

건물 내 석면제거 작업과 공기 중 석면의 외부누출 위험성 평가

백남원* · 이승철¹ · 변재철² · 이동희³

서울대학교 보건대학원, ¹(사)한국석면감리협회 전문교육센터, ²대한산업보건협회, ³한국산업보건연구소

A Risk Assessment of Asbestos Fiber Leaks to Environment during Asbestos Removal Activity in Buildings

Namwon Paik* · Soungcheoul Lee¹ · Jaecheol Byeon² · Donghee Lee³

Graduate School of Public Health, Seoul National University

¹*Korea Asbestos Superintendent Association*

²*Korean Industrial Health Association*

³*Korea Institute for Occupational Health*

ABSTRACT

Objectives: The objectives of this study were to investigate whether airborne fibers were released to the outside air from the asbestos removal area in buildings, and to confirm the existence of asbestos fibers in samples using transmission electron microscopy(TEM).

Methods: A total of 1,295 samples was collected from inside and outside 155 asbestos removal areas. To investigate the release of asbestos fibers from the removal area, samples were collected at three locations, such as an entrance to change room, an exit of negative pressure unit(NPU) and perimeter areas. Samples were also collected in the removal area prior to and after removal activity. All samples were analyzed by phase contrast microscopy(PCM) and one-tenth of the samples was analyzed using TEM to discriminate asbestos fibers.

Results: During the asbestos removal activity, 27(4.1%) of 662 samples collected outside the removal area showed airborne fiber concentrations equal to or in excess of 0.01 f/cc, the permissible emission standard of the Korean Ministry of Environment. Further, 111 samples were analyzed using TEM. The distribution of asbestos fiber concentrations was log-normal. It was found that 51 of 111 samples(46%) contained asbestos fibers.

Conclusions: There is a potential risk of asbestos exposure among neighbors and the public outside the asbestos removal areas. It is recommended that the asbestos removal work be conducted strictly following the specifications required by government and/or professional organizations.

Key words: asbestos removal, public asbestos exposure, PCM, TEM

I. 서 론


미국 환경보호처(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)에서는 1973년 석면 1% 이상 포함하고 있는 물질을 단열재나 화재방지용으로 건물에 사용하지 못하도록 규정한 바 있으며(U.S. EPA, 1973), 1986년


에는 석면위험긴급대응법(Asbestos Hazard Emergency Response Act, AHERA)을 공포하여 학교 등 건물에 대한 석면조사와 석면제거절차 등을 규정하였다(U.S. EPA, 1986a). 우리나라 고용노동부와 환경부에서는 각각 산업안전보건법과 석면안전관리법을 제정하여 석면으로부터 근로자를 보호하고 석면으로 인한 환경오염을


*Corresponding author: Namwon Paik, Tel: 010-7225-3650, E-mail: nwpaik@snu.ac.kr


A-2503 Royal Palace, 449, Seongnam-daero, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea 13596

Received: October 23, 2020, Revised: November 19, 2020, Accepted: December 21, 2020

 Namwon Paik <https://orcid.org/0000-0001-5411-1871>

 Jaecheol Byeon <https://orcid.org/0000-0003-4744-2546>

 Soungcheoul Lee <https://orcid.org/0000-0002-2839-8431>

 Donghee Lee <https://orcid.org/0000-0002-3252-8745>

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.

예방하고 있다(MoE, 2011; MoEL, 2020a).

석면을 함유한 건축자재에는 슬레이트, 밤라이트 등 여러 종류가 있으며 물질의 상태에 따라 부서지기 쉬운(friable) 물질과 단단한(non-friable) 물질로 구분한다. 석면함유물질이 노후하여 석면이 공기 중으로 흩날리는 경우에는 해당 물질을 가능한 한 빨리 제거해야 한다. 그러나 석면함유물질이 단단하여 정상상태에서 공기 중으로 비산할 가능성이 적을 때에는 해당 물질을 당장 제거할 필요가 없다. Mossman et al.(1990)의 연구에 의하면 건축물에서 석면함유물질을 제거하기 전과 제거한 후의 상태를 비교했을 때 실내 공기 중 석면농도는 후자의 경우에 더욱 악화되었다. 우리나라 정부에서는 석면함유물질의 상태를 고려하지 않고 모든 석면함유물질을 제거하는 정책을 채택하여왔다. 그러나 석면제거업체와 석면측정기관 및 감리인 등은 질적으로나 양적으로 부족하다. 그러므로 부실한 업체들이 난립하고 있으며 석면제거작업이 안전하게 이루어지지 않는 경우가 많다. 석면제거작업을 수행할 때에는 석면이 작업장 외부로 누출되지 않도록 작업장을 밀폐하고 음압을 형성하고 습식작업을 해야 한다. Paik et al.(1983)은 석면제거작업에서 습식방법을 적용했을 때 건식작업을 했을 때보다 공기 중 섬유 농도가 97% 감소했다고 보고했다.

이 연구에서는 석면제거작업을 수행할 때 공기 중 석면이 작업장 밖으로 누출되는지 여부를 조사하고 석면제거작업 전과 작업 후의 작업장 내 섬유농도를 측정하여 작업이 적절히 이루어졌는지 평가하였다. 공기 중 석면농도를 측정하는 방법으로는 위상차현미경법(phase contrast microscopy, PCM)과 투과전자현미경법(transmission electron microscopy, TEM)을 적용하였다.

이 연구의 목적은 석면제거작업을 할 때 작업장 주변 외부로 석면이 누출되는지 여부를 확인하고, 석면제거작업 전과 작업 후의 작업장 내 석면오염실태를 평가하고, PCM을 이용하여 공기 중 총 섬유농도를 측정한 후 TEM을 이용하여 총 섬유 중 석면의 존재여부를 확인하는데 있다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

이 연구는 2008년 4월 1일부터 2009년 1월 10일까지 수행된 전국의 석면함유물질 제거 작업장 155개를

Table 1. Number and percent of asbestos removal sites studied by location

Location	Number and percent of asbestos removal sites	
	Number	%
Urban	101	65.2
Suburban	28	18.1
Underground	11	7.1
Industrial area	8	5.2
Redevelopment area	6	3.9
Other	1	0.5
Total	155	100.0

Table 2. Number and percent of asbestos-containing materials removed by type

Type	Number and percent of asbestos-containing materials	
	Number	%
Tex(ceiling)	86	55.5
Slate	42	27.1
Tex(ceiling) and Bamlite(wall)	12	7.7
Bamlite(ceiling)	6	3.9
Slate and tex(ceiling)	4	2.6
Tex(ceiling) and Bamlite(ceiling)	3	1.8
Slate and Bamlite(ceiling)	1	0.7
Slate, tex(ceiling) and Bamlite(wall)	1	0.7
Total	155	100.0

대상으로 수행되었다. 작업장 위치는 도심지역 65.2%, 시외지역 18.1%, 지하공간 7.1% 및 기타(공단지역, 재개발 지역 등) 9.6% 등이었다(Table 1). 석면함유물질은 텍스(천장재) 55.5%, 슬레이트 27.1% 및 밤라이트 14.8% 등이었다(Table 2).

2. 연구 방법

1) 시료채취

시료는 “NIOSH 7400” 방법에 따라 채취하였다(NIOSH, 1994). 즉 직경 25 mm MCE(mixed cellulose ester membrane) 필터에 유량 약 10 L/min로 1,200 L이상의 공기를 채취하였다. 총 1,295개 시료를 채취하였으며, 작업 전, 작업 중 및 작업 후에 각각 317개, 662개 및 316개 시료를 채취하였다(Figure 1).

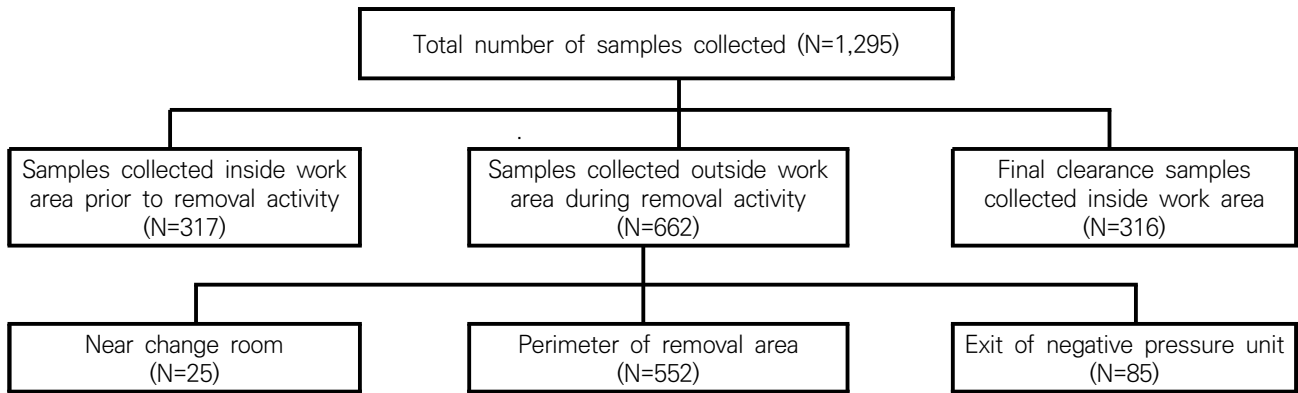


Figure 1. Flow chart of sampling by time and location

작업 전 농도는 정상조건의 배경농도를 확인하기 위해 작업을 시작하기 전에 작업장 내에서 측정하였고, 작업 중 농도는 작업하는 동안 섬유가 주변 외부환경으로 누출되는지 여부를 확인하기 위하여 작업장 주변 외부에서 측정하였고, 작업 후의 농도는 석면제거작업을 마치고 청소를 한 후 사람이 들어가도 되는지의 여부를 확인하기 위해 작업장 내부에서 측정하였다.

2) 시료분석

시료분석에는 PCM과 TEM을 적용하였다. 모든 시료는 “NIOSH 7400” 방법에 따라 위상차현미경(Leica DM 750, Germany)으로 길이 5 μm 이상이고, 길이 대 지름의 비 3:1 이상인 섬유를 450배 확대하여 계수하였고(NIOSH, 1994) 농도단위는 f/cc로 하였다. PCM으로는 석면을 감별할 수 없으므로 총 시료 중 약 10%에 해당하는 128개를 무작위로 선별하여 미국의 AHERA TEM에 대해 National Voluntary Laboratory Accreditation Program(NVLAP) 인증을 받은 실험실에 의뢰하여 전자현미경으로 분석하였다. 이 연구에서는 투과전자현미경(Philips EM-300 TEM, Netherlands)

을 이용하여 EPA 방법으로 길이 0.5 μm 이상, 길이 대 지름의 비 5:1 이상인 석면을 18,000배 확대하여 계수하였고, 농도단위는 s/cc로 하였다(U.S. EPA, 1986b).

3) 자료 분석

작업 전, 작업 중 및 작업 후에 채취한 각 시료 그룹 간의 차이 및 시료채취 위치에 따른 차이 등을 확인하기 위하여 X^2 test를 시행하였다. Shapiro-Wilks test를 이용하여 TEM 분석치의 분포를 검사하였고(Mulhausen & Damiano, 1998; AIHA, 2020), Excel linear regression을 이용하여 PCM에 의한 섬유 농도와 TEM에 의한 석면 농도의 상관관계를 검정하였다.

III. 결 과

1. 위상차현미경법에 의한 총 섬유농도

고용노동부에서는 석면제거작업 후의 공기 중 석면농도기준을 제정하였고, 환경부에서는 사업장 주변의 석면배출 허용기준을 정하였으며 두 기준은 모두 0.01 f/cc로 동일하다(MoE, 2016; MoEL, 2020b).

Table 3. Number and percent of samples which showed concentrations equal to or greater than 0.01 f/cc by group

Sample group by removal activity	Samples collected (N)	Samples ≥ 0.01 f/cc (N, %)	p-value
Group 1 - Samples collected in the removal area prior to removal activity	317	15 (4.7%)	$p > 0.05$
Group 2 - Samples collected at outside perimeter of removal area during removal activity	662	27 (4.1%)	
Group 3 - Final clearance samples collected in the removal area	316	10 (3.2%)	
Total	1,295	52 (4.0%)	

Table 3에서 보는 바와 같이 작업 전·중·후 전체 시료 1,295개 중에서 환경부와 고용노동부의 기준 0.01 f/cc이상인 시료는 52개(4.0%)였고, 이를 작업 전·중·후로 구분하여 보면 작업 전 측정에서는 317개 시료 중 15개(4.7%), 작업 중 측정에서는 662개 시료 중 27개(4.1%) 및 작업이 끝나고 청소를 마친 후 시행한 측정에서는 316개 시료 중 10개(3.2%)였으며 이들 3개 그룹 간에는 유의한 차이가 없었다($p>0.05$).

석면제거작업 중에는 작업장 외부의 3개 위치, 즉 위생설비 근처, 작업장 주변 및 음압기 배출구 등에서 측정하였으며(Figure 2), 기준치 이상 시료의 분포는 측정 장소에 따라 유의하게 차이가 있었다(Table 4). 작업장 출입구에 해당하는 위생설비 근처에서 가장 높았고(16.0%), 다음으로 음압기 배출구(5.9%) 및 작업장 주변(3.3%) 등의 순서였으며 위치에 따라 유의한 차이

가 있었다($p<0.05$).

2. 전자현미경법에 의한 석면농도

1) 석면농도 분포

총 1,295개 시료를 PCM으로 분석하여 총 섬유농도(석면섬유와 비석면 섬유 포함)를 계수하고 그 중 10%에 해당하는 128개 시료를 무작위로 선택하여 TEM으로 분석하여 석면섬유를 감별 분석하였다. 128개 시료 중 17개 시료에서는 먼지 등 방해물질이 많아 분석이 불가능하였고, 111개 시료에 대하여 TEM분석을 시행한 결과 51개(46%) 시료에서 석면이 검출되었다(Table 5). 총 111개 시료 중 섬유 농도가 기준이상인 고농도 그룹(50개 시료)에서는 35개(70%)에서 석면이 검출되었고, 섬유 농도가 기준 미만인 저농도 그룹(61개 시료)에서는 16개(26%) 시료에서 석면이 검출되었으며 두

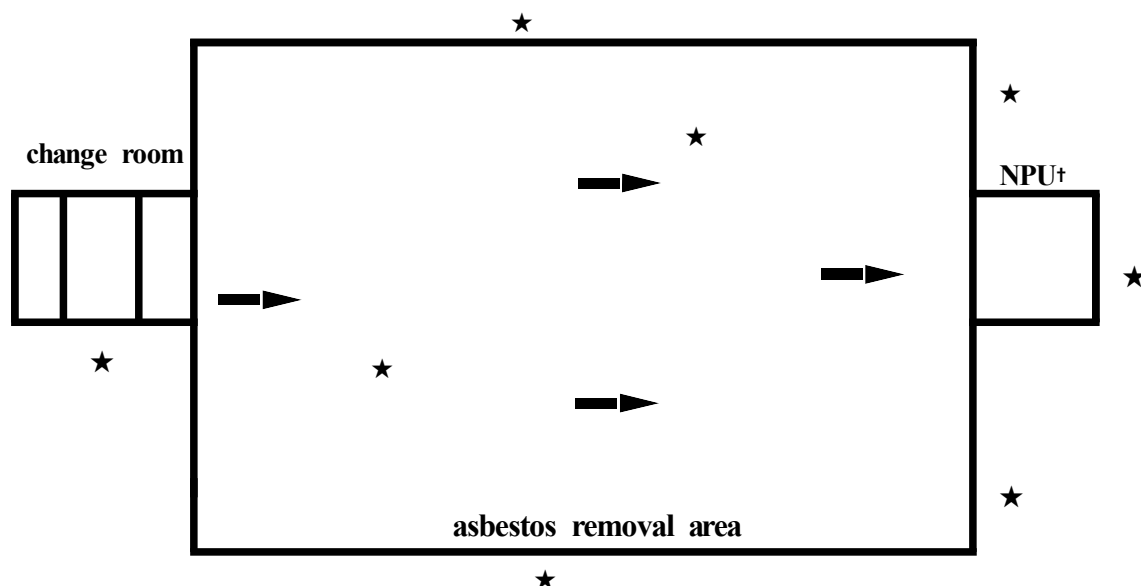


Figure 2. Sample locations inside and outside asbestos removal area

★ Sampling point

† NPU: negative pressure unit

Table 4. Number and percent of samples which showed equal to or greater than 0.01 f/cc out of samples collected during removal activity by location

Sampling location	Samples collected (N)	Samples ≥ 0.01 f/cc (N, %)	p-value
Location 1 - Outside change room	25	4 (16.0%)	$p<0.05$
Location 2 - Outside perimeter	552	18 (3.3%)	
Location 3 - NPU exit	85	5 (5.9%)	
Total	662	27 (4.1%)	

Table 5. Results of analysis using transmission electron microscopy by sample group

Sample group by PCM results	Results of TEM analyses		p-value
	Number of samples analyzed (N)	Number and percent of samples from which asbestos fibers detected (N, %)	
High Group ≥ 0.01 f/cc	50	35 (70%)	p<0.05.
Low Group < 0.01 f/cc	61	16 (26%)	
Total	111	51 (46%)	

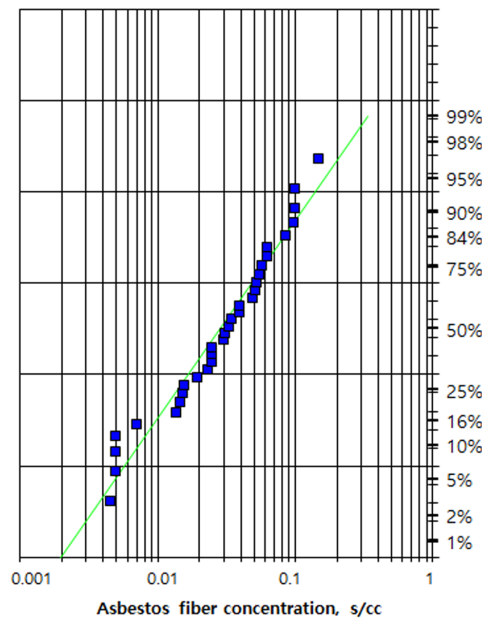


Figure 3. Distribution of airborne asbestos fiber concentrations measured by TEM

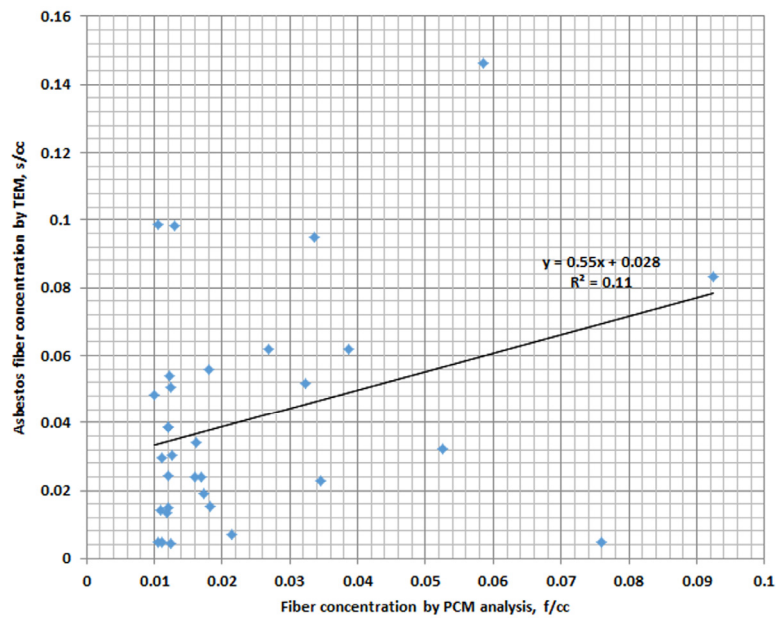


Figure 4. Linear regression of the paired PCM and TEM data

그룹 간에는 유의한 차이가 있었다(Table 5, $p < 0.05$). Shapiro-Wilks test를 통하여 공기 중 석면농도의 분포상태를 검정한 결과 대수정규분포(log-normal distribution)를 보였다(Figure 3).

2) 위상차현미경에 의한 총 섬유농도와 전자현미경에 의한 석면농도의 상관관계

PCM으로 측정한 총 섬유농도와 TEM으로 측정한 석면농도의 상관관계를 검정한 결과 Figure 4에서 보는 바와 같이 유의한 상관관계는 없었다($p > 0.05$).

IV. 고 찰

석면제거작업 전·중·후에 채취한 시료를 PCM으로 측정한 결과 시료의 4%에서 공기 중 섬유농도가 기준을 초과하였다. 작업 전과 후에는 작업장 내부에서 측정하였고 작업 중에는 작업장 외부 주변에서 측정하였다. 작업 전 측정에서 4.7%의 시료가 기준을 초과했다는 사실은 특이하다. 원인으로서는 세 가지 경우를 추정할 수 있다. 첫째, 평상시에 석면함유 건축자재를 무방비상태로 취급하거나, 둘째, 건축물에 사용된 석면함유물질이 노후하여 섬유가 공기 중으로 비산하거나, 셋째, 석면제거업체가 측정기관에 알리지 않고 야간작업을 수행한 후 측정기관에 측정을 의뢰했을 경우이다. 이 연구에서는 셋째 요인이 대부분일 것으로 추정된다. 이유는 대부분의 석면제거업체가 작업 기간을 단축하려고 무리하게 작업을 수행하기 때문이다.

작업 후의 측정은 석면제거작업을 완료하고 청소를 마친 후 건물에 사람이 들어가기 전에 시행하는 측정이며, 이 연구에서는 기준치 이상인 시료가 3.2%였다. 기준치를 초과한 경우는 작업이 완료되었다고 인정받을 수 없으므로 기준치를 초과하는 시료가 나타나지 않을 때까지 청소와 측정을 반복해야 한다.

석면제거작업을 수행할 때 작업장 주변 외부에서 채취한 시료 662개 중 27개(4.1%)에서 기준을 초과하였다. 즉 섬유가 외부로 누출되었으며 석면 제거 작업장 주변에 거주하는 사람이나 작업장 근처를 지나가던 일반 대중이 석면에 노출될 위험이 있었다. 석면이 누출된 것은 석면 제거 업체가 작업을 규정대로 수행하지 않았기 때문이다. 이 조사에서 음압기를 전혀 가동하지 않은 작업장이 47%였고 간헐적으로 가동한 작업장이 25%, 그리고 전 과정에서 가동한 작업장은 28%에 불과하였

다. Lee et al.(2014)은 서울시내 37개 석면 제거 사업장 주변에서 288개 시료를 채취하여 PCM으로 분석한 결과 대부분의 공기 중 섬유 농도가 석면배출허용기준 0.01 f/cc이하로 나타나 서울시내 건축물에서 석면을 제거하는 작업장에서는 석면 노출 가능성은 우려할 수준이 아닌 것으로 판단된다고 발표하였다.

PCM으로는 석면포함 여부를 구별할 수 없으므로 111개 시료에 대하여 TEM Lab에 의뢰하여 전자현미경으로 석면섬유를 확인 분석하였다. 111개 시료에 대한 PCM 분석결과를 보면 허용기준 이상인 시료가 50개였고, 허용기준 미만인 시료가 61개였다. 허용기준 이상인 시료 50개 중 35개(70%)에서 석면이 검출되었고 허용기준 미만인 시료 61개에서는 16개(26%)에서 석면이 검출되었다. 여기서 주의해야 할 점은 PCM 결과가 허용기준 미만인 시료에서도 석면이 검출되었다는 사실이다. 그러므로 석면 제거 작업장 주변의 공기 중 섬유 농도가 0.01 f/cc미만인 경우에도 안전하다고 판단할 수 없다. 그리고 PCM 결과와 TEM 결과 간에는 유의한 상관관계가 없었다. 이는 PCM과 TEM의 분석대상 섬유(각각 길이 5.0 μm 및 0.5 μm 이상)와 확대 비율(각각 450X와 18,000X)등이 크게 다르기 때문이다. 그러므로 공기 중 섬유 농도가 허용기준을 초과하는지의 여부와 관계없이 작업 중의 외부 공기와 작업 후의 작업장 내부에 대해서는 전자현미경법을 적용하는 것이 적절하다고 판단된다. 미국 EPA에서는 Asbestos NESHAP(National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants)에 의하여 석면제거작업의 규모가 넓이 15 m^2 (또는 길이 80 m)를 초과하는 경우 작업 후 측정에 있어서 반드시 TEM을 사용하도록 규정하고 있다(U.S. EPA, 1984; U.S. EPA, 1986a).

V. 결 론

전국의 석면 제거 작업장 155개를 대상으로 1,295개 시료를 채취하여 PCM으로 총 섬유농도를 측정하고, 111개 시료에 대하여 TEM으로 석면농도를 측정하였다. 석면제거작업을 시행하는 동안 작업장 주변 외부 공기에서 총 섬유 농도를 측정한 결과 환경부의 배출허용기준 0.01 f/cc이상인 시료가 4.1%였다. PCM으로는 석면을 구별할 수 없으므로 TEM으로 2차 검사를 시행한 결과 총 섬유 농도가 허용기준이상인 시료에서는 70%, 총 섬유가 허용기준 미만인 시료에서는 26%에서

석면이 검출되었다. 즉 총 섬유 농도가 허용기준 미만인 시료에서도 석면이 검출되었다. 전자현미경으로 측정된 공기 중 석면농도와 위상차현미경을 이용하여 측정된 공기 중 섬유 농도 간에는 유의한 상관관계가 없었다. 작업을 시작하기 전과 작업을 마치고 청소를 한 후에도 작업장 내부에서 기준을 초과하는 시료가 각각 4.7%와 3.2%로 나타났다. 이는 석면제거작업이 정상적으로 이루어지지 않고 있다는 증거이다.

감사의 글

이 연구는 환경부 국립환경과학원의 지원으로 이루어졌습니다. 감사합니다.

References

- American Industrial Hygiene Association(AIHA). Industrial hygiene statistics. EXPASSVG-IHSTATmacrofree.; 2020 <https://www.aiha.org/public-resources/consumer-resources/topics-of-interest/ih-apps-tools>
- Lee J, Lee S, Kim J, Kim J, Chung S et al. A study on characteristics of airborne asbestos concentrations at demolition sites and surrounding areas of asbestos containing buildings in Seoul. J Kor Soc Environ Eng 2014;36(6):434-441 <http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2014.36.6.434>
- Ministry of Environment(MoE). Asbestos Safety Management Act.; 2011 https://elaw.klri.re.kr/kor_mobile/viewer.do?hseq=46231&type=part&key=39
- MoE. Permissible emission standards for asbestos around business sites(Enforcement Decree of the Asbestos Safety Management Act, Article 38).; 2016
- Ministry of Employment and Labor(MoEL). Occupational Safety and Health Act, Articles 119-124.; 2020a https://elaw.klri.re.kr/eng_service/lawView.do?hseq=43289&lang=ENG
- MoEL. Asbestos concentration standard after completion of asbestos dismantling and removal work (Enforcement Rules of the Occupational Safety and Health Act, Article 182).; 2020b
- Mossman BT, Bignon J, Corn M, Seaton A, Gee BL. Asbestos: Scientific developments and implications for public policy. Science 1990;247(4940):294-301. <https://science.sciencemag.org/content/247/4940/294>
- Mulhausen J, Damiano J. A Strategy for assessing and managing occupational exposures. 2nd ed. AIHA Press.;1998. p. 245-250
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Asbestos and other fibers by PCM 7400 (NIOSH Manual of Analytical Methods, Fourth Edition).; 1994 <https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/7400.pdf>
- Paik NW, Walcott RJ, Brogan PA. Worker exposure to asbestos during removal of sprayed material and renovation activity in buildings containing sprayed material. Am Ind Hyg Assoc J. 1983;44(6):428-32. <https://doi.org/10.1080/15298668391405085>
- U.S. Environmental Protection agency (U.S. EPA). 40 CFR 61. National standards for hazardous air pollutants. Asbestos. Fed. Reg. 38(66).; 1973.
- U.S. EPA. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants; Amendments to Asbestos Standard (40 CFR Part 61).; 1984. p.13658
- U.S. EPA. TSCA Subchapter II: Asbestos hazard emergency response act (15 U.S.C. § 2641-2656).; 1986a <https://www.epa.gov/asbestos/asbestos-laws-and-regulations#ahera>
- U.S. EPA. Asbestos-containing materials in schools: Interim transmission electron microscopy analytical methods(40 CFR Part 763, Subpart E, Appendix A).; 1986b. p.761. 10.1080/15298668391405085

<저자정보>

백남원(명예교수), 이승철(교육센터장), 변재철(강사), 이동희(팀장)