%로 나타났다. 섬유길이는 모두 5 μm 이상으로 20~50 μm에 가장 많이 분포하였다.

- 두 개 사업장에 종사하는 근로자의 섬유노출 농도는 평균 0.26 f/cc로 업체별 농도간에는 차이가 없었다 ($p>0.05$). 전체 개인시료 35개중 개정 고시된 ACGIH의 TLV 0.2 f/cc를 초과하는 시료수는 20개(57.1%)였다.

- 공정별 세라믹 섬유 농도는 모듈 생산라인에서 제품을 절단하거나 세라믹 섬유 제품(을 및 블랭킷)을 포장하는 공정에서의 농도는 0.61 f/cc로 섬유 농도가 가장 높은 공정이었으며 이 공정의 최고 농도는 1.4 f/cc였다. 다음으로 높은 공정은 블랭킷을 포장하는 공정으로 섬유농도는 평균 0.43 f/cc이었다.

- 연구 대상 사업장의 공기중 섬유는 직경이 작고 길이가 길어 인체에 미치는 영향이 클 뿐만 아니라 공기중 섬유 농도가 높아 근로자의 건강위험은 유리섬유와 같은 인조광물섬유 사업장보다 크므로 우선적인 관리가 요구된다.

참고문헌

- 관세청: 1997 무역통계 연보. 관세청, 1998.
- 노동부: 유해물질의 허용농도, 노동부 고시 제91-21호. 노동부, 1991.
- 백남원, 이영환: 석면취급 사업장 근로자의 석면폭로 특성에 관한 연구. 한국산업위생학회지, 1(2), 144-153, 1991.
- 신용철, 이광용, 박천재, 이나루, 정동인, 오세민: 유리섬유 단열재 제조업 근로자의 공기중 유리섬유 폭로 특성 및 평가 방법에 관한 연구. 한국환경위생학회지, 22(2), 43-57, 1996.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH): *Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 2000*. ACGIH, Cincinnati, Ohio, 2000.
- Bunn III. WB, Bender JR, Hesterberg TW, Chase GR, Konzen JL: Recent study of man-made vitreous fibers. *Journal of Occupational Medicine*, 35(2), 101-113, 1993.
- Cherri J, Dodgson J, Groat S, and Maclareen W: Environmental surveys in the European man-made mineral fiber production industry. *Scan. J. Work Environ. Health* 12 (Supp. 1), 18-25, 1986.
- Christensen VR, Eastes WE, Hamilton RD, Struss AW: Fiber diameter distributions in typical MMVF wool insulation products. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 54(5), 32-238, 1993.
- Corn, M and Sansone EB: Determination of total suspended particulate matter and airborne fiber concentrations at three fibrous glass manufacturing facilities. *Environ. Res.*, 8, 37-52, 1974.

- 10) Environmental Protection Agency (EPA): Refractory Ceramic Fibers; Initiation of Priority Review. *Federal Register*, **56**(225), 58693-58695, 1991.
- 11) Head IWH, Wagg RM: A survey of occupational exposure to man-made mineral fibre dust. *Ann. Occup. Hyg.*, **23**, 235-258, 1980.
- 12) Hori H, Higashi T, Fujino A, Yamato H, Ishimatsu S, Oyabu T, and Tanaka I: Measurement of airborne ceramic fibers in manufacturing and processing factories. *Ann. occup. Hyg.*, **37**(6), 3-629, 1993.
- 13) International Programme on Chemical Safety (IPCS): *Environmental Health Criteria 77: Man-Made Mineral Fibers*. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1988.
- 14) 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.
- 15) Jacob TR, Hadley JG, Bender JR, Eastes W: Airborne glass fiber concentrations during manufacturing operations involving glass wool insulation. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **54**(6), 320-326, 1993.
- 16) Jaffery TSAM: 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.
- 17) Konzen JL: 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.
- 18) Lippman M: Man-made mineral fibers(MMMF): Human exposure and health risk assessment. *Toxicol. Ind. Health*, **6**(2), 225-246, 1990.
- 19) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH Docket Submission: Hearing on the Final Air Contaminants Rule for General Industry, Doc. H-020, EX 8-47, 1988.
- 20) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) : 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.
- 21) Occupational Safety & Health Administration (OSHA): Synthetic Mineral Fibers. In the *OSHA Priority Planning Process*. <http://www.osha.gov/oshinfo/priorities/index.html>.
- 22) Ottery J, Cherri JW, Dodgson J, and Harrison GE: 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.
- 23) Rood AP: Size distribution of airborne ceramic fibers as determined by transmission electron microscopy. *Ann. occup. Hyg.*, **32**, 237-240, 1988.
- 24) Smith DM, Ortiz LW, Archuleta RF, Johnson NF: Long-term health effects in hamsters and rats exposed chronically to man-made vitreous fibres. *Ann. occup. Hyg.*, **31**, 731-754, 1987.
- 25) Stanton MF, Layard M, Tegeris A: Carcinogenicity of fibrous glass: Pleural response in the rat in relation to fiber dimension. *J. Natl Cancer Inst.*, **58**, 587-603, 1977.
- 26) Thermal Insulation Manufacturing Association (TIMA): *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, 1990.
- 27) Timbrell V: Aerodynamic considerations and other aspects of glass fiber. In *Occupational Exposure to Fibrous Glass - A Symposium* (NIOSH Pub. No. 76-151). Department of Health, Education, and Welfare, Washington D.C., 1976.
- 28) Wagner JC, Berry GB, Hill RJ: Animal experiment with MMM(V)F - Effect of inhalation and intra pleural 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.