한국산업보건학회지, 제25권 제2호(2015) ISSN 2384-132X(Print) ISSN 2289-0564(Online)
Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2015: 25(2): 184-193
http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.2.184

Original Article

해체・제거 작업 시 석면함유 건축자재에서 발생되는 섬유 및 입자상 물질의 특성

최성원・장광명・박경훈・김대종[1]・김현욱*

가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실, [1]경동대학교

Characteristics of Generated Fibrous/Particulate Matters from Asbestos-Containing Building Materials(ACBMs)

Sungwon Choi · Kwang Myoung Jang · Kyung Hoon Park · Dae Jong Kim[1] · Hyunwook Kim*

Dept. of Prev. Med, College of Medicine, The Catholic University of Korea
[1]Kyungdong University

ABSTRACT

Objectives: This study focused on three aspects: characterizing concentrations of airborne particles by size distributions and asbestos fibers generated by various building materials; analyzing the characteristics of fibers produced by each simulation and asbestos fibers released from ACBMs; and investigating correlations of airborne asbestos fibers and particles generated and association of particle and asbestos concentrations.

Methods: We selected three ACBMs including an insulation board, cement asbestos slate and wallboard. We constructed 4 scenarios; a) crushing with a hammer; b) cutting with a industrial knife; c) brushing with a metal brush; and d) tightening & loosening with a hand drill. We implemented one simulation for 30 seconds followed by 30 seconds resting period. We repeated a total of 5 cycles for 5 minutes.

Results: The highest concentration of particulate & fibrous matters was from crushing with a hammer in each scenario followed by brushing with a metal brush, cutting with a industrial knife, and tightening & loosening with a hand drill. For ACBMs studied, asbestos concentrations were highest from an insulation board followed by cement asbestos slate, and wallboard. No difference in terms of concentration was found between an insulation board and asbestos slate. Fibers with 5~20 μm in length were included in 76~90% of total fibrous matters. The distribution of the straight form fibers was greater than that of the curl form. About 90% of PM_{Total} released from ACBMs was consisted of PM_{10} while only 10% of PM_{Total} was $PM_{2.5}$. Particulate matters like $PM_{2.5}$ was significantly correlated with fibrous matters(R^2=0.81).

Conclusions: We found ACBMs can significantly release asbestos fibers as well as $PM_{2.5}$. Concentrations of asbestos generated by ACBMs were well correlated with $PM_{2.5}$.

Key words: ACBM(asbestos containing building material), asbestos, fiber, $PM_{2.5}$

I. 서 론

인체 발암성 물질로 분류된 석면은 호흡기를 통해 체내로 들어오면 석면폐증, 폐암 및 중피종 등의 질병을 유발한다(IARC, 2012). 우리나라에서 석면은 수입 및 사용 등이 금지되기 이전까지 일반 건축물에 광범위하게 사용되었고, 최근에는 노후된 건물의 재건축으로 인해 석면섬유가 방출되어 근로자와 주

*Corresponding author: Hyunwook Kim, Tel: 02-2258-7363, E-mail: hwkim@catholic.ac.kr
Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea, 505, Banpo 4-dong, Seocho-gu, Seoul, Korea 505
Received: November 4, 2014, Revised: June 19, 2015, Accepted: June 20, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

민들의 건강에 잠재적 위험을 끼치고 있으며, 상당한 수의 석면시멘트 폐자재를 발생시키고 있다(Harding et al., 2009). 특히 전국적으로 많은 양의 석면함유 지붕재가 산업화 시대에 지어진 것을 감안하면 자재 노후 및 침식, 자연붕괴, 풍화작용에 의해서 비산되어 발생하는 석면에 의한 피해가 우려된다(NIER, 2008).

건축물 해체・제거 작업 시 석면함유 자재에서 발생되는 석면비산의 원인을 조사하기 위한 사례가 있었다. 외국의 경우 1990년대 이후부터 최근 10년 사이에 주거지역 및 도시지역의 건축물에 사용된 석면시멘트 및 지붕재에 대한 노출에 관한 연구가 있었으며, 석면을 이용하여 작업을 하는 산업현장에서 석면시트를 포함한 근로자의 노출과 다양한 원인으로부터 석면섬유가 방출되는 특성에 대한 연구가 있었고(Spurny, 1989; Ansari et al., 2007; Campopiano et al., 2009; Kakooei et al., 2009; Krakowiak et al., 2009; Pastuszka, 2009), 다양한 기계적 작업 중에 발생되는 석면섬유 방출에 관한 연구도 진행되었다(Preat, 1993; Pastuszka, 2009).

우리나라의 경우에는 2000년도 이후에 비산석면 농도 방출에 대한 연구가 있었으며(Choi et al., 2002; Kim et al., 2009; Kim et al., 2010), 최근에는 토양 중 비산석면 특성에 관한 연구가 진행되었다(Kwon et al., 2014). 그러나 토양을 교란하여 비산되는 석면 특성에 관한 연구만 발표했을 뿐, 해체・제거 작업 시 방출되는 석면의 특성 및 미세먼지 단위의 입자 크기에 관한 연구는 부족한 실정이다. Laden et al.(2006)과 Tadas et al.(2011)의 연구에서는 전체, 심혈관, 폐암에 의한 사망이 주변 $PM_{2.5}$ 농도와 연관이 있으며, $PM_{2.5}$ 농도가 낮아질수록 사망위험이 감소하였고, 결정화된 시멘트 미세 입자에 장기간 노출되는 것은 폐질환의 원인이 될 수 있다고 하였다. IARC에서도 $PM_{2.5}$가 사람이 폐결핵으로 사망할 수 있는 주된 원인이라고 하였고, 인체 발암성이 확인된 물질로 분류하고 있다. 우리나라에서는 환경부에서 2015년부터 연간 $PM_{2.5}$ 기준을 25 μm/m^{3}로 설정하고 있다.

이에 본 연구에서는 첫째, 용도가 다른 건축자재의 종류별 석면섬유 발생 특성과 부유하는 입자의 크기별 분포 농도를 조사하고, 둘째, 행위에 따라 건축자재에서 발생되는 섬유의 길이와 형태의 특성을 조사하며, 셋째, 발생하는 입자의 크기별 농도와 공기 중 석면농도의 상관관계를 조사하여 분진 발생 특성을 알아보고자 하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 재료

종류가 다른 건축자재에서 발생되는 석면섬유 방출 실험을 실시하기 위해 현재 우리나라에서 사용하고 있는 30여년이 지난 건축자재 중 천장재(Insulation board), 벽재(Wallboard), 지붕재(Cement asbestos slate) 총 3종을 선정하였으며, 각 자재별로 0.09 m^{2}로 재단하여 종류별로 12장씩 총 36장을 실험 대상으로 하였다.

2. 장치

1) Glove box

실험을 실시하기 위해 0.05 m의 스테인리스강 재질의 판에 4개의 스테인리스 봉을 부착하여 0.6 m × 0.5 m × 0.4 m(120 L)인 크기인 철골구조로 glove box의 기본 틀을 제작하였다. 추가적으로 하부에 고무재질을 부착하여 실험 시 발생할 수 있는 소음과 파손의 위험이 감소될 수 있도록 하였다. glove bag을 이용해 기본 틀 외부를 감싸 glove box를 만들었다. 상부에는 깨끗한 공기가 공급될 수 있도록 HEPA필터를 설치하고, 실험 시 발생하는 섬유를 비산시키기 위해 팬을 설치하여 0.08 ~ 0.1 m/sec로 유속을 유지하였다(Figure 1).

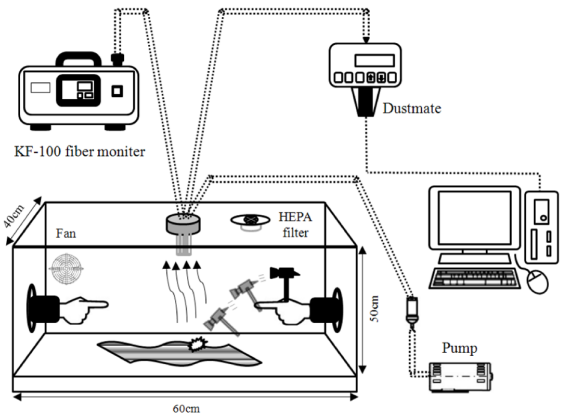


Figure 1. Experimental system for simulating emissions of PMs and fibres from asbestos containing building materials

Table 1. Scenarios constructed for the study

Scenarios	Tool	Method
Crushing with a hammer	Hammer	1.one simulation(a total of 4 simulations) - conducted by 30 seconds and followed by 30 seconds break 2. 1 cycle(a total of 5 cycles for 5 minutes) - processing for 30 seconds, followed by 30 seconds break
Scrubbing with a metal brush	Metal brush	
Cutting with a industrial knife	Industrial knife	
Tightening & Loosening with a hand drill	Hand drill	

2) Personal sampling

시료의 포집은 0.8 μm Pore Size, 직경 25 mm Mixed Cellulose Ester(MCE) filter가 장착된 카세트를 glove box 상부에 설치하고 펌프(GilAir-3, Gilian, USA)를 이용하여 3 L/min으로 5분간 측정하였다.

3) Fiber monitor

일본에서 개발된 실시간 섬유측정 장비인 fiber monitor(KF-100, Sibata, Japan)는 공기 중에 부유하는 입자로부터 섬유를 선별하여, 섬유농도를 상대적으로 산출할 수 있는 기기이다. 장치의 유량은 2 L/min으로 5분간 측정하였다. 또한 장치에 0.8 μm pore size, 직경 25 mm MCE filter가 장착된 카세트를 설치하여 섬유를 포집하였으며 위상차현미경(Phase Contrast Microscope, PCM)으로 분석을 실시한 후 (1)식에 대입하여 환산계수를 구해 기기를 보정하였다.

$$f = \frac{C}{R} \quad (1)$$

f: 섬유농도 변환계수(환산계수)
C: 공정법에 의한 섬유농도(NIOSH 7400 "A")
R: KF-100에 의한 섬유농도

4) Particle monitor

영국에서 개발한 Dustmate(Turnkey instruments, UK)는 작업장 내 공기 중 먼지와 흄(Fume)을 탐지할 수 있도록 설계된 휴대용 기기로써 PM_{Total}, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1의 농도를 확인할 수 있다. 본 장치의 유량은 0.6 L/min으로 5분간 측정하였다.

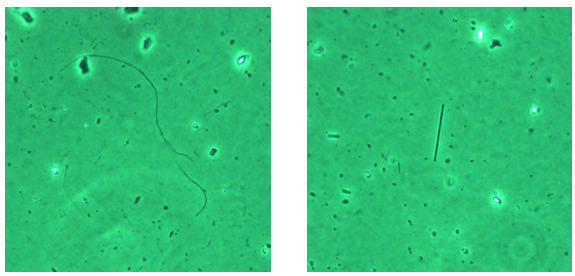
3. 방법

1) 자재별 방출 실험

시나리오 중 파쇄(Crushing), 솔질(Brushing), 절단(Cutting), 조임/풀림(Tightening/Loosening)의 4가지를 선정하여 각 시나리오 및 자재별로 3회 반복으로 실험을 실시하였다. a) 작업자의 힘이나 도구를 사용하여 건축물을 파쇄하는 행위, b) 건축물의 표면에 접촉하거나, 또는 건축자재가 서로 부딪치는 행위, c) 건축물의 표면을 공업용 칼을 이용하여 긁어내는 행위, d) 드릴을 사용한 나사 조임/풀림 행위를 바탕으로 가상의 시나리오를 선정하였다. 선정 시나리오는 다음과 같다. a) 망치를 이용한 파쇄, b) 공업용 칼을 이용한 절단, c) 철솔을 이용한 솔질, d) 드릴을 사용하여 풀림/조임을 30초 간 작업을 실시하고 30초 동안은 대기하는 것을 1번의 Cycle로 하여 5분간 총 5 Cycle을 반복하였다(Table 1). 모든 실험은 실험자 간의 오차를 줄이기 위하여 동일한 실험자에 의해서 시행되었다.

2) 분석

PCM을 이용한 석면분석방법은 NIOSH 7400 "A"방법에 준하여 계수하였으며, Walton-Beckett Graticule을 이용하여 5 μm이상의 섬유의 길이를 평가하였다. 또한 곧은 직선(Straight)형태와 구부러지고 휘어지는 곡선(Curl)형태를 나타낸 섬유를 관찰하였다(Figure 2). 또한 편광현미경(Polarized Light Microscopy, PLM)을 이용하여 NIOSH 9002 Method(NIOSH, 1994)에 준하



Curl Shape　　Straight Shape

Figure 2. Fibers showing curl & straight shapes identified by PCM

여 석면함유여부 및 종류를 판정하였고, 함유량을 추정하였다.

3) 통계방법

자료 분석은 SPSS system version 18을 이용하였다. 섬유길이와 농도, 입자상 물질 농도는 정규화하지 않고 대수정규분포를 따라 기하평균, 기하표준편차로 나타내었고, 섬유농도와 입자상 물질의 농도의 상관관계를 파악하기 위해 단순회귀분석을 실시하였다. 모든 통계처리는 유의수준 α=0.05에서 실시하였다.

Ⅲ. 결 과

1. 건축자재의 일반적인 특성

석면이 함유된 건축물에서 지붕재, 천장재, 벽재 총 3종류의 시료를 PLM으로 분석한 결과 모두 백석면을 함유하고 있었으며 섬유함유량은 10~15%였다(Table 2).

2. 건축자재에서 행위별로 발생하는 공기 중 노출 농도

1) 입자상 물질 노출 농도

실험실 내에서 glove box를 이용하여 실험을 실시한 결과, 가장 많은 입자상 물질이 비산되는 행위는 파쇄, 솔질 작업이었으며, 비산이 적은 행위는 절단, 조임/풀림작업이었다. 또한 지붕재, 천장재, 벽재 모든 건축자재에서도 파쇄작업이 높은 농도를 보였다.

가장 많은 입자상 물질이 비산이 되는 건축자재는 지붕재, 천장재, 벽재 순서였으며, 모든 시나리오에서도 지붕재와 천장재가 가장 많은 에어로졸을 방출했다. 또한 파쇄와 솔질 작업이 절단과 조임/풀림작업에 비해 약 2~3배 높았고, 벽재가 상대적으로 가장 적은 양의 입자를 방출하였다(Table 3).

Table 2. General characteristics of ACBM

Sheet type	Asbestos type(Content)
Insulation board	chrysotile(15%)
Cement slate board	chrysotile(10%)
Wallboard	chrysotile(10%)

2) 공기 중 섬유노출농도

실험에 사용된 건축자재인 천장재, 지붕재, 벽재를 대상으로 실험하였을 때, 3종류의 건축자재 전부, 파쇄작업이 가장 많은 섬유상 물질을 방출하였으며, 솔질작업과 비교하였을 때 천장재와 지붕재는 1.99배, 벽재는 1.58배 높았다. 절단작업에 비해서는 천장재는 3.28배, 지붕재는 5.5배, 벽재는 2.76배 높게 나타났다. 조임/풀림작업에 비해서는 천장재는 5.48배, 지붕재는 9.43배, 벽재는 3.05배로 관찰되었다. 자재별로는 천장재, 지붕재, 벽재 순으로 농도가 높게 나타났다. 천장재와 지붕재에서 발생하는 섬유상 물질의 농도는 서로 크게 차이가 없었으나, 벽재와 나머지 두 건축자재의 농도와는 약 2~3배 정도의 차이를 보였다.

3. 길이별 섬유의 특성

Figure 3은 시나리오 별 건축자재에서 비산된 섬유 길이의 분포도를 나타낸 것으로써 섬유의 길이는 주

Table 3. Particle size distributions of generated aerosols (㎎/m^3)

	Sheet type (N=3)	PM_{Total}		PM_{10}		$PM_{2.5}$		PM_1	
		GM	GSD	GM	GSD	GM	GSD	GM	GSD
Crushing	Insulation board	6.20	6.20	0.62	0.60	1.03	1.04	1.03	1.03
	Cement asbestos slate	6.16	6.13	0.60	0.56	1.01	1.01	1.01	1.05
	Wallboard	3.90	3.29	0.28	0.06	1.21	1.27	1.28	1.45
Brushing	Insulation board	6.08	6.04	0.31	0.04	1.02	1.02	1.17	1.19
	Cement asbestos slate	6.27	6.25	0.55	0.29	1.02	1.02	1.10	2.39
	Wallboard	1.98	1.03	0.11	0.02	1.09	1.18	1.32	1.60
Cutting	Insulation board	4.08	3.37	0.13	0.02	1.19	1.29	1.09	1.07
	Cement asbestos slate	2.14	1.04	0.23	0.03	1.15	1.34	1.26	1.13
	Wallboard	0.71	0.35	0.05	0.01	1.13	1.12	1.14	1.36
Tightening/ Loosening	Insulation board	1.15	0.64	0.11	0.03	1.37	1.33	2.14	2.82
	Cement asbestos slate	2.01	1.16	0.14	0.04	1.24	1.39	1.16	1.06
	Wallboard	0.89	0.44	0.05	0.01	1.23	1.27	1.85	2.59

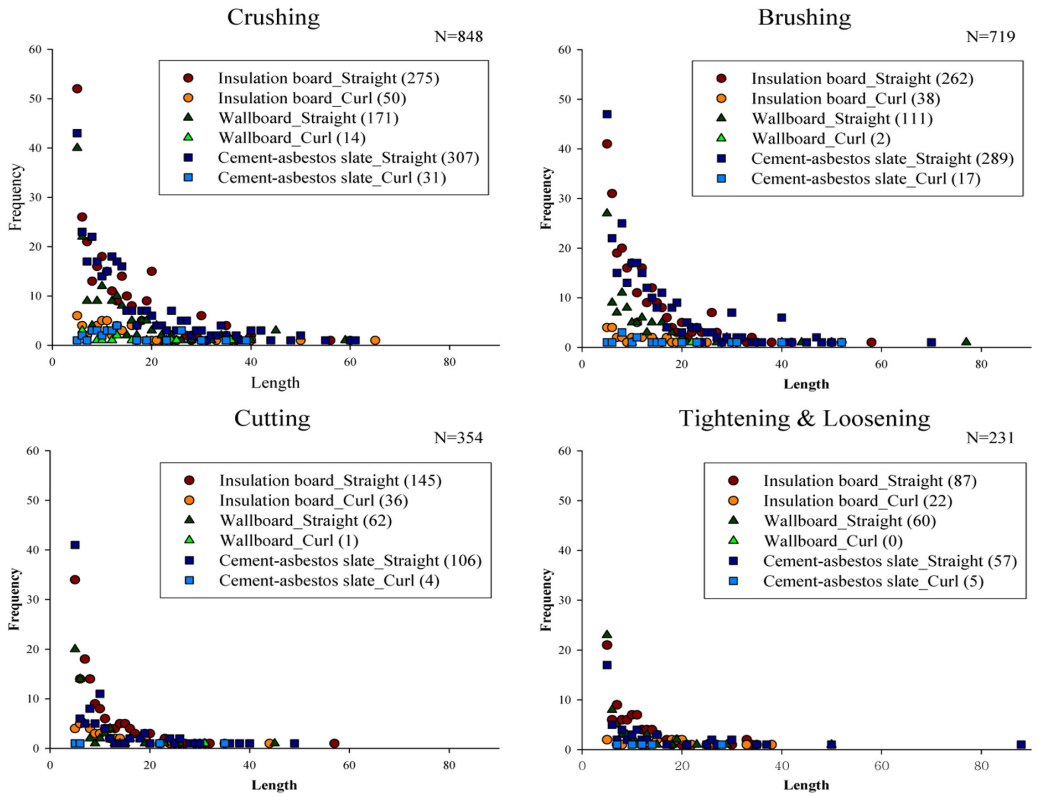


Figure 3. The fiber lengths by simulations

로 5 μm이상, 20 μm이하 길이에 76-90%의 분포를 보였으며 모든 시나리오 별 건축자재에서 평균 길이는 10 μm이상이었다. 특히 절단작업 시 지붕재는 71%, 천장재는 64%, 벽재는 70%로 다른 시나리오와 비교하였을 때 가장 높은 비율을 차지하였다(Table 4).

시나리오에 따른 직선형태의 분포도는 파쇄가 89%, 솔질은 93%, 절단은 92%, 조임&풀림은 91%로 나타났으며 곡선형태는 파쇄가 11%, 솔질은 7%, 절

Table 4. Distributions of fiber Length by ACBMs (μm(%))

	N	Sheet type	5-10	11-20	21-30	>30	Total
Crushing	848	Insulation board	55.67±9.3(51)	40.00±7.2(37)	6.33±3.8(6)	6.33±1.5(6)	108.33±3.1(100)
		Cement asbestos slate	49.33±4.0(44)	38.67±4.2(34)	14.67±3.1(13)	10.00±1.7(9)	112.67±4.0(100)
		Wallboard	34.00±7.8(55)	19.00±3.0(31)	4.67±1.2(8)	4.00±2.0(6)	61.67±6.0(100)
Brushing	719	Insulation board	53.00±5.6(53)	32.33±7.4(32)	11.00±1.0(11)	3.67±2.9(4)	100.00±11.1(100)
		Cement asbestos slate	48.33±9.6(47)	34.33±7.6(34)	11.33±4.7(11)	8.00±5.0(6)	102.00±6.2(100)
		Wallboard	22.67±1.5(60)	11.33±1.2(30)	2.33±1.2(6)	1.33±1.5(4)	37.67±2.3(100)
Cutting	354	Insulation board	38.67±5.5(64)	16.33±2.3(27)	3.67±3.2(6)	1.67±1.5(3)	60.33±3.1(100)
		Cement asbestos slate	26.00±4.6(71)	5.67±0.6(15)	3.33±2.3(9)	1.67±1.2(5)	36.67±5.5(100)
		Wallboard	14.67±5.0(70)	4.67±0.6(22)	0.67±1.2(3)	1.00±1.0(5)	21.00±4.4(100)
Tightening& Loosening	231	Insulation board	20.33±3.5(56)	12.00±2.6(33)	2.00±2.6(6)	2.00±1.0(6)	36.33±4.7(100)
		Cement asbestos slate	11.67±2.1(56)	5.00±0.0(24)	2.67±1.2(13)	1.33±0.6(6)	20.67±1.5(100)
		Wallboard	14.67±6.4(73)	3.67±1.2(18)	1.33±1.5(7)	0.33±0.6(2)	20.00±5.0(100)

Table 5. Comparison of airborne fiber concentrations for ACBMs by simulations (f/cc)

	Sheet type	No. samples	Temp (℃)	Humidity (%)	Airborne samples (PCM)		Fiber Monitor (F-1, SIBATA)		Average conversion factor
					GM	GSD	GM	GSD	
Crushing	Insulation board	3	24.8	40.7	5.70	1.17	7.50	1.09	F = 8.10
	Cement asbestos slate	3	27.4	52.3	5.66	1.19	6.77	1.05	
	Wallboard	3	27.5	41.3	1.71	1.11	0.52	1.42	
Brushing	Insulation board	3	24.8	42.3	2.87	1.10	2.56	1.26	
	Cement asbestos slate	3	27.7	50.3	2.84	1.05	0.81	1.17	
	Wallboard	3	27.0	36.7	1.08	1.05	0.29	1.66	
Cutting	Insulation board	3	26.1	38.7	1.74	1.09	0.75	1.08	
	Cement asbestos slate	3	27.0	53.0	1.03	1.09	0.38	1.42	
	Wallboard	3	27.0	35.0	0.62	1.21	ND	ND	
Tightening & Loosening	Insulation board	3	25.5	39.7	1.04	1.15	0.31	2.28	
	Cement asbestos slate	3	27.8	55.0	0.60	1.03	0.20	1.11	
	Wallboard	3	27.2	36.7	0.56	1.33	0.13	2.00	

단은 8%, 조임&풀림은 9%였다. 건축자재에 따른 직선형태의 분포도는 천장재가 83%, 지붕재는 97%, 벽재는 94%로 나타났으며 곡선형태의 분포도는 천장재가 17%, 지붕재는 3%, 벽재는 6%였다(Figure 3).

4. 실시간 측정 장비와 PCM 농도비교

본 실험을 실시하기에 앞서 blank 시료를 분석한 값과 KF-100 기기로 측정한 농도 수치 값을 통하여 8.1이라는 보정계수를 구하였다(Table 5). 보정된 KF-100 기기와 PCM으로 측정한 농도는 유의한 상관성을 나타내었다(R^2=0.9043). 하지만 PCM 대비 43.2%의 정확도를 보였다(Figure 4).

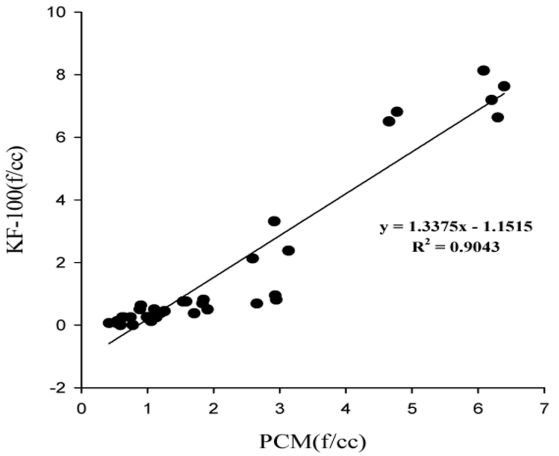


Figure 4. Plot of fiber concentrations measured by PCM & KF-100(f/cc)

5. 섬유와 PM 별 농도의 비교

건축자재에 따라 발생하는 섬유상 및 입자상 물질의 농도를 비교하여 Figure 5에 나타내었다. $PM_{2.5}$과 섬유상 물질의 상관성이 R^2=0.8086으로 가장 높았으며 그 다음 PM_1, PM_{10}, 마지막으로 PM_{Total}가 R^2=0.6852으로 가장 낮게 나타났다.

Ⅳ. 고 찰

석면함유 건축자재의 방출 특성을 파악하기 위하여 여러 연구가 수행되었다. 대학병원을 대상으로 한 Choi et al.(2002)의 연구에서는 해체 건물의 지붕재, 단열재, 방수시트, 석고보트, 벽재, 콘크리트 등 8가지 고형시료에서 모두 백석면이 확인 되었으며, 대구지역에서 석면해체제거 작업장을 대상으로 한 Kim et al.(2009)의 연구에서도 해체 건물의 천장, 벽, 바닥, 배관 등에서 백석면이 모두 검출되었다. 또한, 다중이용시설에 사용된 천장재 및 벽면재(ME, 2008), 학교 건축물에 사용된 천장재, 지붕재, 벽재에서 모두 백석면이 검출되었고(MoE, 2007), 전국의 사업장을 대상으로 사용된 건축자재인 천장재, 바닥재, 벽재, 보온단열재, 지붕재 등에서 백석면이 발견됨

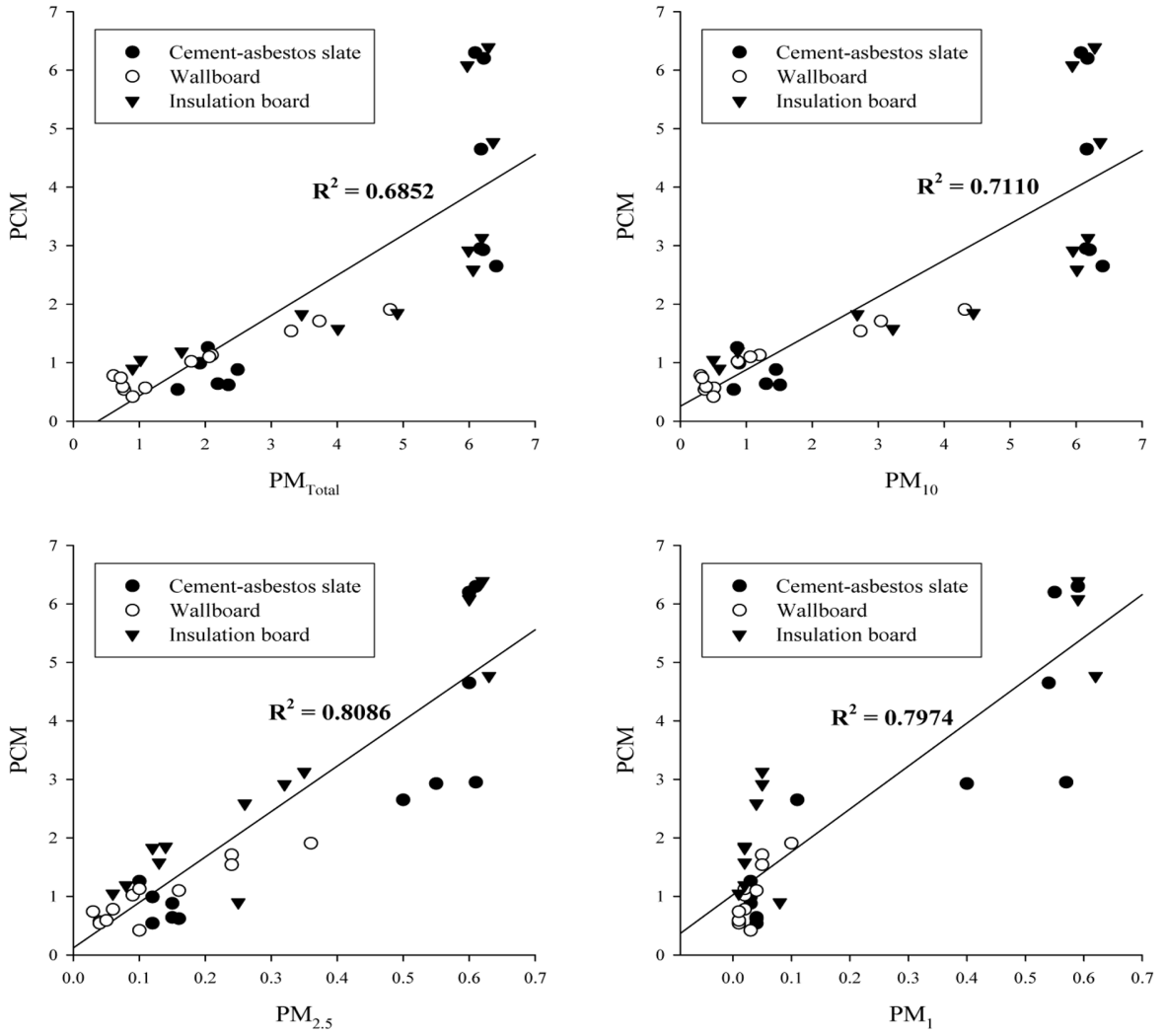


Figure 5. Relationship between concentrations of particulate matters and asbestos fibers

(MoEL, 2008)에 따라 우리나라에서 주로 건축자재에 사용된 석면은 백석면임을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 우리나라에서 일반적으로 가장 많이 사용되는 지붕재, 천장재, 벽재를 선정하여 실험을 실시하였으며, 지붕재 10%, 천장재 15%, 벽재 10%로 백석면이 검출되었다.

입자상 물질의 농도에서는 모든 건축자재 및 시나리오에서 망치로 인한 파쇄작업이 가장 높은 농도를 나타내었으며, 건축자재로는 천장재가 가장 높은 농도를 나타내었다. Tadas et al.(2011)의 연구에서도 지붕재를 이용하여 PM 별 농도를 확인한 결과 시나리오 중 파쇄실험이 가장 높은 농도로 검출되었다. 또한 벽재가 가장 비산이 적은 이유는 무기질 섬유와 시멘트를 배합하여 10,000톤 프레스로 가압하여 만든 자재이기 때문에 다른 자재보다는 구조상으로 적게 비산된 것으로 사료된다. 전체 $PM_{2.5}$의 비율은 전체 에어로졸의 약 10%로서 PM_{Total}에 비해 작은 부분을 구성하고 있다. 하지만 미세 에어로졸이 인체 내에 흡입되면 호흡기의 가장 깊은 경로에 관련된 건강영향이 발생될 수 있다(Laden et al., 2006).

Yu(1993)의 연구에서 glove box 내에서 건축자재별로 5분간 숫돌차로 연삭하여 발생되는 섬유상 농

도를 분석한 결과 천장재(1.71 f/cc), 벽・칸막이(0.21 f/cc), 지붕(0.18 f/cc), 바닥용(0.09 f/cc) 순서의 농도를 보였으며, glove box를 이용한 비슷한 실험에서도 4가지 시나리오별로 5분간 석면 함유 지붕재를 실험한 결과, 파쇄(0.036 f/cc), 비비기(0.010 f/cc), 긁어내기(0.011 f/cc), 문지르기(0.012 f/cc)로 분석되었다(Tadas et al., 2011). 본 연구에서도 천장재에서 가장 높은 농도와 벽재에서 낮은 농도를 나타내었으며, 망치로 파쇄시키는 행위가 시나리오 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 하지만 Yu(1993)의 연구와 본 연구의 실험에서 섬유농도의 차이가 나는 이유는 시나리오 방법이 다르며 실험실 내부의 glove box 체적, 기류, 포집율 등의 차이를 보이기 때문으로 사료된다.

본 연구는 5 μm 이상의 길이를 가진 섬유상 물질이 인체에 유해하다는 것을 감안하여(Timbrell et al., 1988; Berman et al., 1995; Loomis et al., 2012), 5 μm 이상의 길이를 가진 섬유의 형태를 평가하였다. 분석결과 절단작업과 조임/풀림작업 시 5 μm이상, 10 μm 이하에서 다른 시나리오에 비해 가장 높은 분포를 보이고 있는데, 석면 건축물 해체・제거 작업 시 비산되는 섬유의 길이는 주로 5 μm이상, 20 μm이하 길이에 76-90%의 분포를 보이고 있다, 이는 건축자재에 함유되어 있는 섬유상 물질이 절단작업 및 조임/풀림작업에 의해서 길이가 짧은 섬유상 물질형태로 발생하는 것으로 사료된다. 또한 비산하는 모든 건축자재 및 시나리오에서 곡선 형태의 섬유상 물질이 91%로 관찰되었으며, 직선 형태를 가진 물질은 9%로, 건축자재에서 비산되는 형태는 곡선형태의 섬유물질이 많이 분포하고 있었다. 이는 실험에 사용한 3가지 제품 모두 백석면을 함유하고 있는 제품이기 때문에 곡선형태의 섬유상물질을 많이 방출하는 것으로 사료된다. 섬유의 길이는 5~10 μm사이의 길이로서 약 44~71%로 가장 높은 분포를 나타내었고, 절단 행위는 약 68%로 다른 행위보다는 더 많은 분포를 보이고 있었다. 또한 자재별에 따른 길이 분포는 유의한 차이가 없었다.

서울시내 석면함유 건축물 철거 현장을 대상으로 하여 personal sampler와 KF-100 기기로 측정한 농도분포를 비교 분석한 Lee(2014)의 연구에서는 PCM 방법과 KF-100은 높은 상관성을 나타내었다(R^2=0.9071). 본 연구에서도 이와 비슷하게 높은 설명력(R^2=0.9043)을 나타내었다.

PCM 방법과 KF-100은 높은 상관성을 가지고 있지만 석면관리는 0.01 f/cc 이하로 10^{-2} 단위의 기준농도로 관리하고 있기 때문에 상관성과 설명력만으로 정확도를 평가 할 수는 없다고 사료된다. 그러므로 정확도를 평가하기 위해서 본 실험은 특정한 챔버 내부에서 평가를 실시하였고, 현장평가와 비교하였을 때 온도 및 습도, 기류 등 조절 가능한 공간에서 평가를 실시하였으며, KF-100이 실시간 모니터링 장비임을 감안하여 샘플링 시간을 5분으로 평가하였다. 그 결과 KF-100은 PCM 대비 평균 43.2%의 정확도를 보였다. 보다 정확한 평가를 위해서는 많은 sample size와 온도, 습도, 기류 평가도 중요하지만 시간별에 따른 정확도 평가와 현장별 보정계수의 관리가 필요하다고 판단된다.

입자상 및 섬유상 물질의 농도를 비교한 연구에서 Corn & Sansone(1974)은 모든 plant에서 유리섬유 제작공정 중에 총 분진 농도와 섬유농도가 낮은 상관성을 나타내었으며, Hammad et al.(1979)는 지붕재 건축자재 제조 공정에서 총 분진의 농도에 대해서 섬유의 길이가 길수록 상관계수(r)가 높아지는 경향이 있지만 <5 μm(r=0.37), 5-10 μm(r=0.57), >10 μm(r=0.56)로 높은 상관성을 보이진 않았다. Lee et al.(2012)는 석면이 함유된 천장재와 벽재를 대상으로 해체・제거 작업 중에 발생되는 총분진과 섬유농도와의 관계를 알아보았지만, 낮은 상관성을 나타내었다.

하지만 Tadas et al.(2011)의 연구에서는 입자상 크기별 사이클론을 통해 PM_{Total}, PM_{10}, $PM_{2.5}$로 섬유농도를 측정한 결과 $PM_{2.5}$에서 PM_{Total}, PM_{10}보다 높은 농도를 나타냈다. 본 연구에서는 36개의 시료에 대한 PM 별(PM_{Total}, PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1)농도와 섬유농도 간의 회귀분석을 실시한 결과 PM_{Total}의 결정계수(R^2)가 0.68, PM_{10}은 0.71, $PM_{2.5}$은 0.81, PM_1은 0.80으로 $PM_{2.5}$가 섬유농도와 유의한 상관성을 나타내고 있다(P<0.01). 앞선 연구들에서는 총분진으로만 확인된 연구였으며, 본 연구에서는 총분진뿐만 아니라 PM_{10}, $PM_{2.5}$, PM_1의 상관성을 파악하였고 크기가 $PM_{2.5}$일때 섬유농도와의 유의한 상관성을 보였다(R^2=0.8086).

본 연구의 제한점은 실험실 평가로 현장평가와 달리 특정한 공간 내에서 가상의 시나리오를 설정하여

실험조건과 방법에 따른 섬유상 및 입자상 물질의 특성을 평가하였기 때문에, 실제 현장평가의 온도, 습도, 풍속 등의 외부영향이 제외된 점, PCM으로 길이를 평가하는 반정량적인 평가방법을 이용하여 결과를 도출한 점이다. 또한 glove box의 좁은 공간 내에서 실험을 실시하였기 때문에 해체·제거작업 현장보다는 상대적으로 고농도로 평가되는 경향이 있었다. 따라서 후속연구로 현장에서 섬유상 및 입자상 물질의 특성을 평가하고, 전자현미경을 사용하여 분석을 실시한다면 보다 명료한 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

Ⅴ. 결 론

본 연구를 통해 각기 용도가 다른 3가지 종류의 건축자재를 대상으로 4가지의 시나리오를 실시하여 발생되는 입자상 및 섬유상 물질의 특성을 알아보고자 하였다.

1. 시나리오 별로 입자상 및 섬유상 물질의 농도를 비교한 결과, 파쇄작업 시 가장 높았고 솔질, 절단, 조임/풀림 순으로 나타났으며, 건축자재는 천장재, 지붕재, 마지막으로 벽재 순으로 나타났다. 하지만 천장재와 지붕재는 농도 차이가 크지 않았다.

2. 5 ㎛~20 ㎛ 길이를 가진 섬유가 전체 섬유상 물질길이의 76~90%를 차지하였으며, 또한 곡선형태의 섬유보다 직선 형태의 섬유가 더 많이 발견되었다.

3. PCM으로 측정한 농도와 보정계수에 적용된 KF-100 기기의 농도와 비교하였을 때 높은 설명력(R^2=0.9043)을 보였으며 정확도는 43.2%로 나타났다.

4. 건축자재에서 비산되는 입자의 대부분은 PM_{10}으로 PM_{Total}의 90%정도를 차지하고 있었으며, $PM_{2.5}$의 경우 PM_{Total}의 10% 정도를 구성하고 있지만 인체에 건강영향을 미칠 수 있는 양이 검출 되었다.

5. $PM_{2.5}$ 입자상 물질은 섬유상 물질의 농도와 통계적으로 유의한 상관성(R^2=0.81)을 나타내었다. 그러므로 $PM_{2.5}$ 단위의 입자상 물질 농도를 통하여 섬유상 물질의 농도를 추정할 수 있다고 사료된다.

이상의 결과를 볼 때 석면 함유 건축물 자재에서 해체·제거 작업 시 발생되는 미세먼지 농도와 석면 섬유농도와 유의한 상관성이 있으므로 이를 이용하여 석면농도를 간접적으로 추정할 수도 있을 것으로 보인다. 본 연구는 실험실에서 모의작업을 설정하여 평가한 결과이기 때문에 현장평가와 병행한다면 더 정확한 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 말씀

본 연구는 2014년도 환경부의 생활공감 환경보건 기술개발사업에서 지원받아 수행되었습니다.

References

Ansari FA, Ahmad I, Ashquin M, Yunus M, Rahman Q. Monitoring and identification of airborne asbestos in unorganized sectors, India. Chemosphere 2007;68(4): 716-723

Berman DW, Crump KS, Chatfield EJ, Davis JMG, Jones AD. The sizes, shapes, and mineralogy of asbestos structures that induce lung tumors or mesothelioma in AF/HAN rats following inhalation. Risk Anal 1995;15(2):181-195

Campopiano A, Ramires D, Zakrzewska AM, Ferri R, D'Annibale A et al. Risk assessment of the decay of asbestos cement roofs. Ann Occup Hyg 2009;53(6): 627-638

Choi CG, Kim CN, Lim NG, Roh YM, Roh JH. Exposure level of releasing asbestos during building destruction work. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2002;12(3): 195-201

Corn M, Sansone EB. Determination of total suspended particulate matter and airborne fiber concentrations at three fibrous glass manufacturing facilities. Environ Res 1974;8(1):37-52

Harding AH, Darnton A, Wegerdt J, McElvenny D. Mortality among british asbestos workers undergoing regular medical examinations(1971~2005). Occup Environ Med 2009;66(1):487-495

Hammad YY, Diem J, Weill H. Evaluation of dust exposure in asbestos cement manufacturing operations, Am Ind Hyg Assoc 1979;40(6):490-495

International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 100c. Arsenic, Metals, Fibres and Dusts.; 2012. p 35-38

Kakooei H, Yunesian M, Marioryad H, Azam K. Assessment of airborne asbestos fiber concentrations in urban area of Tehran, Iran. Air Qual Atmos Health 2009;2(1):39-45

Kim JY, Lee SK, Lee JH, Lim MH, Kang SW et al. A study on the factors affecting asbestos exposure level from asbestos abatement in building demolition sites. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2009;19(1):8-15

Kim YH, Song TH, Lee SH. A study on the entraining properties of plate type asbestos building materials. J Architect Inst Kor 2010;26(12):141-148

Krakowiak E, Gorny RL, Cembrzynska J, Sakol G, Boissier-Draghi M et al. Environmental exposure to airborne asbestos fibres in a highly urbanized city. Ann Agric Environ Med 2009;16(1):121-128

Kwon JW, Choi SW, Kim HW. Size Distributions of Amphiboles in Soils from a Closed Asbestos Mine, Jecheon, Chungcheongbuk-do, Korea. Econ Environ Geol 2014;47(5): 497-505

Laden F, Schwartz J, Speizer FE, Dockery DW. Reduction in fine particulate air pollution and mortality-extended follow-up of the Harvard six cities study, Am J Respir Crit Care Med 2006;173(6):667-672

Lee JG, Lee KH, Choi HI, Moon HI, Byeon SH. Total dust and asbestos concentrations during asbestos-containing materials abatement in Korea. Int J Environ Res 2012;6(4):849-852

Lee JH, Lee SH, Kim JY, Kim JH, Chung SN et al. A Study on the Efficient Measurement of Airborne Asbestos Concentrations at Demolition Sites of Asbestos Containing Buildings, etc. in Seoul. J Korean Soc Occup Environ Hyg 2014;24(2):113-121

Loomis D, Dement JM, Elliott L, Richardson D, Kuempel ED, Stayner L. Increased lung cancer mortality among chrysotile asbestos textile workers is more strongly associated with exposure to long thin fibres. Occupational and environmental medicine 2012; 69(8):564-568

Ministry of Education(MoE). A study of standard model for control of asbestos and a survey of use of asbestos in School.; 2007

Ministry of Employment and Labor(MoEL). A study of mapping of asbestos and a survey of asbestos in workplace.; 2008

Ministry of Environment(ME). Survey on asbestos containing material and indoor air for preparing management guideline in public building(Ⅰ).; 2008

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Asbestos and other fibers by PCM. NIOSH Manual of Analytical Method(NMAM), 4th ed.; 1994

National Institute of Environmental Research(NIER). A study for surveys of use asbestos-containing materials in agricultural building.; 2008

Pastuszka JS. Emission of airborne fibers from mechanically impacted asbestos-cement sheets and concentration of fibrous aerosol in the home environment in Upper Silesia, Poland. J Hazard Mater 2009;162(2):1171-1177

Preat B. Suveillance de Chantiers avec fibres-ciment. Instituut voor.; 1993

Spurny KR. On the release of asbestos fibers from weathered and corroded asbestos-cement products. Environ Res 1989;48(1):110-116

Tadas P, Dainius M, Edvinas K, Linas K, Maksim K et al. Comparative characterization of particle emissions from asbestos and non-asbestos cement roof slates. Building and Environment 2011;46(11):2295-2302

Timbrell V, Ashcroft T, Goldstein B, Heyworth F, Meurman O et al. Relationships between retained amphibole fibres and fibrosis in human lung tissue specimens. Ann Occup Hyg 1988;32(6):323-340

Yu SW. The characteristics of dispersed asbestos fibers produced from building materials. J Kapra 1993;9(3): 191-199