

자연발생석면지역의 토양 내 석면함유율에 따른 비산석면 농도평가 - 활동근거시료채취방법(ABS)과 실시간 섬유 측정 장치(F-1 fiber monitor) 결과 비교 -

장광명¹ · 박경훈¹ · 최성원² · 김현욱^{1*}

¹가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실, ²근로복지공단 직업성폐질환연구소

Comparison of Airborne Asbestos Concentrations from Soils in Naturally Occurring Asbestos(NOA) Areas - Activity Based Sampling(ABS) vs. Real-time Asbestos Fiber Monitor(F-1 fiber monitor) -

Kwangmyung Jang¹ · Kyunghoon Park¹ · Sungwon Choi² · Hyunwook Kim^{1*}

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

²Occupational Lung Disease Institute, Korea Workers' Compensation and Welfare Service

ABSTRACT

Objectives: The present study is aimed at performing real-time measurement of fibrous materials using an F-1 fiber monitor, investigating the correlations between the measurements and environmental conditions, and assessing the feasibility of the use of the monitor in actual exposure assessments based on the accuracy and reliability of the device.

Methods: Asbestos specimens with a fixed asbestos content were dispersed in a chamber and collected with a particle measuring test device. Measurements obtained by the existing PCM method, and with the F-1 fiber monitor were compared. In addition, concentrations of asbestos fibers obtained by the PCM method, the TEM method, and the F-1 fiber monitor were compared with that of specific ABS scenarios in NOA regions. Correlations of asbestos contents in soil and weather conditions with each method of measurement were analyzed.

Results: Laboratory results showed that levels of asbestos fibers measured with each method increased as fiber contents in soil increased. In the accuracy and reproducibility assessment, no significant differences were found between the different methods of measurement. On-site assessment results showed positive correlations among the methods, and these correlations were less significant compared with what was shown by the laboratory results. Levels of asbestos fibers increased as asbestos contents in soil increased, and as temperature increased. Levels of asbestos fibers decreased as humidity increased, and wind speed did not significantly affect the extent to which asbestos fibers were scattered.

Conclusions: While it would be premature to replace existing methods with the use of F-1 fiber monitors in real sites based on the results of this study, the monitor may be useful in the screening of the sites, which assesses hazard levels in different regions. Replacement of existing methods with the use of F-1 fiber monitors may be possible after the limitations identified in this study are overcome, and additional assessment data are obtained and reviewed under different conditions to confirm the reliability of the monitor in future research. Obtained assessment results may be used as basic data for the assessment of asbestos hazard in NOA regions.

Key words: Activity Based Sampling(ABS), asbestos, fiber, Naturally Occurring Asbestos(NOA), real-time measurement

I. 서 론

석면은 자연계에 존재하는 섬유상 규산염광물의 총

칭으로써 내구성, 내열성, 내화학적, 전기절연성 등이 뛰어나 건축자재, 전기제품, 가정용품 등 광범위한 분야에 사용되어 왔다(Hendrickx, 2009). 하지만 체내에

*Corresponding author: Hyunwook Kim, Tel: 82-2-2258-7363, E-mail: hwkim@catholic.ac.kr

Department of Preventive Medicine, College of Medicine, The Catholic University of Korea, 222, Banpo-daero, Seocho-gu, Seoul, 06591, Republic of Korea.

Received: September 1, 2017, Revised: September 9, 2017, Accepted: September 21, 2017

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.

유입되면 긴 잠복기를 거쳐 폐암이나 악성중피종, 석면폐증 등의 석면관련 질환을 일으킬 수 있다(Jamrozik et al., 2011). 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서는 석면을 인체 발암성 물질(Group 1, carcinogenic to humans)로 지정하였다(IARC, 2012).

국내 석면 광산의 개발은 1930년대 중반부터 전국적으로 시작되었고 1960년대 산업사회에서 대량으로 생산 및 사용되었으며 1984년 충남 홍성 광천광산을 마지막으로 모두 폐광되었다(Choi et al., 1998). 하지만 폐광산 주변 자연발생석면지역 내 토양에 포함된 석면이 비산되면 인체에 심각한 영향을 미칠 가능성이 있으며(Metintas et al., 2002; Lou et al., 2003), 미량의 석면에 노출되더라도 석면관련 질환의 발병 가능성은 높다는 연구 결과가 발표되었다(Hillerdal, 1999; Hendrickx, 2009).

자연발생석면(Naturally Occurring Asbestos, NOA)이란 인위적으로 채광된 석면을 가공하여 만든 건축자재 및 석면제품 내에 함유된 석면과는 달리 자연적으로 암석에 포함되어 있으며 풍화작용 등의 영향에 따라 외부로 비산되어 해당 지역 토양에 함유되어 있는 석면을 말한다(Lee et al., 2008; Hendrickx, 2009).

『석면안전관리법』에 따르면 NOA가 존재하거나 예상되는 지역에 대해서는 NOA 영향조사를 실시할 필요가 있다. NOA 지역의 공기 및 토양 중 석면 농도와 지역 주민의 건강영향 및 위해성 등에 대한 조사 결과는 환경부장관에게 보고되어야 하며 조사기관, 내용, 방법 및 공고 등은 대통령령으로 정하도록 『석면안전관리법』 제13조에 공시되어있다(KECO, 2010a; MoEL, 2017).

석면 광산 인근 주민을 대상으로 건강영향을 조사한 결과에 따르면 NOA 지역의 토양에 함유된 석면이 지역 내에 거주하거나 생활하고 있는 주민의 일상적인 활동에 의한 토양 교란 작용이 발생할 때 비산되거나 지하수 등을 오염시켜 석면 광산 근로자들을 비롯한 광산 주변 지역 거주민들에게 석면폐증과 흉막반을 발생시킨 것으로 확인되었으며, 해당 지역에서 거주력이 있는 사람에 대한 건강영향 평가가 추가적으로 필요하다고 발표하였다(NIER, 2008; KECO, 2010b).

이러한 선행 연구결과에 따라 NOA 지역의 비산 석면 관리를 통해 건강상 영향을 최소화하는 방법의 모색에 대한 필요성이 대두되고 있다. 현재 NOA 지역의 석면 노출 평가에는 활동근거시료채취(Activity Based

Sampling, ABS) 방법이 적용되고 있는데 이 방법은 토양 중 석면이 존재하는 지역 내에 거주하거나 생활하고 있는 사람들의 일상적인 활동(토양 교란 활동)으로 인해 비산되는 석면이 인체에 미치는 영향을 파악하기 위한 것이며 특정 시나리오를 설정한 후 토양 교란 활동 수행을 통해 비산되는 석면의 농도를 측정하는 방법이다(Januch et al., 2013). 하지만 ABS는 특정 시나리오에 따라 사람이 직접 시료채취를 수행해야 하며 시료를 실험실로 운반한 후 분석을 실시해야하므로 실시간으로 현장에서 위해성을 평가하는데 어려움이 있다(Wright & O'Brien, 2007).

최근 일본에서는 F-1 fiber monitor(이하 F-1)라는 실시간 섬유 측정 장치가 개발되었다(Lee et al., 2014). 이 장치는 시료 공기 내 입자에 조사된 빛의 산란 강도가 펄스 상으로 변화되면서 펄스의 피크와 면적 비가 측정된다. 이에 따라 섬유상 물질의 종횡비와 길이가 결정되고 입자 선별장치를 통하여 일정크기 이상의 섬유상 물질만 계수하는 방식을 사용하고 있다(Lee et al., 2014; Choi et al., 2015). 이 장치는 휴대가 가능하여 이동성에 편의가 있으며, 분단위의 농도 측정으로 섬유상 물질의 농도를 실시간으로 측정할 수 있다는 장점이 있다.

실시간 측정에 대한 장점은 유해물질의 농도에 대한 정보를 단시간 내에 얻을 수 있어 노출에 대한 실시간 제어 및 피드백 제공이 가능하다. 실제 현장에서는 유해물질에 노출되는 근로자들의 행동을 신속하게 변경시켜 위험을 감소시킬 수 있다는 이점을 갖는다(Kauffer et al., 2003).

본 연구에서는 실시간 섬유상 물질 측정 장치인 F-1을 이용하여 NOA 지역의 토양 내 석면함유율에 따른 석면섬유 농도를 측정하고자 한다. 또한, 주변 측정 조건과의 연관성을 파악하여 장치의 정확도와 신뢰성을 평가하고 실제 노출평가 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험실 평가

1) 시료 제작

시료는 표준 석면샘플과 석면이 확인되지 않은 NOA 지역의 일반 토양을 이용하여 시료를 제작하였다. 석

Table 1. Sample preparation by mixing asbestos with soil (lab scale)

(g)

Content(%)	Asbestos	Soil	Total
0.01	0.005	49.995	50.000
0.05	0.025	49.975	50.000
0.1	0.050	49.950	50.000
0.5	0.250	49.750	50.000
1	0.500	49.500	50.000

면샘플은 미국 RTI International로부터 확보된 표준 석면샘플을 이용하였으며 토양은 60 mesh(250 μ m) 표준체를 이용하여 체가름을 실시한 다음 바탕물질로 이용하였다. 시료는 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%의 석면함유율을 갖도록 하여 제작하였다(Table 1).

2) 시료 비산 및 포집

제작된 시료의 비산에는 입자 계측용 시험 장치가 이용되었다. 장치는 크게 3 가지 부분으로: 1) 시료를 투입한 다음 ejector를 이용해 챔버에 시료를 분산시키는 Dust Feeder(DF-3, Sibata, Japan), 2) 챔버 내에 분산된 시료가 일반 공기와 혼합되어 일정 농도를 유지하는 Mixing Chamber, 3) 유해물질의 농도를 측정할 수 있는 장치를 연결할 수 있는 포트가 설치된 Main Chamber로 나누어진다(Figure 1).

이 장치에 시료가 투입되면 일정한 농도를 유지하며 장치에 연결된 각 포트를 통해 일정 시간동안 시료를 공급할 수 있다. 따라서 각 포트에 연결된 측정장치 간의 성능 비교 실험을 실시할 수 있으며 이를 통해 재현성과 정확도 평가가 가능하다.

본 연구에서는 실험실 평가에 적용하기 전 챔버의 포트에서 균일한 농도가 유지됨을 확인하기 위해 균일성 검정을 실시하였다. 각 포트에 공극 0.8 μ m, 직경 25 mm의 MCE(Mixed Cellulose Ester) 필터가 내장

되어있는 50 mm 카울(cowl)과 personal pump(GilAir-3, Gilian, USA)를 연결한 다음 2 L/min의 유량으로 총 1 시간 동안 시료를 포집하였으며 균일성이 확보됨을 확인한 다음 실험실 평가를 진행하였다.

3) 실험실 평가 방법

실험실 평가는 실험 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위하여 온도와 습도를 일정하게 유지하였으며, HEPA filter를 이용하여 외부 방해물질의 유입 또한 최소화하였다. 실험은 재현성을 평가하기 위해 각 시료 당 3 번씩 반복하여 실시하였다(n=21). 평가에 앞서 F-1의 경우 측정대상 지역의 조건에 따른 보정 계수(factor)의 설정이 필요하며 factor 산출 방법은 다음 식과 같다(Equation 1).

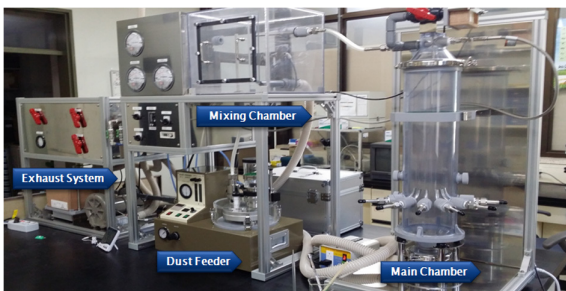
$$Factor = \frac{C}{R} \cdots \textcircled{1}$$

C : 공정법으로 확인된 섬유상 물질의 농도 (PCM 방법)

R : F-1에서 측정된 섬유상 물질의 농도

위 계산식에 의하여 factor는 4.21 로 확인되었으며, 이에 따라 F-1의 설정을 변경한 다음 평가를 실시하였다. 시료의 포집은 공극 0.8 μ m, 직경 25 mm의 MCE(Mixed Cellulose Ester) 필터가 내장되어있는 50 mm 카울(cowl)을 personal pump(GilAir-3, Gilian, USA)에 연결하여 2 L/min의 유량으로 30 분간 포집하였으며 F-1 또한 동일한 유량과 동일한 시간동안 측정을 실시하였다(Figure 2).

정밀도 및 재현성을 확인하기 위해 상대오차(Relative Difference, R_D)와 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 계산하여 제시하였으며, R_D 와 CV 산출 방법은 다음과 같다(Equation 2, 3).

**Figure 1.** Dust testing apparatus for measuring particle

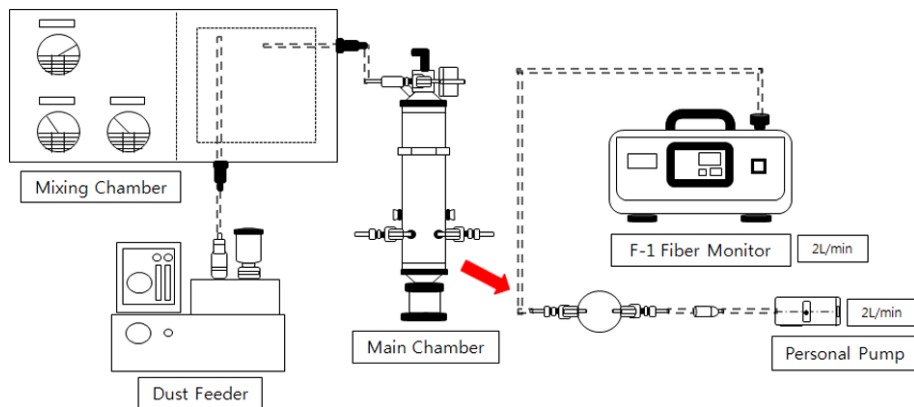


Figure 2. A schematic diagram of the instruments used for the experiment

$$R_p = \frac{|C-R|}{C} \times 100 \dots \textcircled{2}$$

C : 공경법으로 확인된 섬유상 물질의 농도 (PCM 방법)

R : F-1 fiber monitor에서 측정된 섬유상 물질의 농도

$$CV = \frac{\sigma}{x} \times 100 \dots \textcircled{3}$$

σ : 표준편차

x-bar : 평균

2. 현장 평가

1) 측정 지점 및 ABS 시나리오 선정

F-1의 현장 적용 가능성을 평가하기 위하여 충북

제천시 수산면 동아광산 주변 NOA 지역 12 지점에서 F-1 측정과 ABS를 동시에 실시하였다(Table 2, Figure 3).

평가는 다양한 기상 상황을 고려하기 위하여 오전·오후 각 2 회씩 실시하였다. ABS는 미국 환경보호국 (United States Environmental Protection Agency, US EPA)에서 제시한 표준작업절차(Standard Operating Procedure, SOP)에 준하여 토양 교란활동 중 비산이 가장 많이 되는 시나리오인 김매기 작업을 선정하여 실시하였다(Figure 4, 5).

2) 현장 평가 방법

F-1에 적용할 factor는 1.68로 확인되었으며 이를 적용한 다음 평가를 실시하였다. 시료 포집은 공극

Table 2. Sampling points(address and Coordinate) within NOA area(field scale)

No.	Address	Coordinates
1	290-1, Jeon-gok-ri	36.950452 N 128.189493 E
2	290-2, Jeon-gok-ri	36.950485 N 128.189074 E
3	290-3, Jeon-gok-ri	36.950140 N 128.188967 E
4	274-1, Jeon-gok-ri	36.949192 N 128.188684 E
5	274-2, Jeon-gok-ri	36.949027 N 128.188917 E
6	274-3, Jeon-gok-ri	36.948745 N 128.189073 E
7	274-4, Jeon-gok-ri	36.949394 N 128.188774 E
8	274-6, Jeon-gok-ri	36.948748 N 128.189187 E
9	124-1, Gugok-ri	36.950420 N 128.184035 E
10	124-2, Gugok-ri	36.949657 N 128.183824 E
11	125-1, Gugok-ri	36.948420 N 128.183066 E
12	125-2, Gugok-ri	36.948330 N 128.183200 E



Figure 3. Sampling point in Jecheon, Korea



Figure 4. Activity based sampling scenario in digging



Figure 5. Photographs of Activity Based Sampling (ABS) and F-1 monitor

0.8 μm , 직경 25 mm의 MCE(mixed cellulose ester) 필터가 내장되어있는 50 mm 카울(cowl)을 High Volume Pump(Megalite pump, The Original Thomas Megalite

High Volume Pump)에 연결하여 8 L/min의 유량으로 60 분간 총 480 L를 포집하였으며 F-1의 경우 2 L/min의 유량으로 60 분간 총 120 L 포집을 실시하

였다. 또한 현장 주변의 측정 조건이 석면의 비산에 미치는 영향을 파악하기 위하여 해당 시료 포집 시의 온도, 토양 내 함수율, 풍속을 측정하였다.

3. 분석 방법

시료가 포집된 필터는 NIOSH 7400“A” 방법에 준하여 아세톤 증기화 장치를 이용한 필터 투명화 작업을 실시한 다음 트리아세틴을 이용한 섬유 고정 작업을 통해 슬라이드로 제작하였다. 분석은 슬라이드를 충분히 건조시킨 후 위상차현미경(Phase Contrast Microscope, PCM)을 이용해 400 x에서 길이 5 μm 이상, 종횡비 (Aspect Ratio) 3:1 이상의 섬유상 물질을 모두 계수하였다. 또한 NIOSH 7402 방법에 준하여 필터를 그리드로 제작한 후 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)을 이용하여 석면 섬유를 계수하였다. 토양 내 석면 함유율(%)의 경우 NIOSH 9002 방법에 준하여 편광현미경(Polarized Light Microscope, PLM)을 이용하여 400 point-counting으로 분석하였다.

4. 통계 방법

연구에서 수집된 자료는 SPSS system version 18.0을 이용하였으며 각 방법을 통하여 확인된 섬유상 물질의 농도는 평균, 표준편차로 제시하였다. PCM 방법과 F-1 분석 결과, TEM 방법과 F-1 분석 값의 비교 결과는 Shapiro-Wilk test를 통해 정규성 검정을 실시한 후 paired t-test를 실시하여 통계적 유의성을 확인하였다. 정밀도 평가 결과는 상대오차(R_D)로 제시하였으며, 재현성 평가 결과는 변동계수(CV)로 제시하였다. 각 방법 간의 상관성은 Pearson's correlation coefficient 분석을 실시하였으며, 선형성(linearity)과 최소자승법(least square method)을 통하여 회귀식($y=ax+b$)과 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)로 제시하였다. 또한, 다중회귀분석(Multiple regression analysis)을 실시하여

각 변수(토양 내 석면함유율, 온도, 토양 내 함수율, 풍속)가 석면 섬유 농도에 미치는 영향을 확인하였다.

III. 연구 결과

1. 실험실 평가 결과

1) 균일성 검정

입자 계측용 시험 장치의 각 포트 별 균일성 검정을 한 결과 시료의 농도가 높아질수록 농도 값이 일정하게 증가하였으며 각 6개의 포트에서 균일하게 농도가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 가장 낮은 농도인 0.01%의 경우 평균값이 0.086 f/cc, 표준편차가 0.005 f/cc로 확인되었으며, 가장 고농도인 1%의 경우 평균값이 0.673 f/cc, 표준편차가 0.033 f/cc로 확인되어 포트 간 편차는 크지 않았다. 이 결과를 통하여 본 연구의 측정 장치 간 성능 비교 실험에 사용이 가능한 것을 확인할 수 있었다(Table 3, Figure 6, 7).

2) 분석 방법 간 비교 평가(Lab scale)

실험실 평가 시 실험실 내 온도는 21.7-23.4℃, 습도는 62.0-68.0%로 유지되었다. 평가 결과에서 시료의 석면 함유율이 증가함에 따라 각 측정 방법에 의해 측정된 농도 값이 증가하였다(Table 4).

정규성 검정에 따른 paired t-test 실시 결과, PCM 방법과 F-1 비교에서는 통계적으로 유의하였다($p=0.042$). 하지만, TEM 방법과 F-1 비교에서는 통계적으로 유의하지 않았다($p=0.068$)(Table 4). PCM 방법과 F-1의 상관 분석에서 $r=0.897$, TEM 방법과 F-1은 $r=0.840$ 로 강한 양의 상관관계를 확인하였다($p<0.001$) (Figure 8).

각 측정 방법의 정밀도 평가를 위한 상대오차(R_D) 결과에서는 PCM 대비 54.1%, TEM 대비 57.3%의 오차율을 확인할 수 있었다(Table 5).

재현성 평가를 위한 변동계수(CV) 확인 결과에서

Table 3. Result of equality test of each sampling port for measuring particle(lab scale) (f/cc)

Content(%)	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	MEAN \pm SD
0.01	0.091	0.084	0.086	0.091	0.079	0.084	0.086 \pm 0.005
0.05	0.097	0.087	0.101	0.094	0.098	0.087	0.094 \pm 0.006
0.1	0.109	0.128	0.140	0.093	0.105	0.101	0.112 \pm 0.018
0.5	0.382	0.302	0.348	0.316	0.362	0.334	0.341 \pm 0.030
1	0.668	0.692	0.617	0.663	0.681	0.714	0.673 \pm 0.033

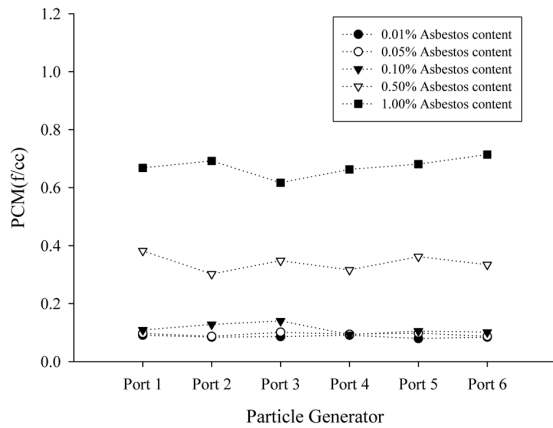


Figure 6. Distribution of fiber concentrations measured at each port in the chamber(all asbestos content, lab scale)

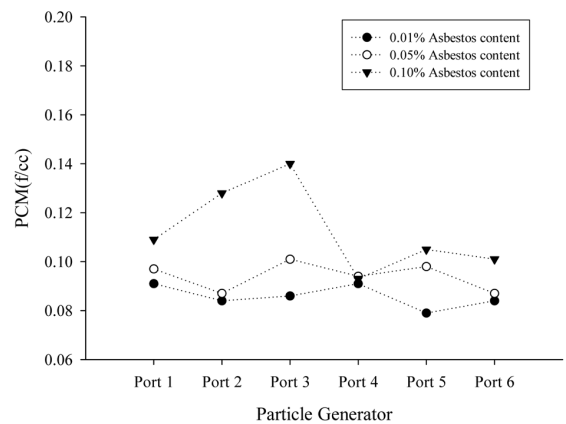


Figure 7. Distribution of fiber concentrations measured at each port in the chamber(low asbestos content, lab scale)

Table 4. Results of airborne asbestos fiber concentrations by asbestos content in soil(lab scale)

Content (%)	n	Temp. (°C)	Humidity (%)	PCM (f/cc)	TEM (f/cc)	F-1 (f/cc)	p-value	
							PCM vs F-1	TEM vs F-1
0.01	3	21.7	68.00	0.074±0.012	0.080±0.013	0.098±0.040		
0.05	3	22.3	66.00	0.097±0.013	0.086±0.013	0.120±0.095		
0.1	3	22.8	65.00	0.123±0.019	0.121±0.021	0.184±0.137	.042*	.068
0.5	3	23.0	63.00	0.332±0.040	0.349±0.061	0.394±0.084		
1	3	23.4	62.00	0.473±0.049	0.453±0.065	0.612±0.171		
Average		0.0	0.00					

* p-value < .05

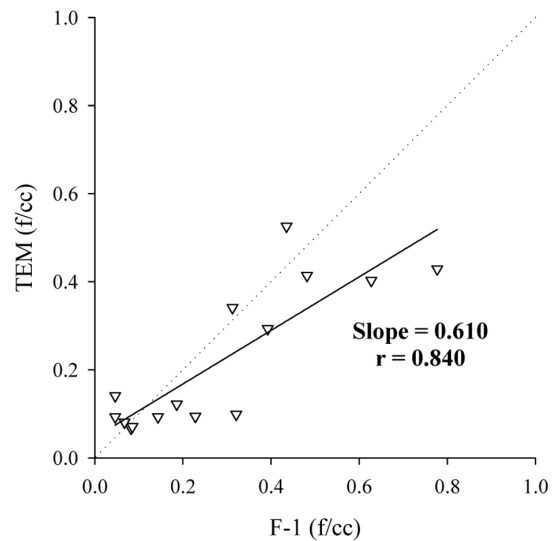
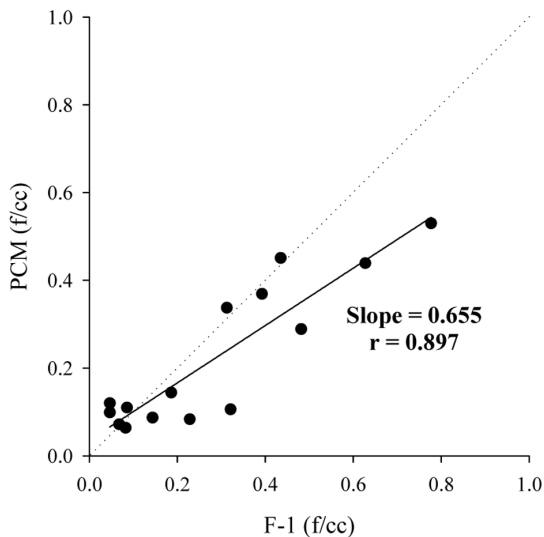


Figure 8. Correlation analysis between the traditional methods and F-1 fiber monitor(lab scale)

Table 5. Relative differences of asbestos concentrations between measurement methods(lab scale / RD, CV)

Content (%)	n	RD		CV(%)		
		(PCM_F-1)	(TEM_F-1)	PCM	TEM	F-1
0.01	3	32.8±29.3	31.1±20.0	15.9	16.2	41.2
0.05	3	82.8±79.2	70.6±63.5	13.7	15.1	79.7
0.1	3	97.4±91.9	114.2±94.7	15.6	17.4	74.4
0.5	3	26.6±34.2	19.4±12.8	12.1	17.4	21.4
1	3	30.8±23.5	51.1±31.7	10.4	14.3	28.0
Average				13.6	16.1	48.9

Table 6. Measurement results of asbestos concentrations in NOA area(Jecheon, Korea) and environmental variables(field scale)

No.	Temp. (°C)	Moisture in soil(%)	Windspeed (m/sec)	Asbestos contents in soil(%)	PCM (f/cc)	TEM (f/cc)	F-1 (f/cc)	p-value	
								PCM vs F-1	TEM vs F-1
1	18.70	6.60	1.04	2.75	0.019	0.009	0.021		
2	17.50	3.25	1.32	3.75	0.049	0.016	0.004		
3	20.00	5.64	1.46	1.50	0.036	0.033	0.112		
4	20.90	6.87	1.47	1.50	0.036	0.038	0.106		
5	21.50	3.21	1.68	2.25	0.040	0.024	0.077		
6	20.20	7.34	0.68	2.50	0.035	0.033	0.102	.035*	.042*
7	13.40	9.95	2.04	1.50	0.005	0.004	0.030		
8	16.60	5.62	1.41	1.25	0.008	0.002	0.030		
9	19.30	7.41	1.48	0.50	0.018	0.011	0.021		
10	23.20	4.17	1.38	3.00	0.064	0.053	0.059		
11	23.60	4.30	1.93	5.25	0.079	0.062	0.154		
12	22.90	4.28	2.47	3.25	0.056	0.076	0.003		

* p-value < .05

는 PCM 방법이 13.6%, TEM 방법이 16.1%, F-1이 48.9%를 보여 기존 방법에 비해 F-1 측정값의 변동이 심한 것으로 확인되었다(Table 5).

2. 현장 평가 결과

1) 분석 방법 간 비교 평가(Field scale)

현장의 온도는 13.4-23.6°C, 습도는 31.3-76.6%, 풍속은 0.68-2.47 m/sec로 확인되었다(Table 6).

정규성 검정에 따른 paired t-test 실시 결과, PCM 방법과 F-1 비교, TEM 방법과 F-1 비교는 통계적으로 유의하였다($p=.035$, $.042$)(Table 6).

상관성 분석 결과에서는 PCM 방법과 F-1 비교에서 $r=.682$, TEM 방법과 F-1 비교에서 $r=.469$ 로 확인되었다($p<.05$). 현장 평가 결과는 양의 상관관계를

보였으나 실험실 평가에 비해 변동구간의 크기가 확연히 차이나는 것을 확인할 수 있었다(Figure 9).

2) 다중회귀분석 결과

각 변수가 석면 섬유 농도에 미치는 영향을 확인한 결과는 다음과 같다(Table 7, 8, 9). Durbin-Watson 검정을 통한 독립성 분석에서는 PCM, TEM, F-1 모두 1~3 사이 값을 보여 자기상관이 없는 것으로 확인되었다(1.870, 2.521, 2.208).

다중공선성 확인 결과에서는 토양 내 석면함유율, 온도, 토양 내 함수율, 풍속의 분산팽창인자(Variance Inflation Factor, VIF)가 10 미만으로 확인되어 다중공선성이 발생하지 않았다(1.595, 1.682, 1.906, 1.035).

ABS 실시 후 PCM 방법으로 분석된 결과에서는 토

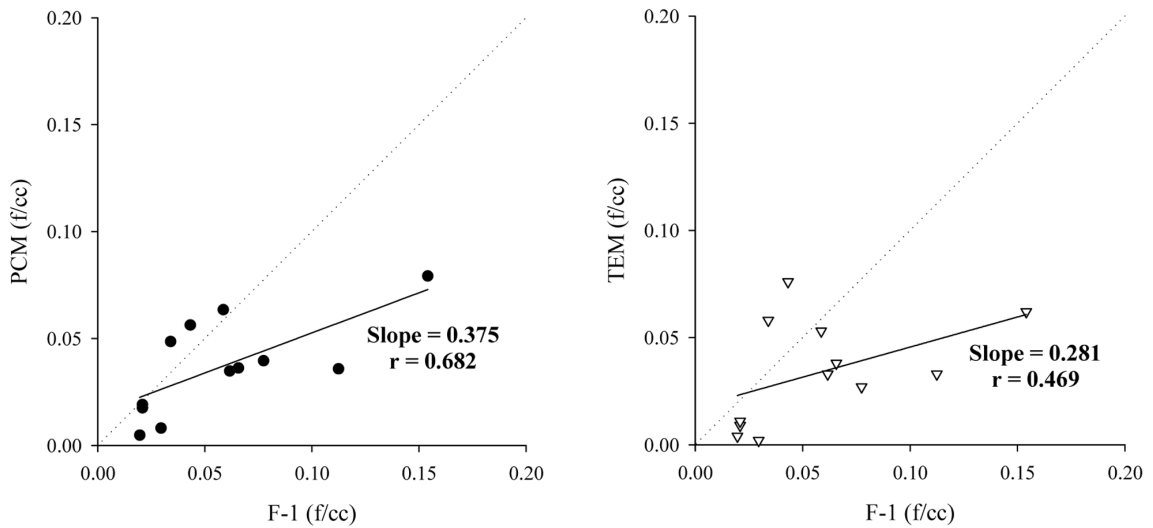


Figure 9. Correlation analysis between the traditional methods and F-1 fiber monitor(field scale)

Table 7. Multiple regression model for measurement condition vs PCM analysis result after ABS(field scale)

Dependent variable	Independent variable	Unstandardized coefficients		Standardized Coefficients β	<i>p</i> -value	VIF
		B	SE			
ABS_PCM	Constant	-.062	.028		.063	
	Asbestos content in soil(%)	.009	.002	.492	.009	1.595
	Temperature(°C)	.004	.001	.525	.007	1.682
	Moisture in soil(%)	-.001	.002	-.089	.570	1.906
	Windspeed(m/s)	.004	.005	.076	.509	1.035
Multiple regression model		$y = -0.062 + 0.009x_1 + 0.004x_2 - 0.001x_3 + 0.004x_4$ $F=19.763^*, R^2=.919, \text{adj } R^2=.872$				
		Durbin-Watson		1.870		

* *p*-value < .001

Table 8. Multiple regression model for measurement condition vs TEM analysis result after ABS(field scale)

Dependent variable	Independent variable	Unstandardized coefficients		Standardized Coefficients β	<i>p</i> -value	VIF
		B	SE			
ABS_TEM	Constant	-.056	.054		.335	
	Asbestos content in soil(%)	.008	.005	.420	.122	1.595
	Temperature(°C)	.003	.002	.388	.158	1.682
	Moisture in soil(%)	-.002	.003	-.143	.600	1.906
	Windspeed(m/s)	.011	.010	.211	.309	1.035
Multiple regression model		$y = -0.056 + 0.008x_1 + 0.003x_2 - 0.002x_3 + 0.011x_4$ $F=5.242^*, R^2=.750, \text{adj } R^2=.607$				
		Durbin-Watson		2.521		

* *p*-value < .05

Table 9. Multiple regression model for measurement condition vs F-1 fiber monitor result(field scale)

Dependent variable	Independent variable	Unstandardized coefficients		Standardized Coefficients β	p-value	VIF
		B	SE			
ABS_F-1	Constant	-.129	.134		.369	
	Asbestos content in soil(%)	.010	.011	.306	.420	1.595
	Temperature(℃)	.007	.005	.534	.189	1.682
	Moisture in soil(%)	.002	.008	.121	.766	1.906
	Windspeed(m/s)	.003	.025	.032	.914	1.035
Multiple regression model		$y = -0.129 + 0.010x_1 + 0.007x_2 + 0.002x_3 + 0.003x_4$ $F=1.375, R^2=.440, \text{adj } R^2=.120$				
		Durbin-Watson		2.208		

양 내 석면함유율과 온도의 경우 통계적으로 유의하였으나($p=.009, .007$), 토양 내 함유율과 풍속의 경우는 통계적으로 유의하지 않았다($p=.570, .509$). PCM 다중회귀식의 경우는 통계적으로 유의하였다($p<.001$) (Table 7).

ABS 실시 후 TEM 방법으로 분석된 결과에서는 모든 변수에서 통계적으로 유의하지 않았다($p=.112, .158, .600, .309$). 하지만 TEM 다중회귀식의 경우 F 값은 5.242, F(유의확률)은 .028, Adj R^2 는 .607로 다중회귀식 자체는 통계적으로 유의하였다(Table 8).

F-1로 측정된 결과에서는 TEM 방법과 유사하게 모든 변수에서 통계적으로 유의하지 않았다($p=.420, .189, .766, .914$). F-1은 다중회귀식의 경우에도 통계적으로 유의하지 않았다($F(\text{유의확률})=.368$)(Table 9).

IV. 고 찰

입자상 물질의 실시간 측정에는 광산란(Light-scattering) 방식이 적용된다. 광산란 방식은 입자에 빛이 조사되는 경우 입자의 크기에 의해 산란되는 빛의 강도를 측정하여 입자의 농도 및 크기를 확인하는 방식이다(Hinds, 2012). 빛의 산란 강도는 Mie 이론에 의해 설명되며(Mie, 1908), 이 이론은 구형 입자뿐만 아니라 원통형 입자의 경우에도 적용이 가능하다(Espenscheid et al., 1964).

F-1을 이용하여 서울 시내 공기 중 석면 농도를 측정 한 연구에서는 실험실 내에서 PCM 방법과 F-1 측정값과의 비교 결과가 $R^2=.8852$ 로 확인되었다(Lee et al., 2014). 이 연구에서는 측정 장소에서의 특정 factor

산정 및 적용과 F-1의 물질 측정에 대한 특성을 높은 상관성의 근거로 제시하고 있다.

F-1의 경우 섬유상 물질의 직경이 굵고 길이가 길수록 산란광의 펄스가 커지며 섬유상 물질의 길이가 길수록 펄스 면적이 커진다(Lee et al., 2014). 또한 입자 선별장치에 의해 일정 길이, 폭 이상을 갖는 섬유상 물질만을 선별하여 측정하기 때문에 비섬유상 물질이 다량 분포되어 있는 경우에서도 측정의 정확도가 높다고 설명하고 있다. 본 연구에서는 실험실 내에서 PCM 방법과 F-1 측정값과의 상관관계가 $r=.897$ 로 확인되었다. 이는 일정하게 유지된 실험실 내부 조건과 외부환경에 노출되지 않은 chamber 내부에서 실험이 실시되었기에 이와 같은 결과가 나타났다고 사료되었다.

재현성을 평가하는 지표로 이용되는 CV를 확인한 결과에서는 PCM 방법의 경우 13.6%, TEM 방법의 경우 16.1%, F-1의 경우 48.9%로 나타났다. 미국의 FM-7400과 영국의 Fibrecheck(FC-2)를 비교한 연구에서는 전체 실험에서 CV가 20% 미만으로 나타났지만(Kauffer et al., 2003), 본 연구에서는 F-1이 큰 변동을 보여 기존 방법이나 타 장비에 비해 재현성이 낮음을 확인할 수 있었다.

또한, PCM 방법의 경우 농도가 높아질수록 CV가 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 현행 분석방법인 PCM 방법은 NIOSH 7400“A” method에 준하고 있다. 이는 하나의 샘플 분석 시 계수되는 섬유 수가 많을수록, 계수하는 분석 필드의 수가 증가할수록 발생할 수 있는 변동의 범위가 작아짐을 의미한다.

분석 시 100 개의 섬유 수를 계수하는 경우에서 95%

신뢰수준의 범위는 -49~213%의 변동범위에 해당한다 (NIOSH, 1994). NIOSH 7400 method에서는 PCM 분석 시 1) 최대 100 개의 섬유 수를 계수, 2) 해당 필드에서 계수되는 섬유 수가 100 번째에 해당하는 경우 그 필드에 있는 섬유 수까지만 계수, 3) 계수하는 필드는 최소 20 필드 이상, 최대 100 필드까지를 분석하도록 권고하고 있다. 따라서 PCM 방법과 비교되기 위해서는 실시간 섬유상 물질 측정 장치의 정확성과 신뢰성이 충분히 확보되어야 한다고 사료된다.

현장에서 실시된 평가 결과에서 PCM과 F-1과의 상관성 분석 결과 $r=0.682$ 로 확인되었으며, TEM과 F-1과의 상관성 분석 결과는 $r=0.469$ 로 확인되었다. 현장에서는 실험실의 결과에 비해 상관성이 높지 않았다. 이는 현장의 경우 실험실과 달리 측정에 영향을 미칠 수 있는 다양한 방해요인이 존재하고 있기에 이와 같은 결과를 얻을 수 있었다고 사료된다.

Kim et al.(2012)의 연구에서 토양 내 함수율에 따라 비산되는 석면섬유의 양이 결정되지만, 약 5.0% 이하의 낮은 함수율에서는 토양 중 석면함유율과 비산된 공기 중 석면섬유 농도와의 상관성은 없는 것으로 확인되었다. 본 연구에서도 측정된 토양 내 함수율은 3.21-9.95%이었으며, 분석 결과 토양 내 함수율이 높아질수록 측정된 석면섬유 농도가 낮아졌으나 토양 내 함수율과 석면섬유 농도와 통계적으로 유의한 상관성은 없는 것으로 나타났다.

기상 조건 중 온도의 경우 온도가 상승할수록 석면섬유의 농도가 높아지는 것을 확인하였다. 측정된 온도는 13.4-23.6°C 사이였으며 온도가 상승하고 주변 습도가 낮아짐에 따라 습도에 민감하기 때문에 석면 비산의 정도가 높아져 농도가 높게 측정된 것으로 사료된다.

본 연구에서 측정된 풍속의 범위는 0.68-2.47 m/sec이며 석면섬유 농도와 풍속과의 상관성은 높지 않았으며 통계적으로 유의하지 않았다.

2011년 한국환경공단에서는 실시된 토양 중 석면 방출 실험(Lee et al., 2011)에서 임의의 풍속만으로 토양 내에 함유된 석면을 비산시켰다. 하지만 바람만으로는 ABS 시나리오와 같이 물리적 행위에 의한 토양 교란활동을 적용한 실험이라고 생각하기에는 어렵다고 판단되었다. 따라서 석면의 비산에 풍속이 미치는 영향을 파악할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

샘플링 시 과포집이 발생할 수 있는 부분도 간과할 수 없다. Lee et al.(2014)의 연구에서는 F-1의 경우에 사전에 설정된 길이와 폭을 갖는 섬유상 입자만을 선별하고 측정하기 때문에 비섬유상 입자가 다량 존재하더라도 측정결과에 미치는 영향이 적게 나타난다고 제시하고 있다. 하지만 이 연구는 일반 대기 중에서의 섬유상물질 농도를 측정하였기에 기타 방해물질의 존재가 적었을 것으로 사료된다. 토양의 경우 대기 중에 비해 상대적으로 내부에 혼합된 방해물질이 다량으로 존재할 가능성이 많으므로 현장에서의 측정에서 정밀성을 확보하는데 어려움이 있을 것으로 사료된다. 본 연구에서도 현장 평가 시 측정된 결과 값이 큰 변동치를 보였기에 실제 현장에 F-1을 적용하여 기존 방법을 대체하기에는 어려울 것으로 판단된다.

본 연구에서의 제한점은 1) 다양한 종류의 석면을 대상으로 평가를 실시하지 못하였으며, 2) 평가 조건의 다양성을 확보하지 못한 부분, 3) 다양한 NOA 지역에서의 평가가 실시되지 못한 점을 들 수 있다. 따라서 이러한 제한점을 보완한다면 실시간 섬유상 물질 측정방법의 정확도 및 정밀도를 높일 수 있을 것이라 판단된다. 또한, 실시간 섬유상 물질 측정 방법이 ABS 방법의 선행방법으로 적용되기 위해서는 ABS 방법의 문제점을 파악 및 개선하고 다양한 조건에서의 평가 데이터 확보 및 검토를 실시하여 충분한 신뢰성을 확보할 필요가 있다고 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서는 F-1 fiber monitor를 이용하여 측정 조건과의 연관성에 따른 장치의 신뢰성 및 실제 노출평가 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

1. 실험실 평가에서 제작된 시료의 석면함유율 증가에 따라 F-1 fiber monitor 측정값은 기존 방법인 PCM, TEM 방법과 양의 상관관계를 보였으나, 정확도 및 정밀도는 기존 방법에 비해 낮게 확인되었다.

2. 현장 평가에서 F-1 fiber monitor 측정값은 기존 방법에 비해 높게 형성되었으며 실험실 평가에 비해 변동범위의 크기가 커졌다.

3. 다중회귀분석에서 PCM, TEM 다중회귀모델은 통계적으로 유의하지만 F-1 fiber monitor는 통계적 유의성을 보이지 않았다.

4. 토양 내 석면함유율 및 온도의 경우 PCM, TEM 회귀모델에서 영향력이 높았으나 토양 내 함수율 및 풍속은 영향력이 낮았다.

이상의 결과를 볼 때 F-1 fiber monitor를 이용한 현장의 노출 평가에는 어려울 것으로 판단되지만 screening 용도로의 활용은 가능할 것으로 사료된다. 또한, 실시간 섬유상 물질 측정 방법이 ABS 방법의 선행방법으로 적용되기 위해서는 충분한 신뢰성을 확보할 필요가 있다고 판단된다.

References

- Choi JK, Paek DM, Paik NW. The production, the use, the number of workers and exposure level of asbestos in Korea. *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 1998; 8(2):242-253
- Choi S, Jang K, Park K, Kim D, Kim H. Characteristics of Generated Fibrous/Particulate Matters from Asbestos-Containing Building Materials(ACBMs). *J Korean Soc Occup Environ Hyg* 2015;25(2):184-193
- Espenscheid WF, Matijevic E, Kerker M. Aerosol studies by light scattering. III. Preparation and particle size analysis of sodium chloride aerosols of narrow size distribution. *J Phys Chem* 1964;68(10):2831-2842
- Hendrickx M. Naturally occurring asbestos in eastern Australia: a review of geological occurrence, disturbance and mesothelioma risk. *Environ Geol* 2009;57(4): 909-926
- Hillerdal G. Mesothelioma: cases associated with non-occupational and low dose exposures. *Occup Environ Med* 1999;56(8):505-513
- Hinds WC. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons. 2012
- International Agency for Research on Cancer(IARC). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 100c. Arsenic, Metals, Fibres and Dusts. 2012:35-38
- Jamrozik E, De Klerk N, Musk AW. Asbestos-related disease. *Intern Med J* 2011;41(5):372-380
- Januch J, Brattin W, Woodbury L, Berry D. Evaluation of a fluidized bed asbestos segregator preparation method for the analysis of low-levels of asbestos in soil and other solid media. *Analytical Methods* 2013;5(7):1658-1668
- Kauffer E, Martin P, Grzebyk M, Villa M, Vigneron JC. Comparison of two direct-reading instruments (FM-7400 and Fibrecheck FC-2) with phase contrast optical microscopy to measure the airborne fibre number concentration. *Ann Occup Hyg* 2003;47(5): 413-426
- Kim IJ, Kim JW, Ryu HS, Jung MC. Friable test and risk assessment for asbestos in soils using the releasable asbestos sampler (RAS). *J Soil Groundw Environ* 2012;17(5):68-74
- Korea Environment Corporation(KECO). A scrutiny for asbestos in soil and ground-water around the closed asbestos mine. 2010a
- Korea Environment Corporation(KECO). A study for minimizing exposure of asbestos(establish the soil environmental management standard of asbestos occurrence areas such as asbestos mines). 2010b
- Lee J, Lee S, Kim J, Kim J, Chung S 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
- Lee K, Lee J, Yeom J. Development of a Dust Generator Using Soil Sample. *Epidemiology* 2011;22(1):S270-271
- Lee RJ, Strohmeier BR, Bunker KL, Van Orden DR. Naturally occurring asbestos - a recurring public policy challenge. *J Hazard Mater* 2008;153(1):1-21
- Lou S, Liu X, Mu S, Tsai SP, Wen CP. Asbestos related diseases from environmental exposure to crocidolite in Da-yao, China. I. Review of exposure and epidemiological data. *Occup Environ Med* 2003;60(1):35-42
- Metintas S, Metintas M, Ucgun I, Oner U. Malignant mesothelioma due to environmental exposure to asbestos : follow-up of a Turkish cohort living in a rural area. *Occup Environ Lung dis* 2002;122(6):2224-2229
- Mie G. Contribution to the optical properties of turbid media, in particular of colloidal suspensions of metals. *Ann Phys* 1908;25:377-452
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Asbestos Safety Management Act. Chapter 4, Article 13(Impact Assessment of Naturally Produced Asbestos), Available from : <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=180399&efYd=20170128#0000>
- National Institute of Environmental Research(NIER). A study for surveys of use asbestos-containing materials in agricultural building. 2008
- National Institute of Occupational Safety & Health(NIOSH). Asbestos and other fibers by PCM(NIOSH 7400). 1994
- Wright KE, O'Brien BH. Fluidized Bed Asbestos Sampler Design and Testing. Prepared for Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory, Environmental Sciences Division, U.S. Environmental Protection Agency and the U.S. Department of Energy Under DOE Idaho Operations Office. 2007