

PCM과 TEM을 이용한 서울지역 일부 공공 건축물의 실내공기 중 석면농도 조사

An Investigation on the Airborne Asbestos Concentrations using PCM and TEM in the Public Buildings in Seoul

정숙녀* · 남은정 · 황순용 · 오석률 · 신진호 · 엄석원 · 채영주

Sook-Nye Chung · Eun-Jung Nam · Soon-Yong Hwang · Seok-Ryul Oh · Jin-Ho Shin ·
Seok Won Eom · Young-Zoo Chae

서울특별시 보건환경연구원

Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment

ABSTRACT

Objectives: This investigation is purposed to evaluate the airborne asbestos concentrations in the public buildings having asbestos containing materials(ACMs) in Seoul.

Methods: The Seoul Metropolitan Government carried out an asbestos survey to the city-owned public buildings to identify the level of risk exposure, classified into low, moderate and high risk. To evaluate the airborne concentration of asbestos, 11 sampling sites in ten buildings based on the survey were selected. The air samples from the eleven sites were analyzed by Phase Contrast Microscopy(PCM) and Transmission Electron Microscopy (TEM), and compared the analytical results from the both.

Results:

1. The airborne fiber concentrations by PCM were less than the detection limit(7 f/mm^2) in 9(82%) out of 11 sampling sites. The highest concentration was 0.0043 f/cc, but it was below the guideline value for indoor air quality(0.01 f/cc), proposed by the Ministry of Environment, Korea.
2. In two sampling sites, having moderate risk level, the chrysotile was identified and showed it's concentrations of 0.0102 s/cc and 0.0058 s/cc, less than $5 \mu\text{m}$ lengths.
3. The ACMs identified in the two sampling sites were a packing material(65% of chrysotile) in mechanical area and a thermal system insulation(5% of chrysotile) in a boiler room. Having more possibility of asbestos emission in the mechanical area, it would be required to set up and carry out the asbestos management plan.

Conclusions: Based on the result of this study, the airborne asbestos concentrations in the public buildings with ACMs were generally lower than the guideline value for indoor air quality. There are widespread concerns about the possible health risk resulting from the presence of airborne asbestos fibers in the public buildings. Most of the previous studies about airborne asbestos analysis in Korea were performed based on PCM method that asbestos and non-asbestos fibers are counted together. In the public and commercial buildings, having ACMs, it is suggested that the asbestos be analyzed by TEM method to identify asbestos due to concerns about asbestos exposure to workers and unspecified people.

Key words : airborne asbestos, public building, Transmission Electron Microscope, chrysotile

I. 서 론

석면은 자연적으로 생성된 섬유상 형태의 규산염 광물로서, 일반적으로 '석면'이라고 하면 상업적으로 널리 사용된 백석면, 청석면, 갈석면, 안소필라이트석면, 트레모라이트석면, 악티노라이트석면의 여섯 종의 광물을

지칭한다(권지운, 2009). 석면은 불에 잘 타지 않고 부식과 마찰에 강하며 방음·단열 효과가 뛰어난 물성을 가지고 있어서, 전기 절연재, 방직재, 건축자재 등 다양한 제품으로 전 세계적으로 광범위하게 사용되었다(김현욱, 1995). 우리나라의 석면사용량은 산업의 발달과 더불어 꾸준히 증가하였고, 1976년부터 1995년까지 석면 수입량은 연간 평균 6만 4천 톤에 이르렀다. 수입된 석면은 대부분 건축 자재로 사용되었다. 1970년대에는 약 96%가 슬레이트에 사용되었고, 1990년대에는 약 82%가 슬레이트와 보온단열제인 건축내장재, 천장판, 석면판 등에 사용된 것으로 보고되었다(최정근 등, 1998).

*Corresponding author: Sook-Nye Chung
경기도 과천시 주암동 용머리2길 18(주암동)
Tel: 02-570-3172, Fax: 02-570-3177
E-mail: sugene@seoul.go.kr
Received: 2011. 4. 7, Revised: 2011. 7. 5.
Accepted: 2011. 8. 28.

석면은 국제암연구소(IARC)에서 인체발암성이 있는 Group 1으로 지정한 물질로, 폐암, 석면폐증, 중피종 등의 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다. 석면의 이러한 유해성이 알려지면서 우리나라는 1990년 산업안전보건법 시행령을 개정하여 사용허가 대상 유해물질에 석면을 추가한 것을 시작으로 점진적으로 석면에 대한 규제를 강화시켜 2009년에는 모든 석면함유제품의 제조, 수입 또는 사용을 금지시켰다. 그러나 그 이전에 지어진 공공 건물, 학교, 다중이용시설 등의 건물에는 석면이 함유된 건축자재들이 광범위하게 사용되었고, 노후된 건축물에 함유된 석면이 공기 중으로 비산되어 건물 이용자에게 건강상 위해를 미칠 가능성에 대한 우려가 높아지고 있다. 우리나라는 실내공기 중 석면관리를 위해 다중이용시설 등의 실내공기질, 단열재로 석면을 사용한 학교의 교사 안에서의 공기질, 석면이 포함된 설비 또는 건축물의 해체·보수 후 입주 전 사무실 공기질의 석면 허용농도 기준을 0.01 f/cc로 설정해놓고 있다.

미국에서는 1970년대 후반부터 건물에 사용된 석면에 대한 관심이 증가하기 시작했고, 석면함유물질로부터 석면이 비산되어 건물이용자나 시설관리자에게 석면관련 질환을 유발할 정도로 실내공기 중 석면 농도를 증가시킬 것이라는 우려가 있었고 이에 대한 논란이 많았다. 이 문제를 평가하기 위해 석면함유물질이 사용된 건물의 공기 중 석면농도를 측정하는 연구가 수행되었고, 연구결과 석면함유물질이 사용된 건물의 실내공기 중 석면농도는 외부공기와 크게 다르지 않은 수준으로 건강상 위해를 우려할 정도는 아닌 것으로 보고하였다(Crump와 Farrar, 1989; Lee와 Van Orden, 2008).

공기 중 석면농도 측정에는 주로 위상차현미경법과 투과전자현미경법이 이용된다. 위상차현미경법은 입자의 형태만을 관찰하여 섬유상 입자를 계수하는 방법으로, 분석결과에 석면섬유와 비석면 섬유상입자가 모두 포함된다. 이에 비해, 투과전자현미경법은 입자의 형태, 화학 조성, 결정구조를 확인하여 석면인지 아닌지 판단할 수 있고, 위상차현미경법으로 관찰할 수 없는 지름 0.25 μm 이하의 가는 석면섬유도 관찰할 수 있다. 그러므로 비석면섬유상 물질이 많이 함유된 공공건축물, 학교, 지하역사 등의 실내공기 중 석면농도나 일반대기 중 석면농도에 대한 정확한 실태조사를 위해서는 투과전자현미경법을 이용한 분석이 필요하다.

서울시에서 석면함유 건축물을 체계적으로 관리하기 위하여, 시소유의 공공건축물에 대한 석면사용 실태조사를 실시하여 건축자재 및 설비의 석면함유 여부에 대한 현황을 파악하고 건물별 석면지도를 작성하였다(서울특별시, 2010). 본 연구에서는 실태조사 결과, 석면함유자재 위험등급 중위험과 저위험이지만 심한 손상상태에 해당하는 건물의 실내공기를 포집하여 위상차현미경과 투과전자현미경으로 분석하였다. 이를 통해 석면에 대한 노출위험성이 있을 것으로 예상되는 건물에 대한 실내공기 중 석면농도의 실태를 파악하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 대상

대상 건물은 서울시에서 건물에 사용된 석면함유 의 심물질에 대한 시료채취 및 석면분석을 통해 석면사용 실태를 조사한 시소유의 공공 건축물 중에서 선정하였다. 건축물의 석면노출 위험수준을 평가하기 위해 석면의 현재 상태와 잠재적 노출위험수준이 고려되었다. 현재 상태의 평가인자는 석면 함유량, 비산성 여부 및 손상상태이고, 잠재적 노출위험의 평가인자는 접촉가능성과 진동, 기류 등의 환경적 요인이다. 석면노출 위험수준은 현재 상태 평가점수(1~8)와 잠재적 노출위험 점수(2~12)를 합산하여 15이상은 고위험(high), 10~14는 중위험(mode-rate), 9이하는 저위험(low)으로 구분하고, 손상상태는 양호, 부분손상 및 심한손상으로 구분하였다(서울특별시, 2010).

Table 1. Characteristics of asbestos containing materials in the buildings surveyed

Building number	Risk level	ACM	Asbestos type (content)
1		Asbestos cloth	Chrysotile (98%)
2		Ceilingboard	Chrysotile (6%)
3	moderate	Asbestos packing	Chrysotile (65%)
4		Boiler insulation	Chrysotile (5%)
5		Ceilingboard	Chrysotile (6%) Amosite (3%)
6		Wallboard	Chrysotile (12%)
7		Floor tile	Chrysotile (12%)
8	low	Baumlite	Chrysotile (12%)
9-1		Baumlite	Chrysotile (3%)
9-2		Ceilingboard	Chrysotile (6%)
10		Ceilingboard	Chrysotile (5%)

Reference: asbestos management information system of Seoul Metropolitan Government, DB information on city-owned public buildings

총 152개의 공공건축물 석면사용 실태조사 결과, 5개 건물의 6지점이 중위험에 해당하고 나머지는 저위험에 해당하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 석면으로부터 노출 가능성이 있는 건물에 대하여 실내공기 중 석면농도를 조사해보기 위해 10개 건물에서 11개 지점을 선정하였다. 대상 건물은 석면함유자재 위험등급 중위험 5개 건물(비석면자재로 교체된 1지점을 제외한 5지점)과 저위험이나 심한 손상상태인 5개 건물(6지점)이다. Table 1은 대상건물의 석면사용 현황을 나타낸다. 석면함유 자재는 천장재(6지점), 바닥재(1지점), 벽재(1지점), 보일러 단열재(1지점), 그 외 기타물질(석면포, 석면패킹)(2지점)에 사용되었다. 백석면(chrysotile)과 갈석면(amosite)이 같이 사용된 지점이 1지점이고, 나머지는 모두 백석면이 사용되었다. 석면포와 석면패킹에 각각 98%, 65%의 다량의 석면이 함유되어 있고, 나머지 자재의 석면함유량은 3~12% 정도로 조사되었다.

2. 시료채취

2010년 7월 15일부터 8월 23일까지 공기 중 시료를 채취하였고, 시료채취대상 11개 지점 중 7개 지점은 기계실, 창고 등 유지관리 관계자 외에는 출입이 제한된 곳이었다. 본 연구의 시료 채취와 분석은 the National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH) Method 7400 (NIOSH, 1994)과 the Asbestos Hazard Emergency Response Act (AHERA)(USEPA, 1987)를 따랐다. 위상차현미경 분석용 시료는 직경 25 mm, pore size 0.8 μm MCE(mixed cellulose ester) 필터가 장착된 cassette(225-321, SKC)에 시료채취 펌프(LV-40BR, SIBATA; SARA-40 00, KEMIK)를 이용하여 약 10 L/min의 유량으로 2시간 동안 1200 L를 포집하였다. 투과전자현미경 분석용 시료는 직경 25 mm, pore size 0.45 μm MCE와 5 μm MCE 백업 필터가 장착된 cassette (Z045BA, Zefon)에 약 8 L/min의 유량으로 2시간 30분 동안 1200L를 포집하였다. Figure 1은 시료채취 현장사진이다.

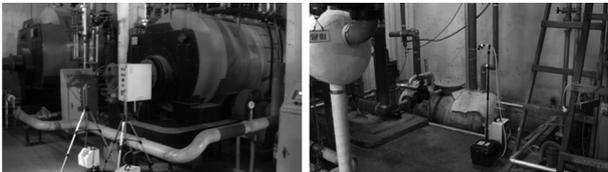


Figure 1. Field sampling for the airborne asbestos.

3. 분석방법

1) 위상차현미경 분석법(phase contrast microscopy, PCM)

필터는 사등분하여 한 조각을 슬라이드 글라스에 올려놓고, 아세톤 증기화장치를 이용하여 투명화 시킨다. 투명화된 여과지 위에 3.0~3.5 μL 의 트리아세틴을 떨어뜨리고, 커버슬립을 여과지 위에 얹는다. 커버슬립의 가장자리를 매니큐어로 칠하고 밀봉한다.

전처리한 시료는 위상차현미경(ECLIPSE 80i, Nikon)을 HSE-NPL test slide로 5 band 이상 관찰되도록 조정된 뒤, 400배의 배율에서 Walton-B graticule로 100필드를 관찰한다. NIOSH 7400의 A계수법에 따라 길이가 5 μm 보다 길고, 길이 대 지름의 비(aspect ratio)가 3:1 이상인 섬유를 계수하였다. 분석결과는 공기 중 섬유상 물질의 농도(f/cc)를 나타내고, 아래의 식으로 계산한다. 검출한계는 7 fibers/ mm^2 이다(NIOSH, 1994).

$$\text{Concentration (f/cc)} = \frac{\text{fiber count (f)} \times \text{필터의 유효면적 (mm}^2\text{)}}{\text{분석한 필드의 개수} \times \text{필드 하나의 면적 (mm}^2\text{)} \times \text{포집된 공기의 부피 (cc)}}$$

2) 투과전자현미경(Transmission electron microscopy, TEM)

필터는 DMF-acetic acid 방법을 이용하여 투명화시킨다. 깨끗한 슬라이드 글라스에 마이크로피펫을 이용하여 15~25 $\mu\text{L}/\text{cm}^2$ 의 투명화용액(35% dimethyl formamide, 15% glacial acetic acid 와 50% 증류수)을 떨어뜨리고, 그 위에 사등분한 필터 한 조각을 공기방울이 생기지 않도록 얹는다. 과잉의 투명화 용액은 필터페이퍼로 흡수시킨다. 65°C의 slide warmer에 약 10~15분 동안 올려놓으면 필터가 천천히 투명화된다. 투명화된 필터를 저온 플라즈마 회

화로(K1050X Plasma Etcher, EMITECH)를 이용하여 필터표면의 약 10%를 에칭(etching) 처리한 뒤, 카본 코터(K950X Turbo Evaporator, EMITECH)로 표면을 약 20 nm 두께의 얇은 탄소막으로 코팅한다. 페트리디쉬에 아세톤을 넣고, 폴리우레탄 스폰지를 적당한 크기로 잘라서 놓고, 그 위에 렌즈페이퍼를 얹어 Jaffe washer를 만든다. 렌즈페이퍼 위에 지름이 3 mm인 그리드를 shiny side가 위로 되도록 올려놓고, 시료 1개당 3개의 그리드를 준비한다. 탄소막으로 코팅된 시료의 가로와 세로의 길이를 약 3 mm가 되도록 잘라서 그리드 위에 놓고 뚜껑을 반쯤 닫아 약 10분 동안 둔 뒤, 아세톤을 스폰지 높이만큼 가득 부어 채운 뒤 뚜껑을 닫아 하룻밤 정도 둔다. 이 과정을 거치면 필터는 녹고, 필터표면의 석면을 포함한 무기물질이 탄소막에 부착된다.

전처리한 시료는 에너지 분산형 X선 분광기(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)가 장착된 투과전자현미경(Tecna G2, FEI company 120 kev)을 이용하여 분석하였다. 면적이 0.01098 mm^2 인 grid opening 10개를 약 18500배의 배율에서 AHERA 계수기준에 따라 분석하였다. 길이가 0.5 μm 이상이고 길이 대 지름의 비(aspect ratio)가 5:1 이상인 석면 구조(structure)를 계수하였다. 석면 구조에는 섬유(fiber) 형태의 석면입자 뿐만 아니라 3개 이상의 섬유가 서로 평행하게 배열되고 각 섬유 사이의 거리가 섬유 하나의 지름보다 짧은 형태인 다발(bundle), 모든 섬유가 무질서하게 교차되어 있으며 3개 이상의 교차점을 가지는 형태인 섬유상 집합체(cluster) 그리고 섬유의 한 쪽 끝이 입자에 부착 또는 가려져 있는 매트릭스(matrix) 형태의 석면입자도 포함된다. 석면의 종류를 구별하기 위해, 제한시야 전자회절(selective area electron diffraction, SAED) 패턴과 EDS 스펙트럼으로부터 구한 정보를 이용하였다. 분석결과는 공기 중 석면의 농도(s/cc)를 나타내고 아래의 계산식으로 계산한다.

$$\text{Concentration (s/cc)} = \frac{\text{structure count (s)} \times \text{필터의 유효면적 (mm}^2\text{)}}{\text{분석한 그리드 오프닝의 개수} \times \text{그리드 오프닝 하나의 면적 (mm}^2\text{)} \times \text{포집된 공기의 부피 (cc)}}$$

분석감도(sensitivity)는 1개의 섬유가 관찰되었을 때의 농도로, 본 연구에서는 분석감도를 0.003 s/cc로 하고, 석면섬유가 관찰되지 않은 시료는 0.003 s/cc 미만으로 표기하였다. 전처리과정 중에 시료가 오염될 가능성을 평가하기 위해, 바탕시료를 시료와 동일한 방법으로 전처리하여 분석한 결과 석면섬유가 검출되지 않아 전처리과정 중에 오염은 없었던 것으로 판단하였다(USEPA, 1987).

III. 결과 및 고찰

조사대상 건물의 실내공기를 포집하여 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. 하나의 시료는 석면함유자재 바로 근처에서 채취하고, 필요한 경우 측정지점의 입구근처에서 한 개의 시료를 추가적으로 채취하였다. 건물 2의 TEM 시료는 전처리가 제대로 되지 않아 분석에서 제외하였다. PCM 분석결과, 공기 중 섬유상 물질의 농도는 11개 지점 중 9개 지점(82%)에서 검출한계(7 fibers/ mm^2)

Table 2. Summary of results for PCM and TEM analysis

Building number	Risk level	No. samples	PCM(f/cc)**	TEM(s/cc)***	Total structure count and asbestos type
1	moderate	2	0.0021*	<0.003	
2		2	0.0007*	-	
3		2	0.0043	0.0102	7, chrysotile
4		2	0.0018*	0.0058	4, chrysotile
5		1	0.0025	<0.003	
6	low	2	0.0011*	<0.003	
7		2	0.0022*	<0.003	
8		2	0.0005*	<0.003	
9-1		1	0.0016*	<0.003	
9-2		1	0.0017*	<0.003	
10		1	0.0021*	<0.003	

* less than limit of detection (7 fibers/mm²)
 - unable to count

** The concentration(f/cc) is determined by counting only fibers with length >5 μm and length:width ≥ 3:1.

*** The concentration(s/cc) is determined by counting asbestos structures including fibers, bundles, clusters and matrices with length ≥ 0.5 μm and length:width ≥ 5:1.

이하였다. 가장 높은 농도는 0.0043 f/cc로 우리나라 실내공기 중 석면 관리를 위한 기준치(0.01 f/cc) 미만이었다. TEM 분석결과, 10개 지점 중 8개 지점(80%)에서 석면이 검출되지 않았고, 중위험 건물 2개 지점(건물3, 4)에서 백석면이 각각 0.0102 f/cc과 0.0058 f/cc의 농도로 검출되었다.

석면노출 위험수준에 따른 PCM 분석결과를 비교하기 위해 SPSS 17.0을 이용하여 독립표본 t검정을 실시하였다. 공기 중 섬유상 물질의 평균농도는 중위험 건물이 0.0023±0.0013 f/cc이고, 저위험 건물이 0.0015 ± 0.0006 f/cc로 나타났다. 석면노출 위험수준에 따른 PCM 분석결과와의 차이는 통계적으로 유의하지 않았다(t=1.237, p>.05).

석면의 발암 위험성과 관련하여, 전문가그룹은 동물 실험, 역학조사, 생체외연구 등으로부터 밝혀진 연구결과를 바탕으로 길이 5 μm 보다 짧은 석면은 인간에게 암을 거의 유발하지 않고, 폐섬유증 등 암 이외의 다른 질병을 유발할 가능성에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다고 결론지었다(ERG, 2003). 우리나라 실내공기 중 석면관리를 위한 규제는 PCM 동등 석면섬유(PCM-equivalent asbestos fiber)를 기준으로 하고 있는데, PCM 동등 석면섬유란 PCM으로 분석할 때 사용하는 섬유크기에 대한 규정(길이 > 5 μm, 지름 0.25~3.0 μm, 길이:지름 ≥ 3:1)을 만족시키는 석면섬유를 가리킨다. 본 조사에서 발견된 석면은 모두 길이 5 μm 이하로 PCM 동등 석면섬유는 검출되지 않아서 조사대상 건물의 실내공기 중 석면농도는 규제기준(0.01 f/cc) 이하이다.

천장텍스, 바닥재 등 건축자재로 사용된 곳(8지점)에서 공기 중 석면이 전혀 검출되지 않았고, 보일러 연결부위에 사용된 석면패킹과 보일러를 싸고 있는 단열재로 사용된 곳(2지점)에서 석면이 검출되었다. 건축자재의 경우 외부에서 물리적인 충격을 가하지 않고 통행 등 일상적인 활동만을 하는 경우에는 호흡을 통해 석면에 노출될 가능성은 낮을 것으로 예상된다. 그러나 기계설비로 사용된 석면패킹과 단열재의 경우 지속적으로 장비가 가

동되어 마모 등으로 인한 손상이 발생하여 석면이 비산될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 또한 검출된 석면은 상대적으로 위험성이 낮은 것으로 알려진 길이 5 μm 이하의 짧은 석면이나, 보일러실에 상주하는 관리자의 경우에는 석면에 장기간 노출되었을 가능성을 배제할 수 없다.

조사대상 일부지점의 경우, 석면실태조사 이후 폐쇄 조치되어 접근이 제한된 상태이거나 석면을 밀봉 조치한 상태여서 시료 채취시 비산가능성이 낮았을 수도 있다. 또한 지속적인 모니터링에 의한 결과가 아니고 1회 채취한 시료를 분석하여 결과를 도출한 것으로 그 지점의 대표 농도라고 하기에는 한계점이 있다.

Figure 2은 4번 건물에서 채취한 공기 중 시료를 분석하면서 발견된 백석면의 이미지, SAED 패턴 및 EDS 스펙트럼이다.

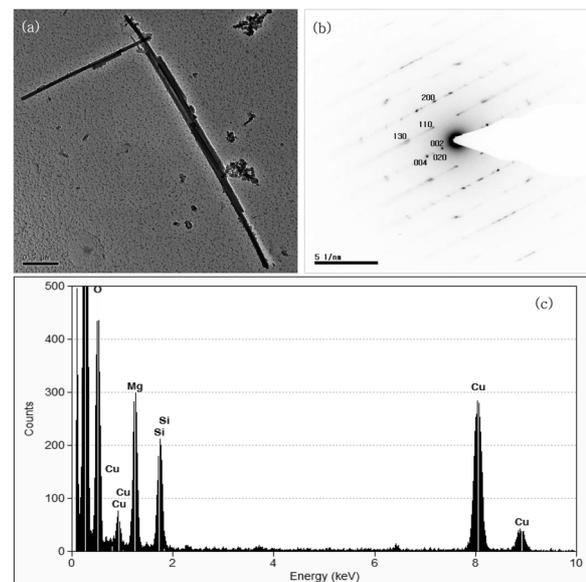


Figure 2. (a) Image, (b) selected area electron diffraction pattern with diagnostic features labelled, and (c) energy dispersive X-ray spectrometer spectrum.

Figure 2(b)는 제한시야 조리개를 이용하여 선택한 특정 영역에 대한 전자회절이미지로, 입사전자빔과 시편의 원자와의 간섭작용으로 회절점이 형성된다. 각각의 회절점은 특정 결정면에 대한 결정학적인 정보를 가지고 있으므로 이를 분석하여 시료의 결정구조를 알 수 있다. 이를 회절점을 indexing 한다고 하는데, 우선 시료를 투과한 전자들이 모인 투과점과 회절된 전자들이 모인 회절점 사이의 거리로부터 결정면의 면간거리(d-spacing)를 측정한다. 측정된 값을 물질의 회절 데이터를 수집하여 분류해 놓은 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards)에 주어진 백석면에 대한 데이터와 비교하여 회절점의 회절면을 알아낼 수 있다. 백석면의 회절패턴에는 Figure 2(b)에 표기한 6개의 회절점이 있고, d-spacing이 5.3 Å인 선이 반복적으로 나타나며 (110)과 (130)에 특징적인 streak이 존재한다. Figure 2(b)에는 백석면 회절패턴의 특징이 잘 나타나있다. 백석면의 6개 회절점의 결정면에 대한 면간거리의 예를 Table 3에 나타내었다.

Table 3. An example of d-spacings of chrysotile

Miller indices of plane	d-spacing (Å)
002	7.258*
004	3.619*
110	4.580**
020	4.488*
200	2.660**
130	2.660***

* JCPDS sample 31-808

** JCPDS sample 22-1162

*** JCPDS sample 25-0645

백석면의 화학조성은 일반적으로 $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ 로 나타내어지고, Al, Fe 등의 미량 미네랄이 함유될 수 있다. Figure 2(c)는 입사된 전자가 시료와 상호작용 후 발생되는 X-ray 에너지의 크기와 세기를 분석하여 화학조성을 분석한 것이다. 마그네슘과 규소가 주요 성분으로 약 6:4의 비율로 존재하는데, 이는 실험실에서 보유하고 있는 백석면 표준시료(asbestos reference set, HSL 037)의 분석결과와 그 함량이 유사하다.

Lee와 Van Orden(2008)의 연구에 따르면, 미국 전역의 석면함유물질이 사용된 752개 건물에서 3978개의 실내

공기 중 석면농도를 조사한 결과, 대상 건물의 27%에서 석면이 검출되지 않았으며, 90%의 건물에서 PCM에서 계수되는 크기(길이 $\geq 5 \mu m$, 지름 $\geq 0.25 \mu m$)의 석면섬유가 검출되지 않았다. AHERA 규정(길이 $\geq 0.5 \mu m$, 길이:지름 $\geq 5:1$)에 따라 계수하였을 때 전체건물의 평균 석면농도는 0.00641 s/cc이고, PCM에서 계수되는 크기의(길이 $\geq 5 \mu m$, 지름 $\geq 0.25 \mu m$) 석면섬유의 평균농도는 0.00008f/cc이었다. PCM에서 계수되는 크기의 석면섬유에 대하여, 건물 중에서 가장 높은 건물의 평균농도는 0.00298 f/cc이고, 시료 중 가장 높은 농도는 0.00639 f/cc로 조사되었다. 조사결과를 바탕으로 미국 EPA의 IRIS 모델과 Berman-Crump 모델을 적용하여 위해도 평가를 실시한 결과, 위해도는 각각 백만 명당 1.1~2.1명과 백만 명당 2.34~3.3명 정도의 수준인 것으로 나타났다. 이를 통해, 석면함유물질이 사용된 건물의 실내공기 중 석면농도는 규제치에 도달할 정도로 높지 않고, 건물이용자들에게 건강상의 중대한 위해를 증가시키지 않는 것으로 결론지었다.

Crump와 Farrar(1989)는 49개 정부 소유 건물의 공기 중 석면농도를 연구한 미국 EPA(1988)의 조사결과를 통계적으로 분석하였다. AHERA 규정에 따라 계수하였을 때 전체건물의 실내공기 중 평균 석면농도는 0.00073 s/cc이었고, 49개 건물 가운데 14개 건물(29%)에서 석면이 전혀 검출되지 않았다. 길이 5 μm 이상인 석면섬유에 대하여 외부공기의 평균농도는 0.00010 f/cc이고, 실내공기의 평균농도는 0.00007 f/cc로 조사되었으며, 실내와 실외의 공기 중 석면농도는 통계적으로 중요한 차이가 없는 것으로 나타났다. 49개 건물을 석면함유물질의 함유여부와 관리 상태에 따라 3개의 그룹(석면함유물질이 사용되지 않은 6개 건물, 석면함유물질의 상태가 양호한 6개 건물, 석면함유물질이 손상된 상태인 37개 건물)으로 나누고, 그룹별 실내공기 중 석면농도의 차이를 비교하였으나 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

Table 4은 미국, 영국 등에서 실내공기 중 석면농도를 투과전자현미경을 이용하여 조사한 자료 가운데 학교, 상업건물 등을 제외한 병원, 도서관, 정부건물 등 석면함유물질이 사용된 공공건물의 자료를 정리하여 본 연구결과와 비교한 것이다(Chesson 등, 1990; Lee와 Van Orden,

Table 4. Summary of airborne asbestos concentration reported in various public buildings based on building average

Reference	Year	No. buildings	Concentration (s/cc)	
			Mean	Maximum
This study*	2010	9	0.0018	0.0102
RJ Lee and Van Orden DR*	2008	114	0.0013	0.0121
US EPA*	1988	43	0.0007	0.0031
Chatfield**	1986	3	0.0087	0.0122
Burdett and Jeffrey**, ***	1986	35	0.0043	0.0130
Pinchin**	1982	13	0.0245	0.2020

* Asbestos bundles, clusters and matrices included in the structure count

** Only structures satisfying the definition of "fiber" included in the structure count.

Fibers that are present in clusters were counted as individual fibers.

*** Results below the detection limit were replaced by half the detection limit.

2008). 계수방법에 약간의 차이가 있기는 하지만, 위의 결과는 길이 0.5 μm 이상이고 길이 대 지름의 비가 5:1 이상인 석면을 계수하여 얻은 것이다. 대부분 평균 농도는 0.01 s/cc 이하이고, 가장 높은 건물의 평균 농도는 Pinchin에 의해 조사된 0.20 s/cc이나, 길이 5 μm 보다 긴 석면만 계수하였을 때 가장 높은 농도는 0.001 s/cc로 나타났다. 계수방법에 차이가 있긴 하지만, 이는 실내공기 중 석면관리를 위한 규제기준(0.01 f/cc) 보다 낮은 수준으로 석면 함유 건축자재가 사용된 건물의 실내공기 중 석면의 농도는 일반적으로 낮은 것으로 나타났다. 본 연구결과는 미국 EPA와 Lee와 Van Orden의 결과보다 높게 나타났지만, 이들 연구가 건물의 평균 공기 중 석면농도를 조사하기 위해 석면이 함유된 지점과 석면이 함유되어 있지 않은 지점의 결과를 평균한 값을 고려하면 석면이 함유된 지점에서만 조사한 이번 연구결과는 매우 낮은 수준으로 석면 함유물질이 사용된 건물에서 호흡을 통한 석면노출 가능성은 우려할 수준이 아닌 것으로 판단된다.

Ganor 등(1992)은 석면함유 절연재가 도포된 천장재의 손상에 의해 건물 내 공기 중 평균 석면농도가 4 f/cc로 나타났음을 보고하였다. 이 농도는 노출된 사람에게 석면관련 질병을 유발할 정도의 위험을 가질 수 있는 수준이다. 비록 이전의 조사에서 공공건물의 실내공기 중 석면농도는 일반적으로 낮은 것으로 조사되었지만, Ganor 등(1992)의 연구에서처럼 석면함유물질이 특이하게 심하게 손상된 경우에는 공기 중 석면농도가 높아질 수도 있다.

서울시소유 공공건축물에 대한 석면사용 실태조사 결과 노출위험성이 높은 것으로 조사된 지점 대부분은 석면 함유 건축자재 및 설비를 무석면제품으로 교체하거나 밀봉하는 등의 조치를 취하였다. 이처럼 석면함유물질을 해체·제거하는 경우 실내공기 중으로 석면입자가 비산되지 않도록 작업공간을 밀폐하거나 격리하는 등 철저한 관리가 필요하다.

결론

서울지역의 공공건축물에 대한 석면사용 실태조사 결과, 건물 내의 석면함유물질에 대한 노출위험등급이 저위험, 중위험, 고위험으로 구분되었다. 이를 바탕으로 10개 건물의 11개 지점을 선정하였고, 2010년 7월 15일부터 8월 23일까지 공기 중 석면을 포집하여 위상차현미경과 투과전자현미경으로 분석한 결과는 다음과 같다.

1. PCM 분석결과, 공기 중 섬유상입자의 농도는 11개 지점 중 9개 지점(82%)에서 검출한계(7 fibers/mm²) 이하였다. 가장 높은 농도가 0.0043 f/cc로 우리나라 실내공기 중 석면 관리를 위한 법적기준치인 0.01 f/cc 미만으로 호흡을 통한 석면 노출가능성은 우려할 수준이 아닌 것으로 조사되었다.

2. TEM 분석결과 10개 지점 중 8개 지점(80%)에서 석면이 검출되지 않았다. 그러나 중위험 건물 2개 지점에서 규제대상인 길이 5 μm 보다 긴 섬유는 검출되지 않았으나,

길이 5 μm 이하의 백석면이 각각 0.0102 s/cc과 0.0058 s/cc의 농도로 검출되었다.

3. 공기 중 석면이 검출된 지점은 보일러의 패키징과 단열재로 석면이 사용된 곳으로, 석면함유량 65%의 패키징이 사용된 곳에서 석면함유량 5% 단열재가 사용된 곳보다 공기 중 석면농도가 높게 나타났다. 지속적으로 기계가 가동되는 기계실은 석면함유물질의 마모로 인한 손상이 발생하여 석면에 노출될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러므로 기계설비로 사용된 경우 무석면소재로의 교체 등의 조치가 우선적으로 이뤄져야 할 것이다.

최근 석면과 관련된 사건들이 언론매체를 통해 보도되면서 일상생활 중 석면노출로 인한 건강피해에 대한 우려가 높아지고 있다. 이러한 막연한 불안감을 줄이고 보다 정확한 정보를 제공하기 위해서, 실제 측정 자료를 이용한 과학적 분석이 필요하다. 우리나라에서 기존에 수행된 공기 중 석면에 관한 조사 및 연구는 위상차현미경법으로 분석한 결과를 바탕으로 한 것이 대부분이다. 위상차현미경 분석결과는 석면뿐만 아니라 다른 섬유상 물질을 포함하므로 실제 석면농도보다 과대평가 될 수 있다. 그러므로 위상차현미경을 이용한 분석과 더불어 석면에 대한 정확한 정성분석이 가능한 투과전자현미경을 이용하여 많은 사람들이 이용하는 공공건축물의 실내공기 중 석면농도나 일반대기 중 석면농도에 관련된 연구를 수행하여 전반적인 실태조사를 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 권지은. 편광현미경을 이용한 고형시료 중 석면분석. 한국 산업안전보건공단 산업안전보건연구원; 2009;1-2
- 김현욱. 대형건물내 비고형 석면함유 건축자재에 의한 기중 석면오염 및 관리실태. 한국산업위생학회지 1995;5(2): 137-146
- 서울특별시. 시 소유 공공건축물 석면사용 실태조사 및 석면지도 작성보고서. 서울특별시 맑은환경본부 클린도시담당관; 2010;1-82
- 서울특별시 석면관리정보시스템. 공공건축물석면정보. 시 공공건축물 DB정보. URL:http://asbestos.seoul.go.kr/
- 최정근, 백도명, 백남원. 우리나라의 석면 생산과 사용 및 근로자 수와 노출농도의 변화. 한국산업위생학회지 1998;8(2):242-253
- Burdett GJ, Jaffrey SA. Airborne asbestos concentrations in buildings 1986;30(2):185-199
- Chesson J, Hatfield J, Schultz B, Dutrow E, Blake J. Airborne asbestos in public buildings. Environmental Research 1990;51(1):100-107
- Crump KS, Farrar DB. Statistical analysis of data on airborne asbestos levels collected in an EPA survey of public buildings. Regulatory Toxicology and Pharmacology 1989;10(1):51-62
- Eastern Research Group, Inc. Report on the Expert Panel on Health Effects of Asbestos and Synthetic Vitreous Fibers: The Influence of Fiber Length, Prepared for Agency for Toxic Substances and Disease Registry Division of Health Assessment and Consultation; 2003;5-7
- Ganor E, Fischbein A, Brenner S, Fromm P. Extreme air-

- borne asbestos concentrations in a public building. *British Journal of Industrial Medicine* 1992;49(7):486-488
- Lee RJ, Van Orden DR. Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 2008;50(2):218-225
- NIOSH. Asbestos and other fibers by PCM No. 7400. 4th ed. NIOSH; 1994;1-7
- U.S. Environmental Pollution Agency. Assessing Asbestos in Public Buildings EPA 560/5-88-002. U.S. Environmental Protection Agency; 1986
- U.S. Environmental Pollution Agency. Asbestos Hazard Emergency Response Act 40 CFR Part 763 Appendix A to Subpart E. U.S. Environmental Protection Agency; 1987;781-815