

## 서울시내 초등학교 건축물의 석면 실태조사 및 건강 위해도 평가

석면조사팀

신진호 · 오석률 · 황순용 · 정숙녀 · 김지희 · 남은정 · 이진호 · 최희진 · 엄석원 · 채영주

### **The Asbestos Containing Material Experimental Survey and Health Risk Assessment in Primary School Buildings, Seoul**

*Asbestos Research Team*

**Jin-ho Shin, Seok-ryul Oh, Soon-yong Hwang, Sook-nye Chung,  
Ji-hui Kim, Eun-jung Nam, Jin-hyo Lee, Hee-jin Choi,  
Seok-won Eom and Young-zoo Chae**

#### **Abstract**

We chose 70 primary school buildings located in Seoul to conduct the asbestos survey and to analyze health risks. We used PCM to detect asbestos in air samples and TEM to identify asbestos and calculate health risk index. Among the 70 schools there were 65 where asbestos was detected. The sample number for the whole experiment was 140, and 120 tested positive for asbestos. (detection rate : 85.7%) According to the construction function be used, sites for asbestos detection in descending order of severity are: classroom>hallway>special activity room>lunchroom or parking garage. Asbestos was most detected in classroom ceiling texture. As for the risk assessment in ACM, we found that most construction materials containing asbestos are in good status with low possibility for scattering. Based on the results, operations and maintenance programs are more desirable than abatement for the asbestos. The concentrations of airborne fiber in 48 of the 140 indoor air samples exceeded 0.01 f/cc, which is the maintenance standard for indoor air quality. In analysis by TEM, only 3 of 48 samples detected asbestos at 0.003 f/cc, which is under the standard. Asbestos was not detected in the other samples. The asbestos carcinogens risk index in classrooms was calculated as  $0.422 \times 10^{-5}$ , and under  $1 \times 10^{-6}$  in hallways and other places assessed for background risk index.

**Key words** : ACM(Asbestos Containing Material), PCME(PCM equivalent), Health risk assessment

## 서 론

석면의 어원은 그리스어로 '불멸의 물건'이라는 의미로서, 화산에서 분출된 용암이 특수한 조건하에서 뜨거운 물과 작용하면 마그네슘과 규소를 포함하고 있는 광물질 결정이 섬유상으로 성장하는 것이다.(1) 석면의 종류로는 가장 널리 사용되는 백석면(Chrysotile)등의 사문석군과 청석면(Crocidolite), 갈석면(Amosite), 양기석석면(Actinolite), 투각섬석면(Tremolite), 직섬석석면(Anthophyllite) 등의 각섬석군으로 구분된다.(2)

석면은 천연 광물이면서도 불연성, 내마모성, 내산성, 내알카리성, 절연성이 뛰어나지만 아니라 값이 싸기 때문에 슬레이트, 천정재, 벽면재, 보온 단열재 등 건축용 자재의 원료로 1970년대부터 학교, 다중이용시설, 공공건축물에 다양하게 사용되었다.(3)

한편, 미국 EPA에서는 석면관리를 위한 법률로 「석면위험 긴급대응법」(AHERA, 1986)과 학교 석면조사를 규정하는 「학교석면 위해감소 재승인 법안」(Asbestos School Hazard Abatement Reauthorization Act, ASHARA)을 통하여 학교 건물내에서 석면물질의 조사와 제거, 보강공사 등 위험방지조치를 규제하고, 1988년 10월 12일까지 모든 학교에 대한 조사를 완료하였으며, 매 3년마다 건축물 석면함유여부를 재조사하도록 하고 있다.

일본의 경우에도, 문부성에서 2005년 7월부터 2006년 3월에 걸쳐 151,925개소 학교의 부유 중인 석면 등의 사용 조사실태를 전면 실시하였고, 1996년 이전에 개·보수된 건축물 중 석면이 공기 중으로 비산될 우려가 있는 958개교에 대하여 출입제한 등의 조치를 취하였으며, 1986년에는 「Asbestos Hazard Emergency Response Act」를 제정하여 모든 초·중·고등학교는 석면함유물질을 조사하고 감축을 위한 계획을 수립·시행하도록 하였다.(4)

반면에 우리나라에서도 이러한 석면 유해성 때문에 2009년 교육과학기술부에서 전국 3,158개 유치원 및 초·중·고·특수학교에 대하여 석면조사를 실시하였으나, 이는 교과부 소속 석면조사교육 이수자에 의한 육안조사였고, 1970년대부터 학교를 비롯한 많은 건축물에 석면함유 건축자재의 사용이 높았다는 점과 자재 노후화 등으로 인한

건축물 석면의 비산여부 및 석면함유 건축자재 수준 등에 대한 실태조사가 미비한 실정이다.

이에 석면함유 건축자재를 사용한 학교 건축물에서 석면사용의 정확한 실태조사와 석면의 비산으로부터 학생들을 보호하는 적절한 관리대책의 수립 및 활용방안의 설정이 매우 절실한 시점이다. 따라서 본 연구의 목적은 학교시설에서 학생들이 자주 접하는 구조물을 대상으로 건축물의 석면함유물질 분포실태를 조사하고, 비산 가능성을 파악하여 건강위해도를 사전에 예방하여, 학교 건축물 석면관리의 기반을 마련하기 위함이다.

## 시료채취 및 분석방법

### 1. 시료채취

2011년 5월 24일부터 10월 27일까지 고흥 및 공기 중 시료를 채취하였고, 시료채취대상 70개 학교에서 교실, 복도 그리고 특별실 등 140개 지점에 대하여 실시하였다.

본 연구의 채취와 분석은 The National Institute of Occupational Safety and Health Method 7400(NIOSH, 1994)과 The Asbestos Hazard Emergency Response Act(USEPA, 1987)를 따랐다. 위상차현미경 분석시료는 직경 25 mm, pore size 0.45  $\mu$ m MCE(mixed cellulose ester) 필터가 장착된 cassette(225-324, SKC)에 시료채취펌프(SARA-4000, KEMIK)를 이용하여 약 5 L/min의 유량으로 4시간 이상 1,210 L를 포집하였다.

편광현미경 분석용 시료의 채취는 채취시 시료의 손상과 공기중으로의 비산을 방지하기 위하여 표면에 흡윤재를 충분히 살포한 후에 고흥시료를 채취하였으며, 그림 1은 공기 중 시료와 고흥시료 채취 현장사진이다.

### 2. 분석방법

#### 1) 학교 건축자재에서의 석면함유 여부조사(고형 시료)

시료는 입체현미경(SZ 61, Olympus)으로 10배 내외에서 실시하고, 미세한 섬유를 자세히 관찰할



**Fig. 1.** Field sampling for the air and bulk.



경우에는 보다 높은 배율로 관찰한다. 입체현미경으로 시료 중 섬유상 물질의 존재확인 및 관찰된 섬유에 대한 함유율 결정, 그리고 편광현미경(BX 51, Olympus) 분석을 위한 표본을 제작한다.

제작한 표본은 미국 EPA에 제시된 공정시험법인 Method for the determination of asbestos in bulk building materials(EPA 600/R-93/116, 1993)와 석면조사 및 정도관리규정(노동부 고시 제2009-32호, 2009)에 따라 편광현미경(Polarized Light Microscopy, PLM)으로 형태, 색깔/다색성, 굴절률, 복굴절률, 소광각 및 소광특성 그리고 신장부호의 특성을 관찰하여 정성분석을 실시하였다. 정량분석은 시야평가법으로 실시하였고 시야평가법 결과가 불검출 또는 1% 이하인 경우에 중량법을 추가적으로 실시하였다.(5)

## 2) 공기 중 섬유상 물질의 위상차현미경 분석

필터를 4등분하여 한 조각을 슬라이드 글라스에 올려놓고, 아세톤 증기화장치를 이용 투명화 시킨다. 투명화된 여과지 위에 3.0~3.5  $\mu\text{l}$ 의 트리아세틴을 떨어뜨리고, 커버슬립을 여과지 위에 얹는다. 커버슬립의 가장자리를 메니큐어로 칠하여 밀봉한다.

전처리한 시료는 위상차현미경(ECLIPSE 80i, Nikon)을 HSE-NPL test로 5 band 이상 관찰되도록 조정된 뒤, 400배의 배율에서 Walton-B graticule로 100필드를 관찰한다. NIOSH 7400의 A계수법에 따라 길이가 5  $\mu\text{m}$ 보다 길고, 길이 대 지름의 비(aspect ratio)가 3:1 이상인 섬유를 계수

한다.

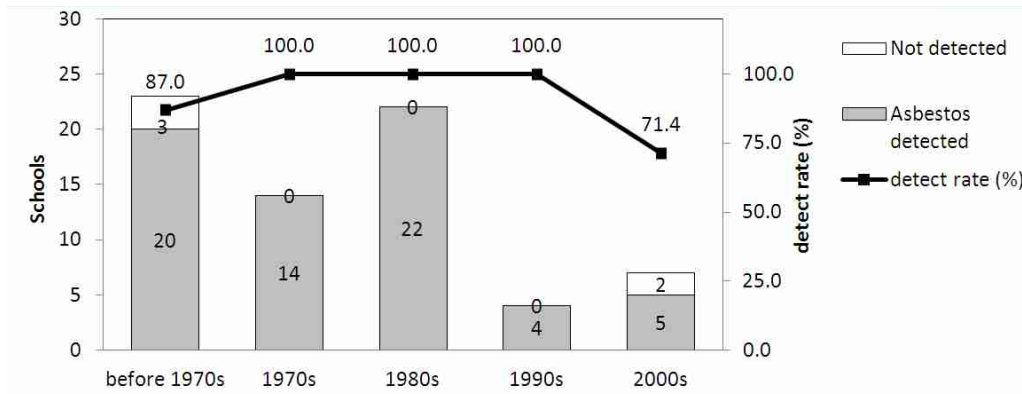
위상차현미경(Phase Contrast Microscopy, PCM)분석결과는 공기 중 섬유상 물질의 농도(fiber/cc)를 나타내며, 계수된 섬유수에 관찰한 필터의 면적과 포집된 공기의 부피를 나누고, 필터의 유효면적을 곱하여 계산하였다. 검출한계는 7 fibers/ $\text{mm}^2$ 이다.

## 3) 건강위해도 평가를 위한 공기 중 섬유상 물질의 투과전자현미경 분석

필터는 4등분하여 투명화 용액(35% dimethyl formamide, 15% glacial acetic acid와 50% 증류수)을 이용하여 투명화시킨다. 저온 플라즈마 회화로(K1050X Plasma Etcher, EMITECH)를 이용하여 필터표면의 약 10%를 에칭(etching) 처리하고 카본 코터((K950X Turbo Evaporator, EMITECH)로 표면을 얇은 탄소막으로 코팅한 뒤, acetone용액이 든 Jaffe washer를 이용하여 필터를 녹인다.

전처리한 시료는 에너지 분산형 X선 분광기(energy dispersive X-ray spectrometer, EDS)가 장착된 투과전자현미경(Tecnai G2, FEI company 120 keV)을 이용하여 ISO 10312에 따라 분석하였다. 면적이 0.0098  $\text{mm}^2$ 인 grid opening 12개를 약 5,800배에서 관찰하고, 섬유의 계수가능성 판단하기 위해서 18,500배에서 확인하였다.

길이 5  $\mu\text{m}$  이상, 직경 0.2~3.0  $\mu\text{m}$ 이며, 길이 대 지름의 비(aspect ratio)가 3:1 이상인 PCM 동



**Fig. 2.** Detection status of asbestos in primary school by the building completion year.

등 석면섬유를 계수하였다. 분석감도는 0.003 f/cc 이고, 석면섬유의 농도(f/cc)는 계수된 섬유수에 분석 감도를 곱하여 계산하였다.(6)

23개교, 1970년대 14개교, 1980년대 22개교, 1990년대 4개교, 2000년대 7개교로 총 70개교를 대상으로 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 초등학교 건축자재의 석면함유물질 사용 실태 조사

서울시내 초등학교 중 각 구별로 병설 유치원을 운영하는 2~4개교를 선정하였으며, 최초 건축년 대별 학교분포는 1970년대 이전에 설립된 학교가

학교시설 사용용도별로 석면이 함유된 건축자재를 많이 사용한 순서는 교실 > 복도 > 특별실 > 식당/주차장이며, 특히 교실의 천장텍스 시료 53개 중 50개에 백석면(2~5%)이나 백석면과 갈석면이 혼합 사용(1~6%)된 것으로 조사되었고, 일부 컴퓨터실 앞 복도 1지점에서는 건축자재에 흔히 사용되지 않는 트레몰라이트가 미량(trace) 백석면과 함께 검출되기도 했다.

초등학교 건축 구조물 중에서도 어린 학생들의

**Table 1.** Survey of asbestos-containing materials for the construction materials of primary school by the usage

Usage	Number of Sample	Not detected	Detected	Detect rate (%)	Asbestos concentration
Classroom	53	3	50	94.3	chrysotile 2~5% or mixed chrysotile and amosite 1~6%
Special activity room	22	5	17	77.3	chrysotile 2~4% or mixed chrysotile and amosite 2~6%
Hallway	60	10	50	83.3	chrysotile trace (under 1%)~6% or mixed chrysotile and amosite and/or tremollite trace (under 1%)~4%
Lunchroom /Parking garage	5	2	3	60.0	chrysotile 3~6%

**Table 2.** Numerical ratings for current condition by EPA AHERA-40 CFR rule

Numerical rating	ACM Construction materials	frequency (%)
Asbestos not detected (or under 1%)	22	15.7
7	47	33.6
6	65	46.4
5	0	0
4	5	3.6
3	1	0.7
2~1	0	0

활동이나 통행량이 많은 교실과 복도의 천장텍스에 대한 관리가 우선적으로 요구된다 하겠다.

또한, 서울시내 초등학교 건축물에 석면이 사용된 빈도는 총 140개 시료 중 120개에서 석면이 사용된 것으로 조사되었고, 석면검출비율은 85.7%이다. 이는 2007년 교육과학기술부에서 전국 표본 100개 학교에 대해 조사한 석면검출비율 88.3%보다 낮지만, 환경부에서 2009년 전국 200개 공공 건축물 석면함유물질 사용 실태조사의 석면검출비율 82.5%보다는 높은 경향을 나타냈다.

준공년도별 학교 건축자재의 석면함유물질 사용 현황을 살펴보면, 1970년대~1990년대 건립된 학교는 거의 100% 석면함유물질이 사용되어졌다고 볼 수 있으며, 2000년대 이후 새로 신축된 학교에서는 1999년 6월에 “제조 등 금지 유해물질에 석면 함유(1%이상) 제재”가 산업안전보건법에 추가되면서 71.4%로 현격히 줄어든다. 한편, 준공되지 오래된 1970년대 이전의 학교 건축물에서 석면함유물질 사용이 87.0%로 상대적으로 낮은 이유는 그동안의 시설 노후화로 인하여 장기간에 걸쳐 꾸준히 실내 건축자재의 리모델링 결과로 사료된다.

## 2. 석면함유물질의 물리적 특성을 통한 위해성 평가

건축자재에 사용된 석면이 문제가 되는 것은 건물의 노후화로 기류나 건물의 진동, 보수나 학생들의 활동에 의해 쉽게 부스러져 유해한 석면섬유

를 다량으로 발생시킬 우려가 있는 경우이다.

이에 따른 석면함유물질의 위해성 평가는 석면 노출 가능성에 대한 정성적 순위 평가방법인 미국 EPA AHERA(Asbestos Hazard Emergency Response Act)-40 CFR 규정과 ASTM(American Society for Testing Materials) 규정이 있으며, (7) 우리나라에서도 2012년 4월부터 시행되는 석면안전관리법 시행규칙 제 20조(석면위해성평가 및 건축물석면지도의 작성)에서 「석면건축자재 위해성 평가방법 및 기준」을 설정하여 시행할 예정이다.

본 연구에서는 각각의 특징적인 평가방법을 통하여 서울시내 초등학교의 석면건축자재에 대한 위해성을 평가하였다.

### 1) 미국 EPA의 석면함유물질 위해성 평가방법 (AHERA-40 CFR 규정)

AHERA 규정에 의한 건축물 석면조사자는 잠재적 석면 의심물질(Potential Asbestos Containing Material, PACM)과 보온단열재(Termal System Insulation, TSI)에 대하여 현재 상태와 잠재적 손상 가능성 평가를 동시에 실시하여 이를 7개의 위해등급으로 제시하도록 하고 있다.

의심물질의 상태는 건조상태에서 손의 힘만으로 쉽게 부스러지거나 가루가 되는 상태를 비산되기 쉬운 석면의 상태로 분류하며, 그렇지 않은 상태를 비산 가능성이 낮다고 평가한다. 잠재적 손상 가능성 평가는 석면함유 의심물질이 손상되거나

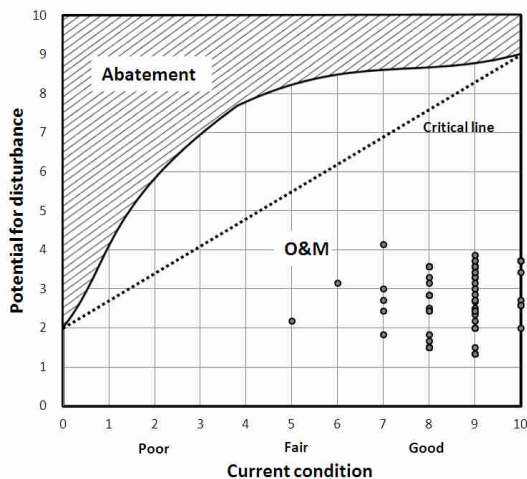
손상을 줄 수 있는 진동, 공기흐름에 의한 부식, 접촉 가능성 등의 물리적 요인을 조사하므로써 석면함유 의심물질의 잠재적 공기 중 노출 가능성을 평가하는 것이다.

평가된 모든 석면의심물질을 석면함유 의심자재의 현재상태와 잠재적 손상 가능성에 따라 심한 손상 상태에 있는 석면함유물질을 가장 위해도가 높은 1등급으로 평가하고 양호한 상태로 있으면서 잠재적 손상 가능성도 낮은 석면함유물질을 위해도가 가장 낮은 7등급으로 구분하여 평가한다.

본 조사대상 140개 석면함유 의심자재 중 석면이 사용되지 않았거나, 현재상태가 양호하며 잠재적 교란정도도 낮은 위해도 5~7등급의 안전한 지점은 134지점(95.7%)으로 대부분이었고, 약간의 손상상태는 있으나 잠재적인 교란 가능성은 낮아 일부 교체나 밀봉의 관리가 필요한 위해도 3~4등급은 6지점(4.3%)이었다.

## 2) 미국 재료시험협회의 위해성 평가방법 (ASTM 규정)

석면 함유물질에 대한 위해성 평가는 기존의 발생한 사실에 근거한 건축자재 현재상태와 추후 발생 가능성에 대한 잠재적 손상 가능성으로 평가할 수 있으며, ASTM에서는 평가대상 건축자재의 현



**Fig. 3.** ACM rating on abatement versus O&M (Operation&Maintenance) decision chart by ASTM rule.

장조건 평가와 앞으로 건축자재의 손상에 영향을 줄 수 있는 물리적 요인(사람의 접근성과 활동성), 환경적 요인(대류, 부식성, 물에 의한 침수)을 점수화하여 좋음(Good) 8~10 Undamaged, 보통(Fair) 4~7 Damaged, 나쁨(Poor) 1~3 Significantly damaged의 3단계로 평가한다.

특히 ASTM 평가방법은 평가점수를 그림 3과 같이 X축에 석면함유물질의 현재 상태(비산정도), Y축에 물리적인 요인(손상정도)을 놓고 석면함유물질 평가 그래프를 그려서 우선순위에 따른 유지와 관리(Operation & Maintenance, O&M)나 제거(Abatement) 여부를 판단하는데 그 특징이 있다.(8)

본 조사대상 대부분의 석면함유 건축자재는 현재상태가 좋고(Good), 잠재적 손상 가능성도 낮은(Low) 정도로 그래프가 상단 좌측으로 구부러져 있어 유지와 관리(O&M) 비율이 높음을 알 수 있다.

최근 미국에서도 건물 내 석면사용은 금지하고 있으나, 기존에 사용했던 석면함유 건축자재가 있는 경우는 보존상태가 좋으면 그 상태로 유지하도록 권고하고, 상태가 좋지 않은 경우에만 제거, 밀폐, 덧씌우기 등을 권고하고 있다.(9)

## 3) 우리나라의 석면건축자재 위해성 평가방법 (석면안전관리법)

석면 건축자재의 위해성을 개별 석면 건축자재 별로 물리적 평가(비산성, 손상상태, 석면함유량, 석면건축자재의 양), 진동이나 기류, 누수에 의한 잠재적 손상 가능성 평가, 건축물 유지보수 활동에 기인한 손상 가능성 평가, 인체노출 가능성 평가의 4개 항목으로 구분하여 분류하며, 항목별 점수의 합계가 해당 석면건축자재의 평가점수가 되고 점수는 낮을수록 위해성이 적은 것으로 평가한다.

이 평가점수에 따라서 14이하의 특별한 조치가 필요 없고, 15~23은 중간단계로 손상에 대한 보수가 필요함이며, 24이상은 해당 건축자재를 제거하거나 밀봉하여 인체에 대한 영향을 완벽히 차단하여야 한다.

앞으로 시행될 우리나라의 석면건축자재 위해성 평가방법에 의하면 특별한 조치가 필요 없는 22개 지점, 중간단계로 손상에 대한 보수가 필요한 지

**Table 3.** The Evaluation score of buildings according to Asbestos Safety Management Act in Korea.

Evaluation score	No. of spaces	frequency (%)
not detected (or under 1%)	22	15.7
1~14	0	0
15	1	0.7
17	4	2.9
18	37	26.4
19	25	17.9
20	49	35.0
21	2	1.4

점이 118지점, 해당 건축자재를 제거하거나 밀봉할 지점은 없는 것으로 평가되었다.

조사 결과, 앞으로 시행될 석면안전관리법에 의하면 손상에 대한 보수가 필요한 지점이 상대적으로 많아지는데, 이는 우리나라의 석면건축자재 위해성 평가방법이 미국 평가방식인 석면함유물질 물리적 특성을 통한 위해성 평가방법과는 다르게 인체의 건강위해도 측면을 고려하여, 물리적 평가에서 석면 함유량과 석면건축자재의 양을 추가하였고, 인체 노출 가능성 평가에서 거주자의 수, 구역 사용빈도, 평균 사용시간 등을 세분하여 평가방법에 반영하였기 때문이다.

### 3. 실내공기 중 섬유상 물질의 위상차현미경 분석

실내공기 중 섬유상 물질의 노출농도를 조사한 결과, 1970년 이전에 건축된 학교시설에서의 측정값은 검출한계 이하~0.073 f/cc이며, 46개 지점 중 14개 지점에서 실내공기질 관리기준 0.01 f/cc

를 초과하였고, 평균농도는 0.0087 f/cc였다.

각각의 준공년도별 실내공기 중 섬유상 입자의 농도분포는 아래의 표 4와 같으며, 특히 1990년대 건축된 학교에서는 평균 측정치도 0.0111 f/cc로 기준치를 초과하였다.

전체 조사대상 140개 지점 중 48개 지점(기준치 초과율 : 34.3%)에서 실내공기질 관리기준인 0.01 f/cc를 초과하였으며, 석면함유 건축자재의 사용과는 특별한 상관성은 보이지 않았다. 이는 투과전자현미경 분석을 위하여 4시간 이상 시료채취를 하였으며, 협소한 공간적인 제약과 학생들의 많은 활동량에 기인하는 것으로 보인다.

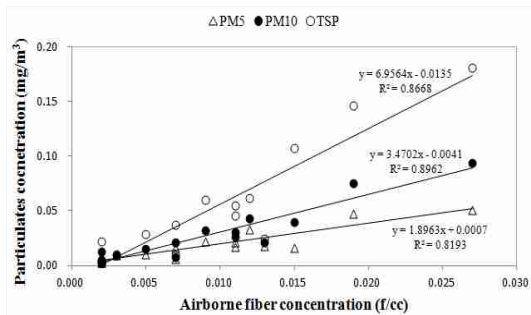
위상차현미경 분석의 특성상 섬유상 입자와 석면을 구분할 수 없다는 단점으로 인해 인체의 위해도 평가는 투과전자현미경으로 실시하였다.

그림 4에 공기 중 섬유상 입자농도와 입자상 물질의 직경에 따른 농도의 상관관계(n=16)를 비교하였다. 총부유분진(TSP, Total Suspended Particle),

**Table 4.** The concentration of airborne fiber according to completion year of buildings

Concentration of fiber	before 1970s	1970s	1980s	1990s	2000s
PCM (f/cc)	ND ~ 0.073	ND ~ 0.029	ND ~ 0.039	ND ~ 0.035	ND ~ 0.048
Mean±S.D. (f/cc)	0.0087 ±0.0116	0.0090 ±0.0066	0.0094 ±0.0081	0.0111 ±0.0103	0.0099 ±0.0135





**Fig. 4.** The correlation analysis of airborne fibers and particulates concentration.

입자의 직경이 10  $\mu\text{m}$ 이하인 먼지 PM10(particle matter less 10), PM5와 위상차현미경으로 측정 한 공기 중 섬유상 입자와의 선형회귀 분석한 결과, 공기 중 섬유상 입자농도와 입자상 물질과는 상당한 연관성을 가지고 있는 것으로 나타났고, 그 중 PM10이 결정계수  $R^2=0.8962$ 로 TSP, PM5보다 다소 높았다.

이는 섬유상 입자가 부유분진 중에서도 특히 10  $\mu\text{m}$  이하 입자와의 상관성이 높은 것이며, 활동량이 많은 어린 학생의 석면으로 인한 건강 위해성 방지를 위하여 학교 실내공기 관리측면에서 부유분진 관리가 요구된다.

#### 4. 투과전자현미경 분석을 통한 건강 위해성 평가

동물실험이나 호흡생리의 역학적 연구에서 섬유의 길이가 5  $\mu\text{m}$ 이하인 섬유는 폐내의 대식세포에 의하여 쉽게 분해되고 빨리 사라져 건강장해를 일으키기 어려우며, 직경이 3  $\mu\text{m}$ 이상인 섬유는 호흡성 분진에 해당되지 못하여 폐내에 흡입되기 어렵다는 이론에 따라 섬유길이가 5  $\mu\text{m}$ 이상이고 직경이 3  $\mu\text{m}$ 이하, aspect ratio가 3:1이상인 섬유입자들이 호흡기를 통하여 흡입되어 건강장해를 일으키는 것으로 알려져 있다.(10)

석면의 흡입으로 인한 암 발생 리스크의 측정은 최초 노출시기 및 연령, 중요 노출기간과 노출주기에 따라 달라지며, EPA의 건강위해성평가법에 의한 석면의 발암 위해도는 다음과 같은 식으로 산출할 수 있다.(11)

$$\text{Risk} = C_{\text{PCME}} \times \text{TWF} \times \text{URa,d}$$

여기서  $C_{\text{PCME}}$ (Average concentration of PCME)는 공기 중 PCME 석면평균농도(f/cc)로서 ISO에서는 건물의 실내공기를 포함하여 석면섬유가 존재할 수 있는 다양한 범위의 일반대기 중의 석면농도를 결정하기 위한 방법으로 PCM 분류방식에 따라 TEM으로 확인하는 석면농도를 PCME(PCM-equivalent)라 한다.(길이:지름 $\geq 3:1$ , 길이 $\geq 5 \mu\text{m}$ , 지름 $\geq 0.2 \sim 3 \mu\text{m}$  인 석면섬유)

TWF(Time Weighting Factor)는 지속적인 노출시간의 가중치, URa,d(Unit Risk)는 흡입단위 위해도(f/cc)<sup>-1</sup>이며, a는 지속적인 노출이 시작된 연령이며 d는 지속시간으로 설정하였다. 지속적인 노출시간 가중치는 아래의 식에 의해 계산되며,

$$\text{TWF} = \frac{\text{노출시간(노출시간/일)}}{24} \times \frac{\text{노출주기(일/년)}}{365}$$

이에 따라 EPA의 석면 노출에 따른 암으로 인한 사망 위해도 값을 산출하여 건강위해도 값이  $10^{-4}$  이상이면 건강 위해가능성이 높은 것으로 평가하고, 건강 위해도 값이  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  이면 중간, 건강 위해도 값이  $10^{-6}$  이하이면 Background risk(Acceptable risk)로 평가한다.

본 조사에서는 ISO 10312 PCME fiber가 교실에서  $1.698 \times 10^{-4}$  (f/cc)로 측정되었고, 초등학교 재학생의 첫 노출시기를 만 7세로, 노출빈도를 170 days/yr, 노출시간을 8 hrs/day, 잠복기간을 60년을 가정하여 석면흡입 평생발암위해도를 구해보면  $0.422 \times 10^{-5}$ 으로 추정되었으며, 복도나 기타 시설에서는  $10^{-6}$  이하(Background risk)로 평가되었다. 이는 미국 HEI(Health Effect Institute)가 1991년 총 198개 학교를 대상으로 실시한 석면위해평가  $0.6 \sim 6 \times 10^{-5}$ 보다 낮은 수준이었다.

## 결론

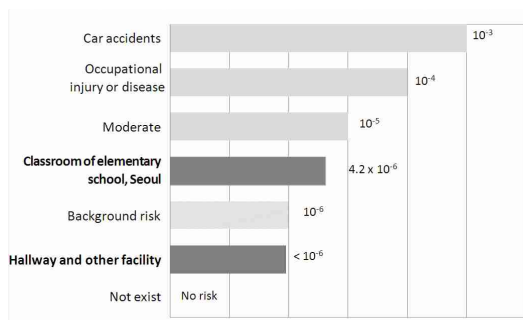
서울시내 초등학교 70개교를 대상으로 건축자재에 대한 석면함유물질 실태조사와 위해성 평가를 실시하였고, 실내공기 중 섬유상입자에 대한 위상차현미경



**Table 5.** Extrapolated Unit Risk Values for Continuous and Less-Than-Lifetime Exposures(PCME f/cc)

Age at Onset	Exposure Duration (years)							
	10	20	25	30	40	50	60	LT
0	8.5E-02	1.4E-01	1.6E-01	1.7E-01	1.9E-01	2.1E-01	2.2E-01	2.3E-01
1	8.1E-02	1.3E-01	1.5E-01	1.7E-01	1.9E-01	2.0E-01	2.1E-01	2.2E-01
2	7.8E-02	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.8E-01	1.9E-01	2.0E-01	2.1E-01
3	7.5E-02	1.2E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.7E-01	1.8E-01	1.9E-01	2.0E-01
4	7.2E-02	1.2E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.8E-01	1.8E-01	1.9E-01
5	7.0E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.6E-01	1.7E-01	1.7E-01	1.9E-01
6	6.7E-02	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.7E-01	1.8E-01
7	6.4E-02	1.0E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.7E-01
8	6.2E-02	1.0E-01	1.1E-01	1.2E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.5E-01	1.6E-01
9	5.9E-02	9.6E-02	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.6E-01
10	5.7E-02	9.2E-02	1.0E-01	1.1E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.4E-01	1.5E-01
20	3.9E-02	6.2E-02	6.9E-02	7.5E-02	8.3E-02	8.7E-02	9.0E-02	9.3E-02
30	2.6E-02	4.0E-02	4.5E-02	4.8E-02	5.2E-02	5.4E-02	5.5E-02	5.7E-02
40	1.7E-02	2.5E-02	2.7E-02	2.9E-02	3.1E-02	3.1E-02	3.2E-02	3.2E-02
50	1.0E-02	1.4E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.5E-02	1.6E-02

\* LT in the table means continuous lifetime exposure beginning at birth and lasting until death of the individual. Continuous means that exposure occurs 24hours/day, 365day/year.



**Fig. 5.** Compare carcinogenic risk assessment of primary school with other risks.

분석과 이에 대한 정밀한 투과전자현미경 분석으로 석면을 분류하여 건강 위해도 지수를 산정하였다. 건축자재의 석면함유 여부를 조사한 결과, 70개

교 중 65개교에 석면이 포함된 건축자재가 사용되어졌고, 총 시료수 140개 중 120개 시료에서 석면이 검출되었다.(검출비율 : 85.7%)

구조물의 사용용도별 석면검출비율은 교실 > 복도 > 특별실 > 식당/주차장 순이고, 특히 교실의 천장텍스에서는 거의 대부분 석면이 검출되었다. 학생들의 활동과 통행량이 많은 교실과 복도 천장텍스에 대한 관리가 우선적으로 요구되며, 이에 대한 위해성 평가를 실시하였다.

미국 EPA AHERA-40 CFR 규정에 의하면, 석면함유의심 건축자재 140개 중 석면이 불검출되거나 현재상태가 양호하며 잠재적 교란정도도 낮은 시료가 134개(95.7%)로 대부분이 좋은(Good)상태이며 비산 가능성이 없는 것으로 조사되었고, ASTM 방식으로 석면함유물질 평가 그래프를 그

려보아도 유지와 관리(O&M) 비율이 높음을 알 수 있었다.

우리나라 석면건축자재 위해성 평가방법의 경우에도 특별한 조치가 필요 없는 석면 불검출 자재가 22개, 중간단계로 손상에 대한 보수가 필요한 건축자재가 118개, 해당 건축자재를 제거하거나 밀봉할 지점은 없었다.

따라서 이미 많은 학교 건축물에 사용된 석면함유물질을 단순히 해체, 제거작업을 실시하기 보다는 학생들에게 학교 건물 어디에 석면이 사용되었는가를 주지시켜 무의식적으로 훼손하는 일이 없도록 하고, 만일 손상되었다면 석면이 비산되지 않도록 도포하거나 봉입시키면 위험성을 크게 낮출 수 있다.

실내공기 중 섬유상 물질의 위상차 분석결과는 조사대상 140개 지점 중 48개 지점(기준치 초과율 : 34.3%)에서 실내공기질 관리기준인 0.01 f/cc를 초과하였으나, 위상차현미경 분석의 특성상 섬유상 물질과 석면을 구분할 수 없다는 단점으로 투과전자현미경 분석을 실시하였다. 그 결과, 48개 지점 대부분이 석면입자가 아닌 것으로 판명되었으며, 그 중 3개 지점에서도 실내공기질 관리기준 이내인 0.003 f/cc를 나타내었다.

또한 석면함유 건축자재의 사용과는 특별한 상관성은 볼 수 없었으며, 실내공기 중 섬유상 입자 농도와 입자상 물질과는 상당한 연관성을 가지고 있으므로 학생들의 석면으로 인한 건강 위해성 방지를 위해서도 학교 실내 부유분진 관리가 요구된다고 할 것이다.

인체의 위해도 평가는 투과전자현미경으로 실시하였고, 실내공기 중 PCME 석면평균농도(f/cc)를 측정하여 EPA 건강위해도 평가법에 의한 석면의 발암위해도는 교실이  $0.422 \times 10^{-5}$  으로 Acceptable risk level, 복도나 기타시설에서는  $10^{-6}$  이하로 Background risk level인 것으로 평가되었다.

이는 미국 HEI(Health Effect Institute)가 1991년 총 198개 학교를 대상으로 실시한 석면의 발암 위해도  $0.6 \sim 6 \times 10^{-5}$ 보다 낮은 수준이며, 미

국 EPA Superfund Program에서 제시하는 석면에 대한 초과생애발암위해도 노출범위  $10^{-4}$ (1 in 10,000)보다 낮은 것으로 평가되었다.

## 참고문헌

1. 구기주 : 석면이란 무엇인가. 명문출판사, p11~12, 2002.
2. 홍범식 : 광물학. 동명사, p415~416, 1983.
3. 강동묵 : 환경성 석면노출의 건강영향. 한국환경보건학회지, 35(2):71~77, 2009.
4. 노영만, 박화미, 이철민, 김윤신, 이상운, 석미희, 정춘화 : 일부 공공 및 학교시설에서의 석면 분포특성 조사. 한국실내환경학회지 제4권 제3호, p184~193, 2007.
5. NIOSH 7400 : Asbestos and Other Fibers by PCM, 1994.
6. ISO10312 : Ambient air-Determination of asbestos fibres-Direct-transfer transmission electron microscopy method. ISO 10312 first edition, 1995.
7. 박화미 : 건축물의 석면관리수준 개발과 최적의 리스크 커뮤니케이션에 관한 연구. 한양대학교 박사학위논문, p26~34, 2009.
8. Andrew FO : Asbestos Control: Surveys, Removal, and Management. ASTM International, 2005.
9. Donaldson K, Miller BG, Sara E. Slight J and Brown RC. : Asbestos fibre length-dependent detachment injury to alveolar epithelial cells in vitro : role of a fibronectin-binding receptor Int J Path 74:243~250, 1993.
10. 최정근 : 석면과 유리섬유에 의한 호흡기 건강장애에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문, p4~5, 1997.