서울特別市 保健環境硏究院報 第55號 (2019)
Report of S.I.H.E., 55:163~174 (2019)

석면건축물 석면해체제거에 따른 비산석면 발생에 관한 연구

입자연구팀

김지성 · 임기교 · 김창규 · 정숙녀 · 강미혜 · 하광태 · 정종흡 · 어수미

Airborne Asbestos Released from Asbestos Containing Material Abatement Site

Particle Research Team

Ji-sung Kim, Ki-kyo Lim, Chang-kyu Kim, Sook-nye Chung, Mi-hye Kang, Kwang-tae Ha, Jong-heub Jung and Soo-mi Eo

Abstract

Phase contrast microscopy(PCM) was used in this study to detect fibrous material. Then, transmission electron microscopy(TEM) was performed for samples whose asbestos emission levels exceeded the permissible emission levels($\geq$ 0.01 f/cc). The test determined the presence of asbestos fibers in the samples and the fiber type, length, and width. The airborne fibrous material concentration around the asbestos abatement worksite is higher than that around the asbestos waste storage site and the surroundings of the asbestos abatement worksite($p < 0.05$), indicating that asbestos abatement work has a fundamental effect on the generation of airborne fibrous material. When the airborne fibrous material generated by indoor and outdoor working conditions were compared, depending on the asbestos containing material, the indoor fibrous material concentration was slightly higher than the outdoor concentration; however, the difference was not significant($p > 0.05$). A 1.3% of the total airborne sample exceeded the asbestos permissible emission level; this percentage was mostly collected close to the asbestos abatement site. Chrysotile represented 73% of the asbestos fibers in the sample and the remaining 27% were amphiboles. In addition, 82% of the asbestos fibers had a width $\leq$ 1.0 μm, and these asbestos fibers showed a negative correlation(-0.419, $p < 0.01$) between the width and the aspect ratio, indicating that the thinner the asbestos fibers, the longer the length per width of the asbestos fiber. Although the quantity of asbestos fibers detected close to the asbestos abatement site was less, amphiboles and thin, long asbestos fibers, which are highly carcinogenic resulting in lung cancer and mesothelioma, were often detected.

Key words : asbestos, fibrous materials, fiber width, aspect ratio

서 론

석면은 내열성, 불연성, 절연성, 단열성 등을 갖추고 있는 자연에서 유래한 물질이며, 크게 사문석계 및 각섬석계 석면으로 구분된다. 사문석계 석면은 백석면이 있으며, 각섬석계 석면은 갈석면, 청석면, 안소필라이트석면, 트레몰라이트석면 그리고 악티놀라이트석면이 있다. 이 중 백석면 및 갈석면이 주로 석면건축자재의 형태로 사용되어왔지만(1), 폐암, 악성중피종 등을 유발하는 인체에 유해한 물질로 밝혀짐에 따라, 국내에서는 2009년 대체품이 개발되지 않은 일부 제품을 제외한 석면함유제품의 사용이 전면 금지되었으며, 2015년에 최종적으로 석면함유제품에 대한 전면적인 사용금지가 이루어졌다(2). 한편 이와 관련하여, 이미 사용된 석면건축자재에 대한 해체제거가 활발히 진행되고 있다.

석면해체제거는 해체 대상 석면건축자재의 종류 및 설치위치에 따라 실내 및 실외작업을 시행할 수 있다. 실내작업의 경우, 비닐보양 및 음압을 이용한 기밀이 유지된 상태에서 작업을 시행하며, 실외작업은 밀폐가 대부분 불가능하므로 대상 석면건축자재의 파손을 최소화하는 선에서 작업이 시행된다. 한편 석면해체제거사업장 관리에 관한 규정은 산업안전관리법, 석면안전관리법 등을 적용하고 있으며, 특히 석면해체제거작업장 주변은 배출허용기준인 0.01 f/cc를 기준으로 관리가 되고 있다(3).

공기 중 석면은 신속한 분석결과 도출에 중점을 둔, 위상차현미경을 통한 분석이 이루어지고 있는데, 위상차현미경은 정성평가가 불가능하여, 석면과 유사한 형태의 섬유상물질을 석면으로 간주할 수 있어, 위해성이 과대평가될 우려가 있다. 또한 기존 위해성평가에서는, 석면의 종류와 상관없이 길이 5μm 이상인 백석면 및 각섬석계 석면의 잠재적 유해성을 모두 같은 것으로 정의하여, 생애초과발암위해도를 평가하고 있다. 그러나 실제 석면의 종류 및 크기에 따라 각각 폐암 및 악성중피종을 유발하는데 기여하는 잠재력이 다르므로, 석면의 종류 및 크기가 폐암 및 악성중피종 발생에 미치는 영향에 관한 연구들이 진행됐으며, 이에 대한 고려가 필요하다(4).

본 연구는 석면해체제거 작업장 주변 비산석면을 포함하는 섬유상물질을 조사하여 섬유상물질 발생 특성을 분석하였으며, 검출된 섬유상물질 중 석면해체제거작업장 배출허용기준을 초과하는 시료에 대해서 석면에 대한 정성 및 정량평가를 실시하였다. 또한 해당석면의 종류, 크기 정보를 파악하여, 폐암 및 악성중피종 유발 잠재성이 있다고 조사 보고된 석면의 종류, 크기 정보와 비교하였다. 이를 통해 보편적인 석면해체제거 작업장 주변 현황을 파악하는 한편, 생활환경과 밀접한 석면해체제거 작업장에서 발생할 수 있는 비산석면에 대한 실질적인 정보 제공을 통해, 석면해체제거 작업장에 대한 효율적인 관리대책 마련에 기여하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상

연구대상은 2016년부터 2019년까지 서울시 내 위치한 석면해체제거사업장으로 하였으며, 구체적으로 재건축 및 재개발 대상으로 지정되어, 건물 철거를 목적으로 하는 작업장 및 석면건축물 내 석면건축자재를 대체 건축자재로 교체하기 위한 작업장이 대상이다. 측정 당시 작업장 내 제거 대상 석면건축자재의 종류와 그에 따른 실내 및 실외작업 여부에 대해서 파악하였다.

2. 시료 채취 및 분석

석면해체제거사업장 내 시료채취는 '환경부고시 제2012-79호 석면해체제거 작업 사업장 주변 석면 관리를 위한 조사방법(5)'과 실내공기질 공정시험기준(6)의 '실내공기 중 석면 및 섬유상 먼지 농도 측정방법 - 위상차현미경(Phase Contrast Microscopy, PCM)법 (ES 02303.1b)' 및 '실내공기 중 석면 측정방법 - 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, TEM)법 (ES 02304.1a)'을 적용하였다.

시료채취와 관련된 사항을 표 1과 그림 1에 각각 나타내었다. 채취지점은 석면해체제거작업장

주변(Abatement work), 폐기물 반출 및 보관지점(Waste storage) 그리고 해체제거 작업지점을 둘러싼 변두리지점(Surrounding) 등 크게 세 가지로 분류하였다.

Abatement work는 위생설비입구, 음압기배출구, 작업장주변 실내 및 실외 지점이 포함된다. 해당 지점들은 해체제거작업장과 가장 근접하며, 작업장 주변 비산석면 주요 발생원 중 하나인 석면자재의 해체가 이루어지는 장소이다. 해당 지점들에서 비산석면이 검출된다면, 작업장 내 석면자재 해체제거가 가장 큰 원인일 것이다. Waste storage는 해체된 석면폐기물을 반출하고 보관하는 장소이며, 해당지점의 비산석면 검출은 석면해체제거 이후 발생한 석면폐기물 취급 및 관리 절차 중 발생한 것이다. Surrounding은 석면해체제거 작업이 인근 주민들에게 미치는 영향을 파악할 수 있는 지점으로써, 사업장 부지경계선 및 완전철거가 계획된 재건축, 재개발구역 내 거주자주거지역을 포함하도록 하였다. 한편 배경농도(Background)를 고려하기 위해 서울시 내 위치한 공원 및 하천 주변의 시료를 채취하였다.

시료채취는 공기 중 시료채취 펌프(SARA-4000, KEMIK)에 직경 25 mm, pore size 0.80 μm의 MCE(mixed cellulose ester) 필터가 장착되어 있는 카세트를 장착하였으며 10 L/min의 유량으로 채취지점에 따라 1,200~2,400 L를 포집하였다.

채취된 시료들은 위상차현미경법(ES 02303.1b) 법(6)에 따라 전처리과정을 거친 후, 분석하였다. 위상차현미경의 검출한계는 7 fiber/mm^{2}로 검출한계 미만의 결과가 나타난 시료의 경우, 불검출로 간주하였다.

3. 투과전자현미경 분석

위상차현미경 분석결과, 석면으로 의심되는 섬유상물질의 농도가, 석면해체제거사업장 배출허용기준인 0.01 f/cc를 초과하는 고농도 시료에 대해서 투과전자현미경을 이용한 정성 및 정량 분석을 실시하였다. 위상차현미경 분석에 사용하고 남은 필터 일부를 취해, 투명화, 플라즈마회화, 탄소코

Table 1. Information on sampling method and materials

Classification		Total(n)	Sampling site	Volume (L)	Flow-rate (L/min)
Asbestos Abatement	Abatement work	494	Decontamination chamber entrance[1] (for indoor or outdoor work)	1,200	10
			Negative-pressure filtration flow-out(indoor work only)[2]		
			Around Abatement work site (indoor work only)[3]		
			Around Abatement work site (outdoor work only)[4]		
	Waste storage	310	Way to waste storage[5]		
			Around waste storage[6]		
	Surrounding	751	Around residence[7]	2,400	
			Boundary[8]		
Background		508	Park and Stream	1,200	

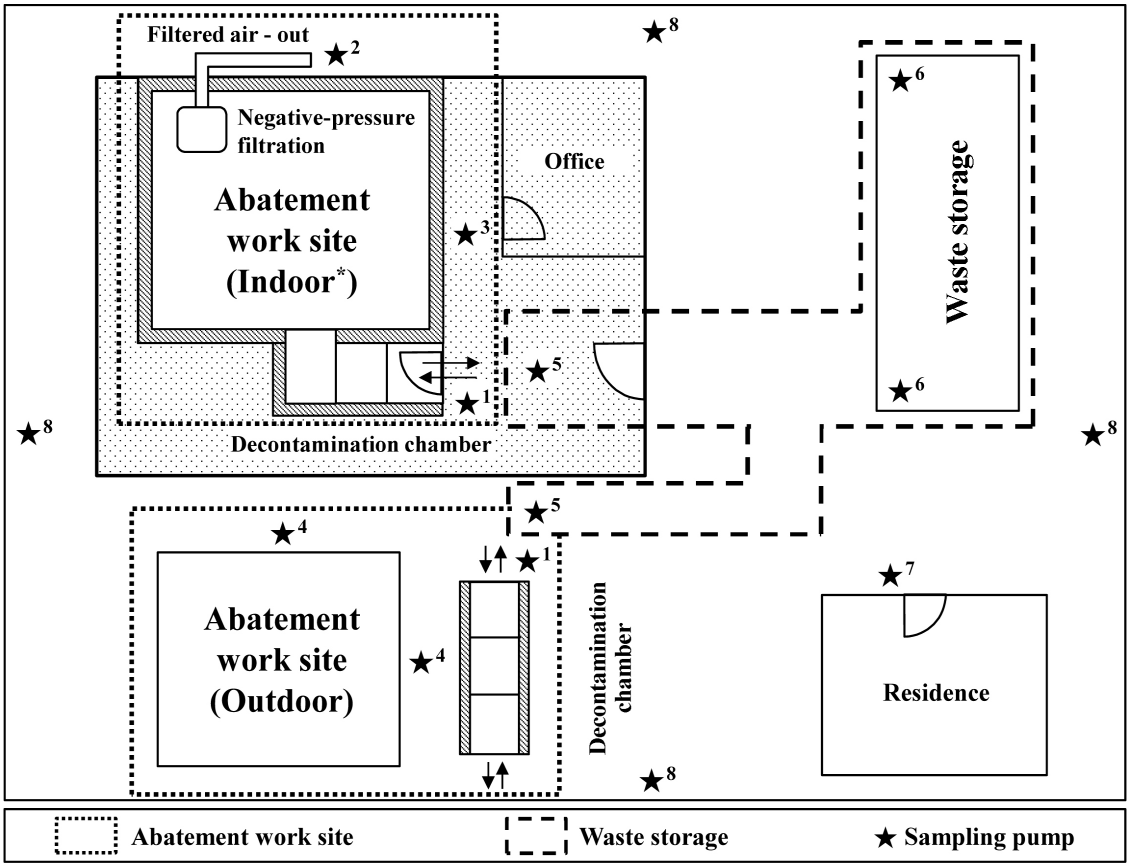
- Fig.1 show location for sampling site each numbered
- Air sampler(SARA-4000, KEMIK) with 25 mm cassette including pore size 0.8 μm MCE filter was used
- Sampling height was 1.2~1.5 m at every location without Negative-pressure filtration flow-out(the same height as flow-out)

팅 그리고 Jaffe세정과정을 거쳐, 투과전자현미경 분석을 위한 시험편을 제작하였다. 투과전자현미경(Tecnai G2, FEI company 120 keV)을 이용하여 길이 5 μm 이상이고 길이대너비 비율이 3:1 이상인 입자를 선별하여, 에너지분산형 X선분광스펙트럼(energy dispersive X-ray spectrum)과 제한시야 회절패턴(selected area diffraction pattern)으로 화학조성과 결정구조를 파악하였다.

결과 및 고찰

1. 석면해체제거사업장 내 섬유상물질 발생 현황

석면해체제거사업장 내 섬유상물질 검출률을 표



• Indoor abatement work site is completely sealed off

Fig. 1. Schematic diagram of the Abatement work site.

Table 2. Detection rate of air-born fibrous material for sampling site

Sampling site	Total(n)	Detection[1)](n)	Detection rate(%)
Abatement work	494	269	54.5
Waste storage	310	109	35.2
Surrounding	751	110	14.6
Background	508	112	22.0

1) Detection limit(DL) is ≤ 7 fiber/mm^2

2에 나타내었다. Abatement work에서 494건의 시료 중 269건, 54.5%의 섬유상물질이 검출되었으며, Waste storage는 310건 중 109건, 35.2%, Surrounding에서는 751건 중 110건, 14.6% 그리고 Background에서는 508건 중 112건, 22.0%의 섬유상물질이 각각 검출되었다.

위상차현미경에 검출된 섬유상물질의 농도분포와 평균농도를 그림 2와 표 3에 나타내었다.

Abatement work의 섬유상물질 농도분포는 평균 0.0053(DL~0.0383) f/cc를 나타냈으며, Waste storage는 평균 0.0037(DL~0.0112) f/cc를 나타냈다. Surrounding의 섬유상물질 농도 분포는 평균 0.0033(DL~0.0105) f/cc를 나타냈으며, Background는 평균 0.0027(DL~0.0047) f/cc를 나타냈다.

집단 간의 비교를 위해 분산분석을 실시하였다(표 3). 정규성검정 결과, 정규분포가 나타나지 않아, 비모수분석법인 Kruskal-Wallis법으로 분석

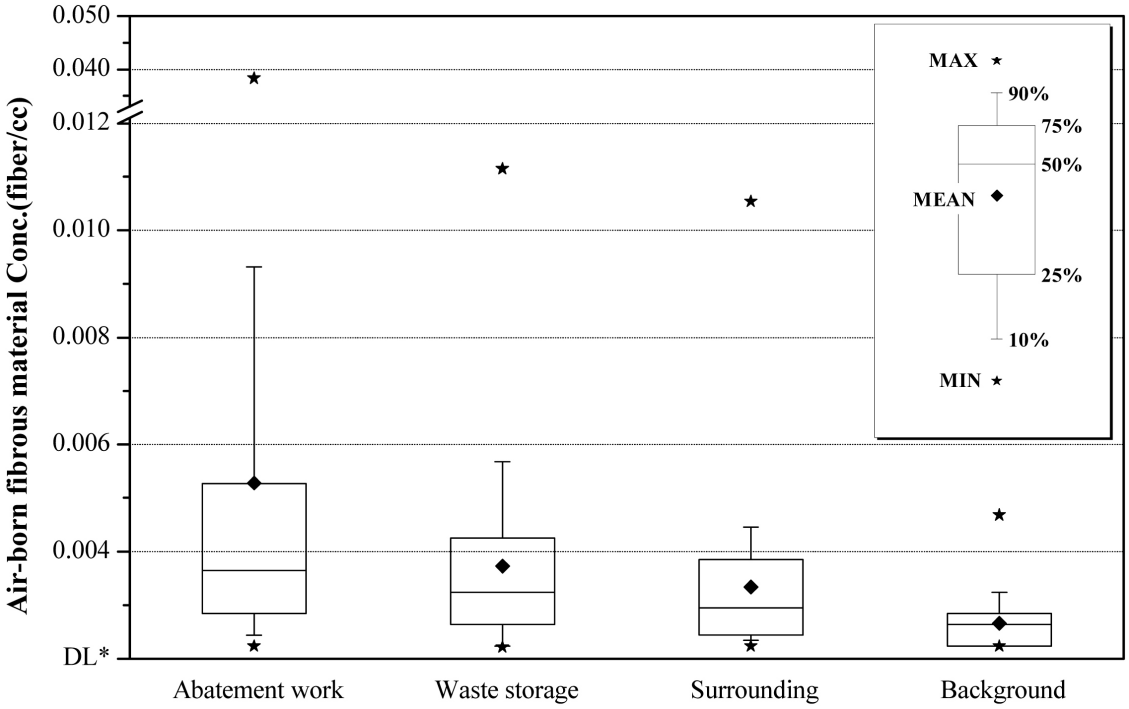


Fig. 2. Distribution of the air-born fibrous material concentration for sampling site.

Table 3. Result of the Kruskal-Wallis test for sampling site

Sampling site	N	Normality test[1)], *p*	Mean ± SD(f/cc)	df	H / *p*	Post hoc test[2)]
Abatement work[a]	269	0.00	0.0053 ± 0.0051	3	102.847 / 0.00*	a > b, c, d* b > d* c > d*
Waste storage[b]	109	0.00	0.0037 ± 0.0017			
Surrounding[c]	110	0.00	0.0033 ± 0.0013			
Background[d]	112	0.00	0.0027 ± 0.0005			

1) Kolmogorov-smirnov method
2) Mann-Whitney U test with Bonferroni Correction
* $p < 0.05$

하였으며, 사후검정은 집단 간 Mann-Whitney U 검정 후, Bonferroni 보정을 적용하였다. 그 결과, 각 시료채취 지점에 대해서 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으며($p<0.05$), 해당 분석에 대한 사후 검증 결과, Abatement work와 나머지 Waste storage, Surrounding 그리고 Background에서의 섬유상물질 농도에 유의한 차이($p<0.05$)가 있는 것으로 나타났다. 또한, Background 대비 Waste storage와 Surrounding 지점의 섬유상물질 농도 또한 각각 유의한 차이($p<0.05$)가 있는 것으로 나타났다.

석면해체제거사업장 내 섬유상물질 분석결과, Abatement work가 타 지점들보다 섬유상물질 농도가 높게 발생되는 것으로 나타나($p<0.05$), 석면건축자재 해체작업이 사업장 내 섬유상물질 발생에 근본적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 한편 Background에서의 검출률이 Surrounding의 검출률보다 다소 높은 것으로 나타났지만, Surrounding의 농도가 Background의 농도보다 큰 것으로 나타나($p<0.05$), Background 보다는 Surrounding에서 섬유상물질이 더 많이 발생한다고 판단된다.

2. 작업조건 별 섬유상물질 발생 특성

석면해체제거사업장에서는 사용된 석면건축자재의 종류에 따라 실내 또는 실외 에서 작업을 실시한다. 이에 작업조건(실내 및 실외 작업)별 섬유상물질 발생 특성을 검토하고자 하였다. 실내 또는 실외 작업조건에 따른 섬유상물질 검출률을 표 4에 나타내었다.

실내작업의 경우 Abatement work는 56.4%, Waste storage는 27.8% 그리고 Surrounding은 11.9%로 나타나, 해체제거작업장 중심에서 멀어질수록 검출률이 낮아지는 것으로 나타났다. 실외작업의 경우 Abatement work는 48.8%, Waste storage는 50.5%로 비슷한 검출률이 나타났으며, Surrounding에서 19.4%의 검출률이 나타나 Waste storage 이후로는 역시 낮은 검출률이 나타났다.

실외작업 시 Abatement work와 Waste storage에서 비슷한 검출률이 나타났는데, 이는 실외에 존재하는 석면건축자재인 슬레이트 철거 시, 열린공간에서 작업이 진행되기 때문에 섬유상물질이 주변으로 비산되어, Abatement work 주변에 위치한 Waste storage에도 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

실내작업과 실외작업에 의해 발생되는 섬유상물질의 농도분포와 평균농도를 그림 3과 표 5에 나타내었다.

먼저 작업 중 Abatement work에서 발생되는 섬유상물질의 농도분포는 실내작업의 경우, 평균 0.0054(DL~0.0383) f/cc를 나타냈으며, 실외작업의 경우, 평균 0.0048(DL~0.0315) f/cc를 나타냈다. Waste storage에서 발생되는 섬유상물질의 농도분포는 실내작업의 경우, 평균 0.0037(DL~0.0112) f/cc를 나타냈으며, 실외작업의 경우 평균 0.0038(DL~0.0089) f/cc를 나타냈다. Surrounding에서 발생되는 섬유상물질의 농도분

Table 4. Detection rate of air-born fibrous material for type of ACM abatement work

Sampling site	Type of work depending on target ACM[1)]					
	Indoor[a)]			Outdoor[b)]		
	Total(n)	Detection (n)	Detection rate(%)	Total(n)	Detection (n)	Detection rate(%)
Abatement work	367	207	56.4	127	62	48.8
Waste storage	209	58	27.8	101	51	50.5
Surrounding	472	56	11.9	279	54	19.4

1) Target ACM : ceiling tiles[a)], wall boards[a)], sprayed asbestos[a)], roofing slates[b)]

포는 실내작업의 경우, 평균 0.0034(DL~0.0105) f/cc를 나타냈으며, 실외작업의 경우, 평균 0.0033 (DL~0.0091) f/cc를 나타냈다.

시료채취 지점별 작업조건에 따른 섬유상물질 발생 비교를 위해, 평균비교분석을 실시하였다(표 5). 그 결과, Abatement work, Waste storage 그리고 Surrounding에서 작업조건별 섬유상물질 발생에 각각 차이가 없는 것으로 나타났다($p>0.05$).

실내작업과 실외작업에 의해 발생되는 섬유상물질 분석결과, 실내작업으로 발생되는 섬유상물질 검출률이 실외작업으로 인해 발생되는 섬유상물질보다 더 높은 것으로 나타났다. 그리고 Abatement work 중 실내작업에 의해 발생되는 섬유상물질의 농도가 실내작업 및 실외작업 시 Waste storage 그리고 실내작업 및 실외작업 시 Surrounding에 발생되는 섬유상물질 농도보다 큰 것으로 나타났지만, 유의한 차이는 없었다($p>0.05$). 이에

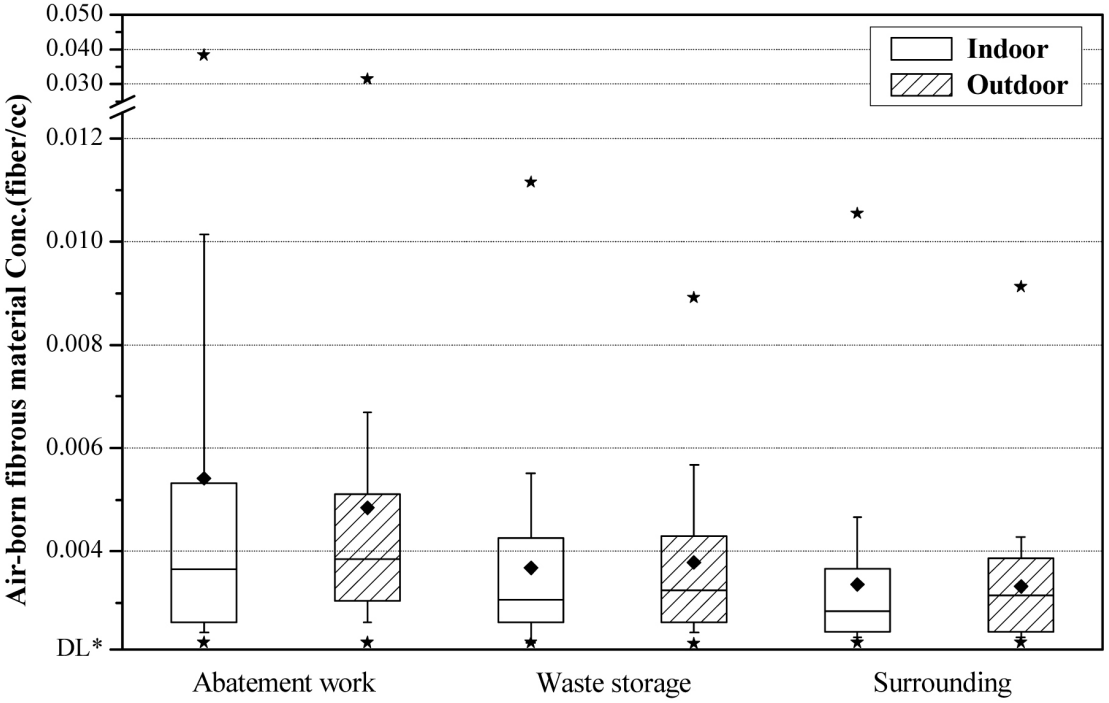


Fig. 3. Distribution of the air-born fibrous material concentration for type of ACM abatement work.

Table 5. Comparison of the sampling site in indoor and outdoor ACM abatement work

Sampling site	N	Mean ± SD(f/cc)	t	p
Abatement work(indoor)	207	0.0054 ± 0.0054	0.775	0.439
Abatement work(outdoor)	62	0.0048 ± 0.0040		
Waste storage(indoor)	58	0.0037 ± 0.0017	-0.314	0.754
Waste storage(outdoor)	51	0.0038 ± 0.0017		
Surrounding(indoor)	56	0.0034 ± 0.0015	0.145	0.885
Surrounding(outdoor)	54	0.0033 ± 0.0011		

Abatement work 중 섬유상물질 발생 주요 요인을 추가적으로 파악하고자, 실내작업 시 위생설비입구 및 실외작업 시 위생설비입구 그리고 실내작업 시 설치된 음압기배출구 및 작업장주변실외 지점에서의 섬유상물질 농도를 비교하였다(표 6).

그 결과 실내작업 시 위생설비입구의 섬유상물질 검출률이 66.1%로 실외작업 시 위생설비 입구의 섬유상물질 검출 59.3%보다 7% 정도 높았으며, 검출된 섬유상물질의 평균농도가 각각 0.0054 f/cc와 0.0043 f/cc로 나타나 실내작업 시 위생설비입구의 섬유상물질 농도가 다소 높았지만, 유의한 차이가 나타나지 않았다($p>0.05$). 한편 실내작업 시 설치되는 음압기배출구와 실외작업 시 작업장 주변에서 측정되는 작업장주변실외 지점에서의 섬유상물질 검출률을 비교한 결과, 55.2%와 40.3%로 각각 나타나, 음압기배출구에서 더 높은 검출률을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 검출된 섬유상물질의 평균농도가 0.0052 f/cc와 0.0055 f/cc로 각각 나타나 차이가 없는 것으로 나타났다($p>0.05$).

실내작업 시 위생설비입구에서의 석면유출은 입구 주변 부실보양 및 작업자의 위생설비 이용절차 무시 등에 의해 발생할 수 있으며, 실외작업 시 위생설비입구에서의 석면유출은 기존 위생설비 이용절차 무시 등에 의한 영향에, 추가적으로 주변 실외 석면해체작업장의 작업절차 준수여부 등에 영향을 받을 수 있다. 음압기배출구의 경우에는 배출구 주변 보양상태 및 음압기필터 관리상태 등에 따라 석면이 유출될 가능성이 있다.

3. 석면해체제거사업장 비산석면 발생특성

1) 정성 및 정량 평가

위상차현미경을 이용한 섬유상물질 분석결과, 석면해체제거사업장 배출허용기준인 0.01 f/cc를 초과하는 시료에 대해서 투과전자현미경을 이용한 정성 및 정량 분석을 실시하였다. 분석감도는 0.0009 f/cc로 1개의 석면섬유도 관찰되지 않은 경우, 불검출로 간주하였다.

표 7에 석면해체제거사업장 배출허용기준을 초과하는 시료에 대한 투과전자현미경 정성 분석결과를 나타내었다. 앞서 석면해체제거 사업장 주변 총 1,555개의 시료에 대한 섬유상물질 분석결과, 488개 시료에서 검출한계 이상의 결과가 나타났으며, 검출한계 이상의 시료 488개 중 24개의 시료에서 석면해체제거사업장 배출허용기준인 0.01 f/cc 보다 높은 농도가 나타났다. 구체적으로 Abatement work 22건, Waste storage 1건, Surrounding 1건에서 나타났다. 결과적으로 석면해체제거사업장 주변에서 채취된 시료 1,555개 중 24개의 시료에서 섬유상물질을 기준으로 한 석면해체제거사업장 배출허용기준을 초과한 결과가 나타났다.

투과전자현미경을 이용한 분석결과 해당 24개의 시료 중 21개 시료에서 석면이 검출되었으며, 구

Table 6. Comparison of the main potential air-borne fibrous material source in indoor and outdoor ACM abatement work

Sampling site	Total (n)	Detection (n)	Detection rate(%)	Mean ± SD(f/cc)	t	p
Decontamination chamber entrance (for indoor work)	121	80	66.1	0.0054 ± 0.0054	1.607	0.111
Decontamination chamber entrance (for outdoor work)	54	32	59.3	0.0043 ± 0.0020		
Negative pressure filtration flow-out (indoor work only)	210	116	55.2	0.0052 ± 0.0053	-0.261	0.798
Around Abatement work site (outdoor work only)	72	29	40.3	0.0055 ± 0.0054		

체적으로 Abatement work 19건, Waste storage 1건, Surrounding 1건에서 석면이 검출되어, 대부분의 석면 검출이 Abatement work, 즉 석면해체제거 작업장에 근접한 지점에서 나타났다. 최종적으로 석면해체제거사업장 배출허용기준을 초과한 시료는 전체 시료의 1.3% 인 것으로 나타났다. 한편 초과 검출된 석면의 73%가 백석면, 26%가 갈석면 그리고 나머지 1%가 트레몰라이트 석면 및 악티놀라이트 석면인 것으로 각각 나타나, 비산되어 포집된 시료에는 백석면 및 갈석면이 주로 검출되었다.

Berman과 Crump(7)에 따르면 백석면에 의한 폐암잠재성은 각섬석계 석면의 20% 정도로 평가하였지만, 통계적으로 유의하지 않아, 백석면과 각섬석계의 폐암잠재성은 같다는 가능성을 열어두었다. 악성중피종에 대한 잠재성은 각섬석계 석면에 비해 백석면은 0.2%에 불과하다고 평가하였다.

후속연구인 Berman과 Crump(8~9)에서는 각섬석계 석면 대비 백석면 폐암잠재성을 27%와 11%로 각각 평가하여 각섬석계 석면 대비 백석면의 폐암잠재성을 낮게 평가하였다. 한편 악성중피종에 대한 잠재성은 0.13%와 잠재성 없음(zero potency)로 평가하여, 각섬석계석면 대비 백석면의 악성중피종 잠재성을 낮거나 없는 것으로 평가하였다.

본 연구에서 검출된 석면 중 73%의 비중으로 나타난 백석면의 경우 각석섬계 석면에 비해 폐암 및 악성중피종을 유발하는 잠재성이 낮은 것으로 보고되고 있지만, 상대적으로 유해한 각석섬계 석면이 나머지 27%를 차지하고 있는 것으로 나타났다.

한편 배출허용기준 초과시료에 대한 정량평가 결과(표 8), 평균 비산석면 농도는 0.0139 f/cc로 섬유상물질의 평균농도인 0.0185 f/cc 보다 낮게 나타났으며, 유의한 차이를 나타냈다($p < 0.05$). 이는 석면 정성분석이 불가능한 위상차현미경 분석을 통해 석면으로 간주되었던 물질이, 석면이

Table 7. Result of the analysis in asbestos type for the sample exceeding asbestos permissible emission level

Total (N)	PCM(N)		TEM(N)	Asbestos type(%)		
	Air-born fibrous material detected[1)]	Exceeding asbestos permissible emission level[2)]	Asbestos verified[3)]	Chrysotile	Amosite	Tremolite /Actinolite
1,555	488	24	21/24	73	26	1

1) Detection limit is 7 fiber/mm^2 in PCM
2) Asbestos permissible emission level is 0.01 f/cc around asbestos abatement site in Korea the number of sampling site exceeding asbestos permissible emission level was 22, 1, 1 for Abatement work, Waste storage and Surrounding, respectively.
3) Sensitivity is 0.0009 f/cc in TEM
the number of asbestos verified sample was 19, 1, 1 for Abatement work, Waste storage and Surrounding, respectively.

Table 8. Comparison of the analysis result in PCM and TEM

	N	Mean ± SD(f/cc)	Z[2)]	p[2)]
PCM[1)]	24	0.0185 ± 0.0084	-2.032	0.042*
TEM	24	0.0139 ± 0.0128		

1) Sample for exceeding asbestos permissible emission level(≥ 0.01 f/cc) only
2) Mann-Whitney U test was used(because of N < 30)
* $p < 0.05$

아닌 것으로 판정되어, 투과전자현미경 분석시 계수가 되지 않아, 정량분석 결과에 영향을 주었기 때문이다.

분석결과 위상차현미경 결과가 투과전자현미경 결과에 비해 실제 석면농도를 과대평가 할 가능성이 있다고 사료된다.

2) 입자의 크기에 따른 평가

ATSDR(10); Lippmman(11); Wylie 等(12)에서는 너비가 2~5㎛ 이상인 두꺼운 석면은 폐에 도달하기 힘들지만, 그 이하인 얇은 석면의 경우 폐포 내부 깊숙한 부분까지 침투가 가능하다고 보고하고 있으며, Ilgren(13)에서는 너비가 1㎛보다 큰 섬유의 경우 폐포의 공기 공간(alveolar air spaces)에 다다르지 못하는 반면, 너비가 0.5㎛보다 작은 섬유의 경우 폐 깊숙한 공간까지 침투가 가능하다고 보고하고 있다. Wylie 等(12)에서는, 얇은석면 중에서도 너비가 1㎛보다 큰 석면은 폐암 또는 악성중피종을 유발하기 쉽지 않다는 보고하고 있어 1㎛보다 작은 석면이 결과적으로 폐암 및 악성중피종을 유발할 수 있다고 보고하고 있다. 또한 Berman과 Crump(8)의 연구에 의하면 10㎛ 이상이면서 너비 0.4㎛ 이하인 석면이 발암잠재성을 가지고 있는 것으로 보고하고 있으며, Loomis 等(14)에서는 길이 5~10㎛이면서 너비 0.25㎛ 이하인 석면이 폐암사망율과 관련하여 가장 관련도가 높은 것으로 보고하고 있다.

본 연구는 석면의 크기 인자 중 상관관계가 비교적 명확한 너비를 먼저 고려하였다. 그래서 폐암 및 악성중피종을 유발할 수 있다고 보고된 너비 1.0㎛ 및 0.4㎛ 이하인 석면을 각각 기준으로 하여, 실제 석면해체제거사업장에 발생되는 석면의 너비분포를 파악하고자 하였다.

배출허용기준 초과시료에서 검출된 석면의 평균너비 및 너비분포를 표 9에 나타내었다. 검출된 석면의 평균너비는 0.738(0.150~9.980) ㎛로 나타났다. 폐암 및 악성중피종을 유발할 수 있는, 너비 1.0㎛ 이하인 석면과 그 중 너비 0.4㎛ 이하인 석면은 82% 및 38%의 비율을 차지하는 것으로 각각 나타났다.

검출된 석면 중 너비 1.0 ㎛인 석면의 길이분포와, 그 중 너비 0.4 ㎛ 이하인 석면의 길이분포를 비교하기 위해, 평균비교분석을 실시하였다(표 10).

그 결과 해당 범위에 속하는 석면의 평균길이는 너비 1.0㎛ 및 0.4㎛ 각각에 대해서, 11.7㎛ 및 10.8㎛로 각각 나타났으며, 유의한 차이가 나타나진 않았다($p > 0.05$).

Blake 等(15)과 Plumlee 等(16)에 의하면 석면과 같은 섬유의 길이는 대식세포(Macro phage)가 폐 내 섬유들을 제거하는데 관여하는 중요한 요소 중 하나인데, Ilgren(17~18)에 의하면 인간의 대식세포의 크기는, 대략적으로 10~15㎛이며, 크기가 5㎛ 미만인 섬유는 대식세포에 의해 제거될 가능성이 높아, 생물학적으로 발암잠재성이 떨어지지만, 10~15㎛이거나 그 이상인 섬유의 경우 대식세포의 크기와 비슷하거나 크기 때문

Table 9. Width distribution of the detected asbestos fiber

N	Mean (㎛)	Median (㎛)	P90 (㎛)	Interquartile range(Q1-Q3)	Range (min-max)	Width ≤ 1.0㎛ (%)	Width ≤ 0.4㎛ (%)
369	0.738	0.500	1.400	0.450 (0.350~0.800)	9.830 (0.150~9.980)	82	38

Table 10. Comparison of the fiber length in width ≤1.0㎛ fiber and width ≤0.4㎛ fiber

Classification	N	Mean ± SD (㎛)	t	p	Length ≥ 10㎛ (%)
Length(width ≤ 1.0)	305	11.7 ± 8.1	1.407	0.160	45
Length(width ≤ 0.4)	141	10.8 ± 5.7			40

Table 11. Correlation between width and Aspect ratio in asbestos fiber(width ≤1.0)

Variable	Width	Aspect ratio
Width	1	
Aspect ratio	-0.419*	1

* $p < 0.01$

에 섭취가 곤란하여, 장기간 폐에 남아있을 확률이 훨씬 높다고 보고하고 있으며, 몇몇 대식세포는 큰 섬유를 섭취하기 위해 노력하며, 그 과정에서 염증전구물질(inflammatory cytokines) 및 다른 화학물질을 주변 폐조직들로 배출하면서 괴사하는데, 이러한 섬유와 세포의 상호작용에 의해 폐 내에 섬유소모양의 콜라겐(collagen)이 형성되며, 그 결과 폐의 섬유화(Fibrosis) 또는 석면폐증(Asbestosis)가 나타난다고 보고하고 있다. 섬유화 및 석면폐증을 유발하는 길이 10~15㎛이거나 그 이상인 석면의 비율은 너비 1.0㎛ 이하 및 너비 0.4㎛ 이하 석면에 대해서 45%, 40%로 각각 나타났다(표 10).

Loomis 等(14)에서는 석면의 발암위해성을 너비는 얇으면 얇을수록, 동시에 길이는 길수록 높은 것으로 평가하고 있다. 이에 검출된 석면 중 얇은 범주에 속하는 너비 1.0㎛ 이하인 석면을 단위너비 당 길이정보를 나타내는 길이대너비 비율로 나타내, 너비와 단위너비당 길이의 상관관계를 분석하였다(표 11). 그 결과 다소 높은 음의 상관관계가 나타나(-0.419, $p < 0.01$), 검출된 석면 중 너비 1.0㎛ 미만인 석면은 얇으면 얇을수록, 단위너비당 길이가 긴 성향이 다소 높은 것으로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 석면해체제거사업장 내 비산석면을 포함하는 섬유상물질을 조사하였으며, 검출된 섬유상물질 중 석면해체제거사업장 석면배출허용기준을 초과하는 시료에 대해서 석면에 대한 정성, 정량평가를 실시하였다. 또한 해당 시료의 석면의 종류, 크기 정보를 파악하였다.

석면해체제거작업장 주변(Abatement work)이 폐기물 반출 및 보관지점(Waste storage), 변두리지점(Surrounding)보다 섬유상물질농도가 높은 것으로 나타나($p < 0.05$), 석면해체제거작업이 작업장 주변 섬유상물질 발생에 근본적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

실내 또는 실외 작업조건에 따른 섬유상물질 검출률 및 발생농도 분석 결과, 실내작업으로 인한 섬유상물질 발생이 조금 더 빈번하며 높은 농도로 나타났지만, 유의한 차이를 나타내지 않았다($p > 0.05$).

석면해체제거사업장 내 배출허용기준보다 높은 석면이 발생한 건수는 약 1%에 불과하며, 대부분 석면해체제거작업장 주변에서 검출되었다. 그러나 폐암 및 악성중피종 유발 잠재성이 높은 각석섬계 석면이 27% 정도 검출되었으며, 폐 깊숙이 영향을 줄 수 있는 너비 1.0㎛ 이하인 석면은 전체 검출된 석면의 82%로 나타났다. 특히 해당 너비 범위 내 석면은 너비가 얇을수록, 단위너비당 길이가 긴 성향이 다소 높은 것으로 나타나($p < 0.01$), 노출 시 폐암 및 악성중피종 유발 잠재성이 다소 높은 것으로 나타났다. 이에 현장에서의 비산석면 유출 대응을 위한 신속한 감지가 필요하다 사료된다.

대부분의 비산석면은 현장시료채취 지점 중 작업장과 밀접한 채취지점에서 주로 검출되는 것으로 나타났다. 그러므로 작업장 관리를 위한 시료채취 시, 변두리 지점을 제외한 작업장과 밀접한 지점을 중심으로 하는 시료채취를 실시하는 한편, 채취량은 유효한 분석결과 도출에 필요한 최소량을 설정하여 채취한다면, 보다 신속하고 효과적인 관리가 가능할 것이라 판단된다.

참고문헌

1. Strohmeier, BR, Huntington, JC, Bunker, KL, Sanchez, MS, Allison, K and Lee, RJ : What is asbestos and why is it important? Challenges of defining and characterizing asbestos, Int Geol Rev, 52(7~8):801~872, 2010.
2. 환경부 : 석면, 알면 대비할 수 있어요, 2016.
3. 환경부 : 석면안전관리법, 2012.
4. Silverstein, MA, Welch, LS and Lemen, R : Developments in asbestos cancer risk assessment, Am. J. Ind. Med., 52(11): 850~858, 2009.
5. 환경부 : 석면 해체·제거 작업 사업장 주변 석면 비산관리를 위한 조사방법, 2012.
6. 국립환경과학원 : 실내공기질공정시험 기준, 2018.
7. Berman, DW and Crump, KS : Technical support document for a protocol to assess asbestos-related risk, Aeolus Inc., 2001.
8. Berman, DW and Crump, KS : Technical support document for a protocol to assess asbestos-related risk:Final draft, U.S. EPA, October 2003.
9. Berman, DW and Crump, KS : A Meta-Analysis of Asbestos-Related Cancer Risk That Addresses Fiber Size and Mineral Type, Crit. Rev. Toxicol., 38 (sup1):49~73, 2008.
10. Agency for toxic substances and disease registry(ATSDR) : Toxicological profile for asbestos, 2001.
11. Lippmann, M : Deposition and retention of inhaled fibres: effects on incidence of lung cancer and mesothelioma, Occup Environ Med, 51(12):793~798, 1994.
12. Wylie, AG, Bailey, KF, Kelse, JW and Lee, RJ : THE IMPORTANCE OF WIDTH IN ASBESTOS FIBER CARCINOGENICITY AND ITS IMPLICATIONS FOR PUBLIC POLICY, Am Ind Hyg Assoc J, 54(5):239~252, 1993.
13. Ilgren, E : Review : The Fiber Width of Coalinga Chrysotile : Reduced Respirability due to its Thick Nature in an Aerosol and its "Ultra-Thin" Nature in Aqueous Solution(In Vivo), Indoor Built Environ, 17(1):27~41, 2008.
14. Loomis, D, Dement, JM, Elliott, L, Richardson, D, Kuempel, ED and Stayner, L : Increased lung cancer mortality among chrysotile asbestos textile workers is more strongly associated with exposure to long thin fibres, Occup Environ Med, 69(8):564~568, 2012.
15. Blake, T, Castranova, V, Schwegler-Berry, D, Baron, P, Deye, GJ, Li, C and Jones, W : Effect of fiber length on glass fiber microfiber cytotoxicity, J. Toxicol. Environ. Health Part A, 54(4):243~259,1998.
16. Plumlee, GS, Morman, SA and Ziegler, TL : The Toxicological Geochemistry of Earth Materials: An Overview of Processes and the Interdisciplinary Methods Used to Understand Them, Rev Mineral Geochem, 64(1):5~57, 2006.
17. Ilgren, EB : The Biology of Cleavage Fragments : A Brief Synthesis and Analysis of Current Knowledge, Indoor Built Environ, 13(5):343~356, 2004.
18. Ilgren, E. : Review : The Fiber Length of Coalinga Chrysotile : Enhanced Clearance due to Its Short Nature in Aqueous Solution with a Brief Critique on"Short Fiber Toxicity", Indoor Built Environ, 17(1):5~26, 2008.