

석면의 측정 및 분석

산업안전보건연구원 연구원 권지운

1. 석면 분석의 개요

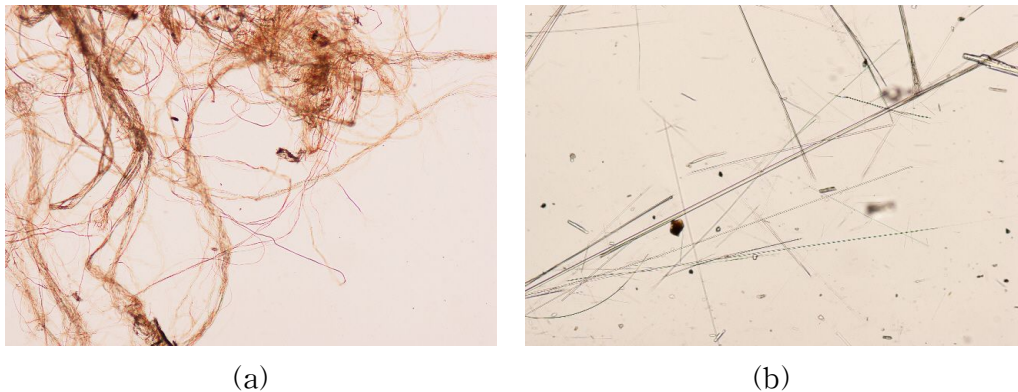
‘석면’이란 상업적으로 채취하고 이용된 자연계에 존재하는 6종의 섬유상 광물질을 칭하는 용어로 크게 사문석계(serpentines)와 각섬석계(amphiboles)의 2가지 광물군으로 구분할 수 있다. 사문석계에 속하는 석면으로는 백석면(chrysotile)이 있으며 나머지 5종인 갈석면(amosite), 청석면(crocidolite), 안소필라이트(anthophyllite), 트레모라이트(tremolite), 악티노라이트(actinolite)는 각섬석계의 석면으로 구분된다. 이들 6종의 석면은 화학적으로 각 석면별로 고유의 원소비를 가지는 결정형 실리케이트(silicate) 광물의 일종이다. 따라서 석면을 동정하고 함량을 분석하기 위해서는 섬유상의 형태와 석면특유의 화학조성 및 결정특성을 확인하여야 한다. 현재 국제적으로 널리 쓰이고 있는 석면의 분석기술들은 이들 세 가지 중 하나 이상의 석면의 특성 이용하여 분석하는 방법이다.

1.1. 형태 (morphology)

석면의 형태 관찰은 석면 분석 시 일반적인 다른 화학물질의 분석과 달리 현미경을 사용하게 되는 주된 요인이다. 석면 분석 시에는 목적에 따라 현미경을 사용하여 입자의 ‘길이 대 지름의 비(aspect ratio)’, 섬유의 형태가 곡선형으로 굽어 있는지 혹은 바늘과 같이 날카로운 직선형인지 여부, 섬유의 다발로 이루어져 있는지 여부 등을 관찰한다.

길이 대 지름의 비는 입자가 섬유상인지 비섬유상인지 구분하는 척도로 일반적으로 석면의 길이 대 지름의 비는 최소 20에서 1000에 이르는 것으로 알려져 있다. 공기 중 석면농도 계수분석 시에는 분석방법에 따라 길이 대 지름의 비를 3:1 또는 5:1을 적용하여 그 미만인 경우는 비섬유상의 물질로 구분하여 석면으로 계수하지 않는다. 또한 고형시료 중 석면 분석 시에는 길이 대 지름의 비 외에 섬유의 형태가 곡선형으로 굽어있는지 직선

형인지 여부를 관찰하여 사문석계의 석면인지 각섬석계의 석면인지를 구분하여 유추할 수 있다. 그 외에도 입자가 섬유상의 다발로 이루어져 있는지 여부 또한 고형시료 중 석면 분석 시 관찰하는 석면의 주요 형태적 특징 중 하나이다.



[그림 1] 대표적인 석면의 형태: (a)백석면, (b)갈석면

1.2. 화학 조성 (chemical composition)

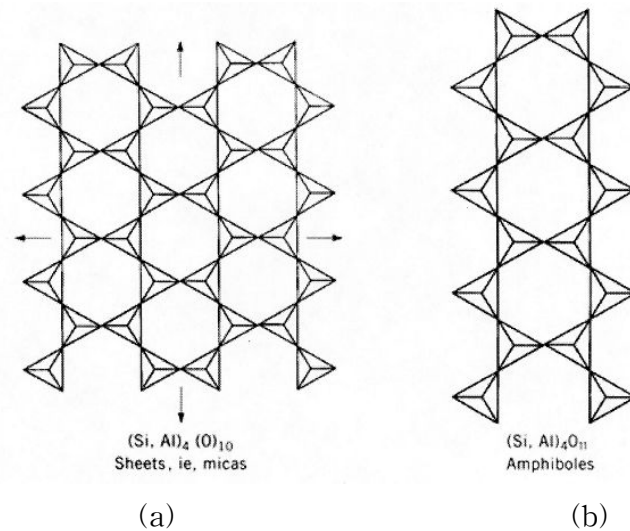
석면을 구성하는 화학식 또는 원소의 비율을 말한다. 석면을 구성하는 화학 조성은 같은 석면이라도 원산지에 따라 다소 차이가 있다. 명칭상의 석면 종류별 기본적인 화학 조성은 [표 1]과 같다.

[표 1] 석면의 화학조성

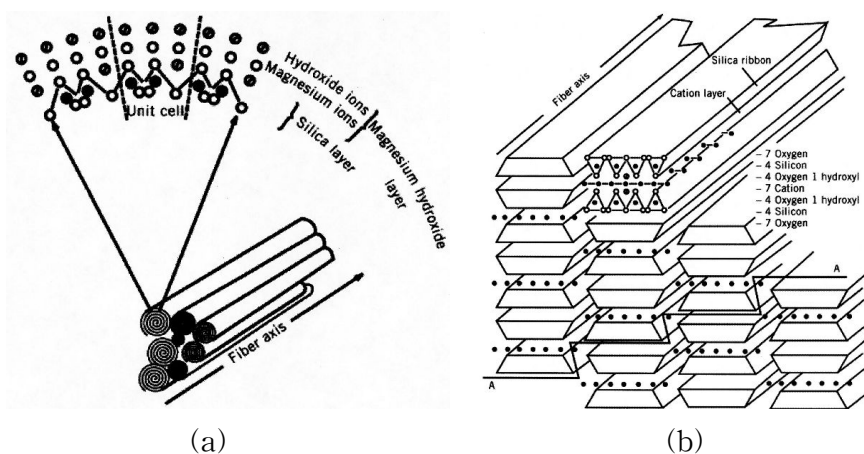
광물군	명칭	화학 조성	CAS No.
사문석계	Chrysotile	$Mg_3Si_2O_4(OH)_4$	12001-29-5
각섬석계	Amosite	$(Fe^{+2})_2(Fe^{+2}, Mg)_5Si_8O_{22}(OH)_2$	12172-73-5
	Crocidolite	$Na_2(Fe^{+2}, Mg)_3Fe^{+3}Si_8O_{22}(OH)_2$	12001-28-4
	Anthophyllite	$Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$	17068-78-9
	Tremolite	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	14567-73-8
	Actinolite	$Ca_2(Mg, Fe^{+2})Si_8O_{22}(OH)_2$	12172-67-7

1.3. 결정 구조 (crystal structure)

석면 특유의 미시적, 거시적 성질은 석면 고유의 독특한 결정 구조에서 기인하다. 따라서 편광현미경을 이용한 석면의 분석 시에는 이러한 석면의 결정 구조적 특성에서 기인하는 여러 가지 광학적 특성을 이용하여 분석하게 된다.



[그림 2] 석면의 실리케이트 결정구조: (a)백석면의 면상형 실리케이트 구조; (b)각섬석류의 이중체인형 실리케이트 구조

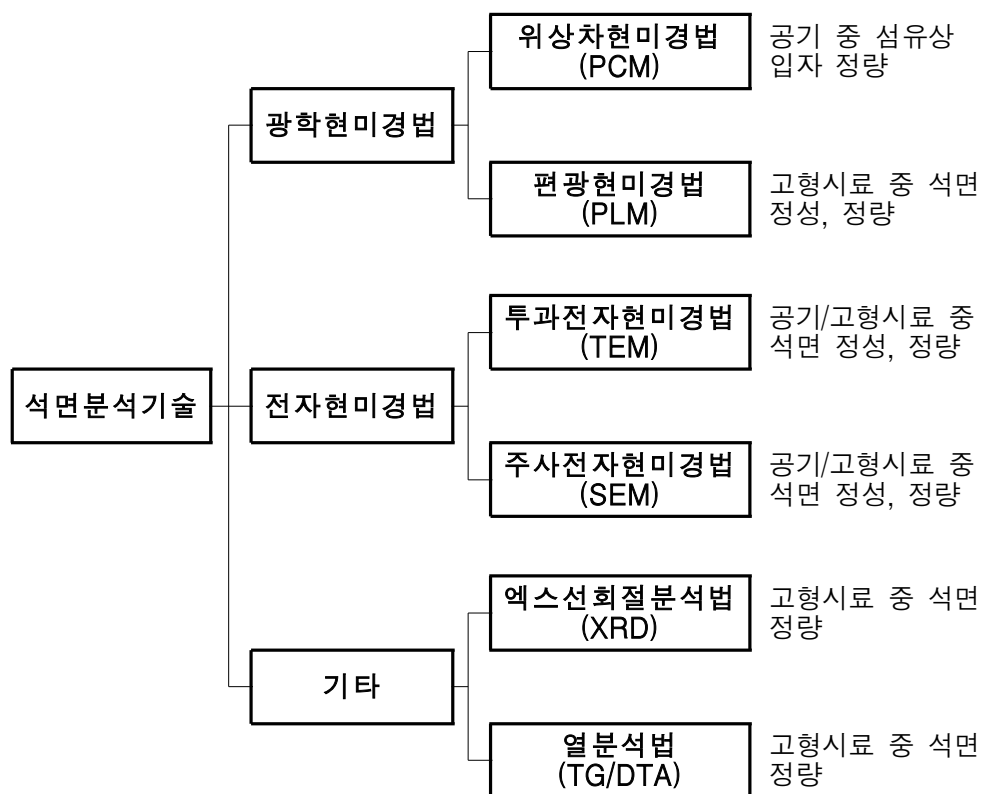


[그림 3] 석면섬유의 미세 구조: (a)백석면; (b)각섬석류

2. 석면 측정 · 분석법

석면의 분석은 목적에 따라 필터에 채취된 공기 중 석면 섬유 농도의 계수분 석과 건축자재 등 고형시료 중의 석면 함유율 분석으로 구분할 수 있다.

공기 중 석면 섬유 농도의 계수분석에 널리 사용되고 있는 분석기술로는 위차 현미경법(PCM), 투과전자현미경법(TEM), 주사전자현미경법(SEM) 등이 있으며 이 중에서 위상차현미경법이 세계적으로 가장 보편적으로 사용되고 있으며 미국 EPA에서는 투과전자현미경법을 주로 사용하고 있다. 고형시료 중의 석면 분석기술로는 편광현미경법(PLM), 투과전자현미경법(TEM), 주사전자현미경법(SEM), 엑스선회절분석법(XRD), 열분석법(TG-DTA) 등이 있으며 이 중에서 편광현미경법과 투과전자현미경법이 가장 보편적으로 사용되고 있는 분석기술이다.

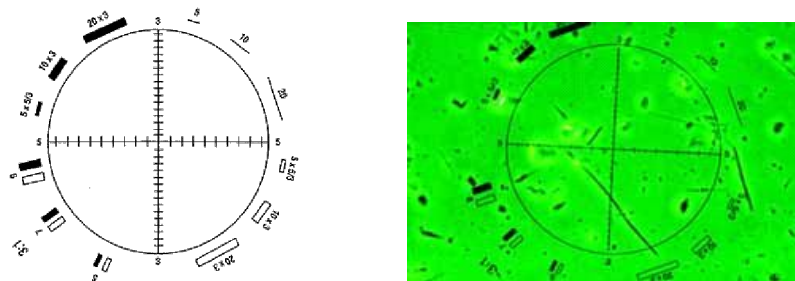


[그림 4] 대표적인 석면분석기술 분류

2.1. 위상차현미경법(Phase Contrast Microscopy, PCM)

공기 중 석면 섬유 분석에 중 가장 일반적으로 널리 사용되는 광학현미경법 중의 하나이다. 시료 채취 매체로 0.8 μm pore size, 지름 25 mm의 MCE 필터를 사용하여 공기 중의 입자상 물질을 채취한 후 슬라이드 형태로 전처리하여 위상차현미경에서 관찰하여, 현미경 시야 상의 지름 100 mm인 Walton-Beckett 그라티쿨 내의 섬유상 물질을 약속된 계수법에 따라 계수하는 방법이다.

주요 측정·분석방법으로는 미국 NIOSH NMAM #7400, 미국 OSHA ID-160, 영국 HSE MDHS 39/4 등이 있다.



[그림 5] Walton-Beckett 그라티쿨과 위상차현미경에서 갈석면을 관찰한 모습

장점: 위상차현미경법은 전처리가 비교적 간편하여 전처리 중 시료의 훼손 가능성이 적고 빠른 분석결과 산출이 가능하다. 장비의 이동이 쉬워서 건축물의 석면 해체작업장에서의 석면노출을 매일 모니터링(daily monitoring) 시 현장에서 빠르게 분석 결과를 산출할 수 있다.

현행 노동부 산업안전보건법 상의 작업환경 중 공기 중 석면노출에 대한 8시간 시간가중평균(TWA) 노출기준인 0.1 fibers/cc와 환경부 다중이용시설법의 관리기준인 0.01 fibers/cc는 위상차현미경법에 의한 분석결과를 기준으로 한 것이므로 위상차현미경법을 이용하여 적절히 시료채취전략을 수립하여 채취·분석할 경우 근로자 개인시료와 지역시료의 노출(관리)기준과 비교평가에 모두 적용할 수 있다. 또한 과거의 국내외 역학조사와 작업환경측정 자료 또한 대부분 위상차현미경법으로 분석할 결과이므로 석면섬유 노출에 대한 위해도 평가에도 적절히 적용할 수 있다.

단점: 위상차현미경법은 앞에서 언급한 석면분석을 위한 석면의 3가지 특징 중 길이 대 지름의 비(aspect ratio) 만을 이용하여 섬유상 입자와 비섬유상 입자를 구분·분석하므로 석면이 아닌 섬유와 석면 섬유를 구분하지 못하고 모두 석면으로 간주하여 분석한다. 따라서 비석면 섬유상 물질은 분석의 방해물질로 작용하므로 이러한 입자의 농도가 높은 환경에는 위상차현미경법을 적용하기 어렵다. 비석면 섬유와 석면 섬유의 구분 분석이 필요한 경우는 주사전자현미경(SEM)이나 투과전자현미경(TEM) 등을 이용하여 화학조성이나 결정특성 등을 추가로 분석해서 석면인지 여부와 석면의 종류를 구분하여 분석하여야 한다. 또한 비섬유상 입자의 농도가 높은 경우 현미경 시야에서 섬유상 입자의 관찰이 어렵게 되므로 본 측정·분석방법의 검출한계를 증가시키는 방해물질로 작용한다.

위상차현미경법은 현미경의 분해능과 확대배율의 한계로 인해 채취된 모든 석면을 검출할 수 없으며, 백석면은 약 0.25 μm , 기타 각섬석류는 약 0.15 μm 이상의 지름을 가지는 석면섬유만을 검출할 수 있다. 예를 들어 섬유의 길이가 10 μm 이며 길이 대 지름의 비가 100:1인 경우, 지름이 0.1 μm 로 위상차현미경법으로는 검출이 불가능하다. 즉, 위상차현미경으로 관찰되는 모든 섬유는 현미경 시야 상에서는 가는 섬유형태로 보이더라도 사실은 섬유의 다발이며, 각각의 개별 섬유를 관찰하려면 투과전자현미경법(TEM)을 사용하여야 한다.

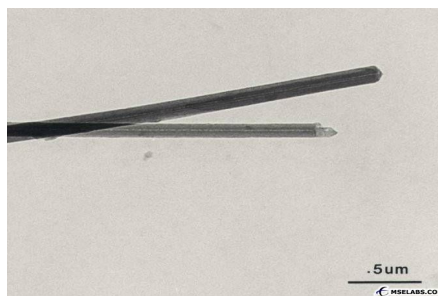
[표 2] 공기 중 석면 분석방법과 적용 범위

분석법	적용 범위
위상차현미경법(PCM)	모든 섬유상 입자의 계수 - 형태 확인(섬유상 입자 중 석면과 비석면, 석면의 종류를 구분할 수 없음)
주사전자현미경법(SEM)	일부 섬유상 입자 구분 - 형태, 원소 조성 확인
투과전자현미경법(TEM)	모든 섬유상 입자 구분 - 형태, 원소 조성, 결정 구조 확인

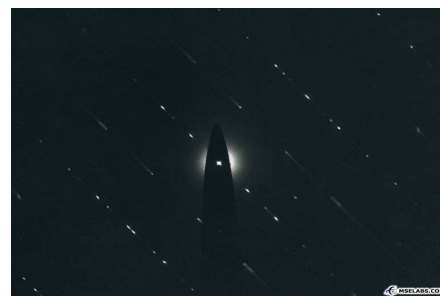
2.2. 투과전자현미경법(Transmission Electron Microscopy, TEM)

투과전자현미경법은 석면의 동정에 있어서 현재까지 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 궁극적인 방법이다. 필터에 채취된 공기 중 석면의 계수 분석과 고형시료의 석면 함유율 분석에 모두 적용 가능하다. 측정·분석법에 따라 250~1,000배의 배율로 시료 중의 입자가 섬유상 물질인지 형태를 확인한 후 10,000배 이상의 배율에서 현미경에 장착된 EDXA(energy dispersive X-ray analyzer)로 물질의 화학 조성을 확인하고 SAED(selected area electron diffraction)로 결정의 회절무늬를 확인하여 석면을 분석한다. 이와 같이 EDXA나 SAED를 장착하여 물질의 화학적 특성 분석이 가능한 전자현미경을 분석전자현미경(analytical electron microscope, AEM)이라고 한다.

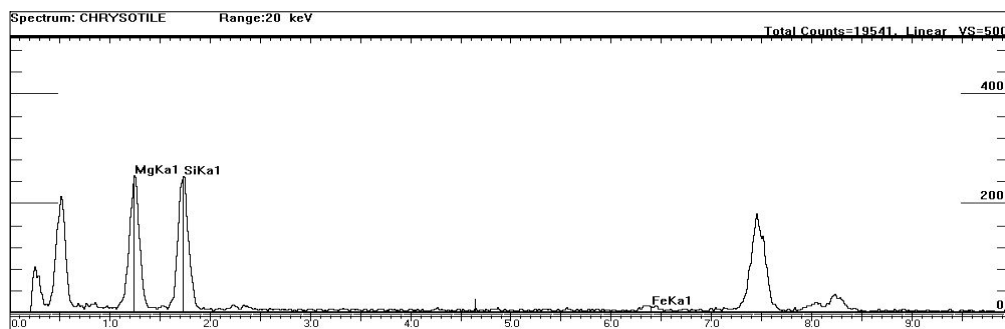
주요 측정·분석방법으로는 미국 NIOSH NMAM #7402, 미국 EPA 600/R93-116, 미국 EPA AHERA TEM Method 등이 있다.



(a)



(b)



(c)

[그림 6] 투과전자현미경을 이용한 백석면 분석: (a)섬유 형태, (b)SAED 패턴, (c)EDXA 스펙트럼

장점: 투과전자현미경법은 석면의 정확한 동정을 위하여 확인하여야 하는 3가지 사항인 형태, 화학 조성, 결정 구조를 모두 확인 가능한 가장 정확한 방법으로 여겨지는 석면 분석법이다. 투과전자현미경은 약 100,000배의 확대배율에서 약 10 nm 이상의 분해능으로 이미지를 관찰할 수 있기 때문에 가장 가는 석면 개별 섬유(약 0.02 μm)까지 관찰 가능하다. 따라서 위상차현미경이나 편광현미경법에서 관찰할 수 없는 매우 가늘거나 짧은 석면섬유도 분석이 가능하고 검출한계 또한 가장 낮다. 이러한 장점 때문에 투과전자현미경법은 건축물 중 석면의 해체작업이 끝나고 난 후 작업 완결여부의 확인을 위한 공기 중 석면 섬유농도의 분석, 매우 낮은 석면 섬유농도를 보이는 일반 환경 공기 중의 석면 분석, 비석면 섬유상 입자가 다량 발생할 수 있는 학교, 지하철 역사 등의 공기 중 석면분석 등에 주로 적용되며 고형시료 중 석면분석 시에는 비닐바닥타일(리놀륨) 등과 같이 매우 짧거나 가늘어서 편광현미경에서 관찰이 어려운 석면(지름 1 μm 이하)을 함유한 고형시료의 분석 등에도 적용가능하다.

단점: 투과전자현미경법은 가장 정확하게 석면을 동정할 수 있는 분석법이지만 공기 중 시료 분석에 적용 시 현행 국내 노출(관리)기준과 대부분의 과거 역학조사 자료 등은 위상차현미경법을 이용한 결과이므로 투과전자현미경의 분석결과를 이와 직접 비교하는 것은 불가능하다. 이런 단점을 보완하기 위해서 미국 EPA AHERA Method에서는 공기 중 시료의 분석결과를 공시료에서 검출된 섬유 수와 비교하거나, 평가하고자 하는 실내와 실외를 동시에 측정하여 나온 분석결과를 비교하여 결과를 해석한다. 위상차현미경과 유사한 결과를 얻기 위해 지름 0.25 μm 이상의 섬유만을 계수하는 방법인 PCM Equivalent(PCME) Counting Method를 이용하는 계수법도 사용하고 있으나 이 경우에도 투과전자현미경의 분해능과 확대배율이 높아 위상차현미경의 값과 직접적인 비교는 불가능하다. NIOSH NMAM #7402의 경우 석면섬유의 농도를 계수하기위한 방법이 아니라 PCM Equivalent(PCME) Counting Method를 통해서 PCME 섬유 중 석면섬유의 비율을 계산하여 위상차현미경법에서의 결과를 보정하기 위한 분석방법이다.

이 외에도 투과전자현미경법은 시료의 전처리 과정이 복잡하여 전처리 중 시료의 훼손 가능성이 상대적으로 높고 분석에 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다.

2.3. 주사전자현미경법(Scanning Electron Microscopy, SEM)

주사전자현미경법은 EDXA를 장착하여 섬유상 물질의 화학 조성의 확인이 가능한 전자현미경법의 일종으로 주로 영국, 독일 등 유럽에서 주로 사용되고 있으나 위상차현미경법이나 투과전자현미경법에 비해 상대적으로 널리 사용되고 있는 방법은 아니다. 필터에 채취된 공기 중 석면의 계수 분석과 고형시료의 석면 함유율 분석에 모두 적용 가능하다.

주요 측정·분석방법으로는 영국 MDHS 87, 독일 VDI 3492 및 3866 Blatt5 등이 있다.

장점: EDXA를 장착하여 섬유상 물질의 화학 조성을 확인할 수 있어 석면, 비석면 및 석면의 종류 확인이 가능하다. 또한 투과전자현미경에 비해 해상도가 높아서 석면의 형태 관찰이 상대적으로 용이하며 시료의 전처리가 투과전자현미경에 비해 상대적으로 간편하여 비교적 저렴한 비용과 시간으로 비교적 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

단점: SAED를 이용한 시료의 결정구조 확인이 불가능하므로 투과전자현미경법에 비해 분석의 신뢰도가 떨어진다. 또한 국제적으로 주사전자현미경법을 이용한 석면분석법에 대한 정도관리프로그램이 없어서 외부정도관리를 통한 분석결과와 정확도 관리가 어려운 측면이 있다.

2.4. 편광현미경법(Polarized Light Microscopy, PLM)

편광현미경법은 고형시료 중에서 석면의 동정 및 함유율 분석에 가장 널리 사용되고 있는 광학현미경법 중의 하나이다. 100~400배의 배율로 관찰하며 석면의 형태, 굴절률, 분산염색의 색깔, 교차편광, 복굴절, 소멸각, 신장부호를 관찰하여 석면 여부 및 석면의 종류를 동정하고 함유율을 정량분석한다. 편광현미경을 이용한 정량분석 방법은 그 방법에 따라 현미경 시야 상에 나타나는 석면의 면적비율을 통해 육안으로 정량하는 시야평가(visual estimation)법, 시야 내 정해진 포인트에 겹치는 입자 중 석면의 비율을 계수하여 평가하는 포인트카운팅(point counting)법, 석면 함유의 중량비율 평가를 위한 중량법(gravimetric analysis), 분석 정확도 및 정밀도를 높이기 위해 시야평가법과 포인트카운팅법을 혼용한 계층화된 정량법

(stratified method) 등이 있다. 현재 국내 대부분의 고형석면 전문분석기관들은 고형시료 중 석면 함유율 정량 시 시야평가법을 사용하고 있다.

대표적인 측정·분석방법으로는 미국 NIOSH NMAM 9002, 미국 OSHA ID-191, 미국 EPA 600/M4-82-020, 미국 EPA 600/R93-116 등이 있다.

장점: 대부분의 고형시료의 석면함유율 분석에 검출한계 1% 기준으로 보편·타당하게 적용할 수 있는 방법으로, 시료의 전처리가 간편하고 분석시간이 타 분석법에 비해 상대적으로 짧다.

단점: 분석에 필요한 광학적 성질을 모두 육안으로 확인하므로 석면의 동정 시 오류가 발생할 가능성이 크므로 분석자의 경험과 능력이 크게 요구되는 분석기술이다. 고형시료의 석면함유율은 그 정확도가 큰 의미를 가지지는 않으나 시야평가법을 이용한 정량 시에는 분석자의 시야에 의존하기 때문에 10% 이하의 낮은 함량에서 분석결과의 변이가 매우 크다. 또한 편광현미경법은 석면 함유 중량비율(%w/w)를 직접적으로 산출할 수 없으며, 검출한계인 1% 이하 수준의 낮은 석면 함유율의 고형시료에 대한 정량이 어렵다. 100~400배의 비교적 낮은 배율로 분석하므로 비닐바닥타일(리놀륨), 매스틱, 가스켓 중의 석면 등 가늘고 짧은 석면섬유가 많은 시료의 경우 분석 시 정량에 큰 오차가 발생하거나 석면이 불검출되는 음성오류(false negative error)가 발생할 수도 있다.

[표 3] 편광현미경 분석 시 수용 가능한 오차 범위 (400 포인트 카운트 또는 100개 시야의 시각평가법 적용 시)

% Area Asbestos	Acceptable Mean Result	% Area Asbestos	Acceptable Mean Result
1	>0-3%	50	40-60%
5	>1-9%	60	50-70%
10	5-15%	70	60-80%
20	10-30%	80	70-90%
30	20-40%	90	80-100%
40	30-50%	100	90-100%

2.5. 엑스선회절분석법(X-Ray Diffractometer, XRD)

엑스선회절분석법은 고형시료 중에서 석면의 결정특성에서 기인하는 엑스선 회절 패턴의 유사성을 통해 석면을 검출하고, 이 중 특정 고유 피크의 세기(intensity)를 이용해 함유율을 분석하는 방법이다. 약 100 mg의 고형시료를 분쇄하여 펠렛(pellet) 형태로 제작 한 후 분석하고, 표준시료로부터 얻은 회귀방정식을 이용하여 석면의 함유율을 분석하게 된다.

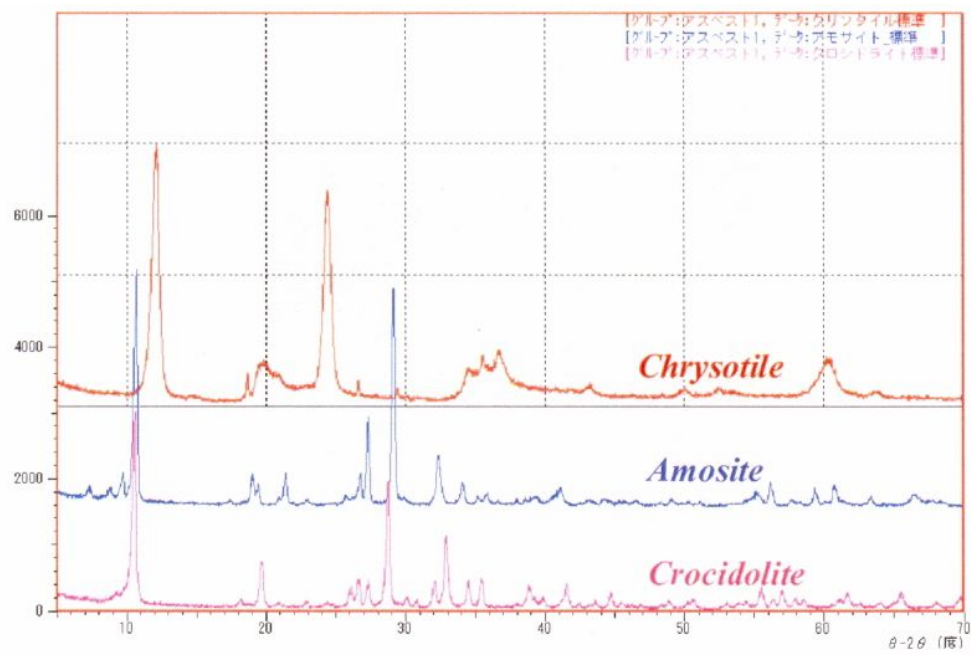
주요 측정·분석방법으로는 일본 JIS A 1481, 미국 NIOSH NMAM 9000, 미국 EPA 600/R93-116 등이 있다.

장점: 엑스선회절분석법의 가장 큰 장점은 고형 시료 중 석면함유의 중량비율(%w/w)을 분석할 수 있다는 점으로 현재 노동부의 산업안전보건법에서 석면 함유물질의 기준인 ‘중량비 1% 이상’의 평가에 가장 타당하게 적용할 수 있는 방법이다.

단점: 섬유상과 비섬유상 입자의 구분이 불가능하기 때문에 석면의 형태를 확인하기 위해 분산염색 대물렌즈가 부착된 위상차현미경이나 편광현미경을 병행해 사용하여야 하다. 따라서 엑스선회절분석기는 주로 석면의 동정 보다는 중량비율 산출을 위한 정량분석이나 석면 함유여부의 추가 확인의 목적으로 주로 이용된다.

[표 4] 엑스선회절분석 시 석면과 동일 EDX 패턴을 보이는 비석면 광물

Asbestiform	Nonasbestiform	CAS No.
Serpentine Chrysotile	Antigorite, Lizardite	12001-29-5
Ampfibole Anthophyllite asbestos Cummingtonite-grunerite asbestos(amosite) Crocidolite Tremolite Actinolite	Anthophyllite Cummingtonite-grunerite Riebeckite Tremolite Actinolite	77536-67-5 12172-73-5 12001-28-4 77536-68-6 77536-66-4



[그림 7] 석면의 엑스선 회절 분석 피크 패턴

3. 결론

석면의 분석에는 2장에서 기술한 바와 같이 다양한 분석기술을 적용한 측정·분석법이 사용되고 있으며 각 측정·분석법에 따라 분석결과도 적용하는 분석기술에 따라 차이를 보이게 된다. 선진국에서는 국가별로 석면의 표준 측정·분석법을 확립하고 각 분석실험실에는 목적에 따라 정해진 표준 측정·분석법에 따라 석면을 분석하도록 하고 있다. 그 예로 [표 5]에는 미국에서 사용되고 있는 대표적인 공기 중 석면농도 측정·분석법을 비교하였다. 같은 공기 중 석면농도 측정·분석법이지만 사용하는 분석기술, 섬유 정의 등이 다르고 분석결과 또한 다르게 표현되므로 측정·분석법의 적용범위도 서로 다르다. 따라서 석면의 측정·분석 결과는 어떤 측정·분석법을 사용하였는가에 따라 그 해석을 달리해야 하며, 향후 국내에서도 평가하고자 하는 목적에 따라 적용하는 측정·분석법을 법으로 명시할 필요가 있다.

[표 5] 대표적인 공기 중 석면 측정·분석법의 비교

	NMAM 7400	NMAM 7402	AHERA TEM
분석기술	위상차현미경법	투과전자현미경법	투과전자현미경법
섬유의 정의	aspect ratio: $\geq 3:1$ length: $\geq 5\mu\text{m}$ diameter: $\geq 0.25\mu\text{m}$	aspect ratio: $\geq 3:1$ length: $\geq 5\mu\text{m}$ diameter: $\geq 0.25\mu\text{m}$	aspect ratio: $\geq 5:1$ length: $\geq 0.5\mu\text{m}$
분석결과	fibers/cc	% of asbestos fiber in PCME fibers	structures/cc
적용범위	작업환경 중 개인/지역 시료의 섬유상 입자 농도 분석	NMAM 7400으로 분석한 섬유상 입자의 농도 중 석면섬유의 비율	석면해체/제거작업 후 작업 완결여부 확인

석면의 분석은 현미경을 통해 분석자의 육안으로 판단하고 분석하는 만큼 분석 중 오류발생의 가능성이 높고 분석결과에의 변이가 타 물질의 분석에 비해 매우 크다. 따라서 각 석면분석실험실은 적절한 정도관리 프로그램이나 실험실 인증프로그램에 참여하여 분석 시 발생할 수 있는 오류를 줄이고 분석결과에의 정확도 및 정밀도를 높일 수 있도록 지속적으로 노력하여야 한다.

이와 관련하여 산업안전보건연구원에서는 33대의 광학현미경과 엑스선회절분석기 및 전처리 시설 등을 갖춘 석면분석실을 구축하고 '07년 5월부터 위상차현미경을 이용한 공기 중 석면분석과 편광현미경을 이용한 고형시료 중 석면분석 2개 분야에 대한 석면분석자 양성교육을 실시하고 있다. 아울러 '07년도 하반기 중에는 공기 중 시료와 고형시료 2개 분야에 대한 석면분석 정도관리 프로그램을 국내에 도입·실시할 예정이다. 이러한 석면분석자 양성과 정도관리프로그램은 국가적 석면관리와 분석을 위해 필수적인 것으로 향후 크게 증가할 것으로 예상되는 국내 석면분석 수요에 대한 인프라를 구축하고 분석의 질을 향상시키는데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. U.S. Geological Survey (USGS): Asbestos: Geology, Mineralogy, Mining, and Use
2. Institute Of Medicine (IOM): Comparison of optical and electron microscopy for evaluating airborne asbestos, 1987
3. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH *Manual of Analytical Method* (NMAM) Chapter L - Measurement of fibers, 4th ed, 1994
4. U.S. EPA: A Discussion of Asbestos Detection Techniques for Air and Soil, 2004
5. U.S. EPA: Interim Method for the Determination of Asbestos in Bulk Insulation Samples, 1982
6. U.S. EPA: Method for the Determination of Asbestos in Bulk Building Materials, 1993
7. Health and Safety Laboratory (HSL): Methods for the Determination of Hazardous Substances (MDHS) 39/4, 1995
8. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH *Manual of Analytical Method* (NMAM) 7400, 4th ed, 1994
9. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH *Manual of Analytical Method* (NMAM) 7402, 4th ed, 1994
10. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH *Manual of Analytical Method* (NMAM) 9000, 4th ed, 1994
11. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): NIOSH *Manual of Analytical Method* (NMAM) 9002, 4th ed, 1994
12. Occupational Safety and Health Administration(OSHA): Method ID-160 In *OSHA Analytical Methods Manual*, 1990
13. Occupational Safety and Health Administration(OSHA): Method ID-191 In *OSHA Analytical Methods Manual*, 1990
14. National Occupational Health and Safety Commision (NOHSC): Guidance Note on the Membrane Filter Method for Estimation Airborne Asbestos Fibres, 2nd Edition, 2005

15. U.S. EPA Standard 40 CFR Part 763 Subpart E Appendix A: Interim Transmission Electron Microscopy Analytical Methods, 1997
16. 일본 후생노동성: 일본공업규격 JIS A 1481, 건재제품 속의 아스베스트 함유율 측정방법, 2006
17. 한정희 등, 에너지 분산 X-선 분석장치가 장착된 투과전자현미경을 이용한 석면분석방법
18. Ronald F. Dodson, Samuel P. Hammar: ASBESTOS-Risk Assessment, Epidemiology and Health Effects, 2006