

## 석면류 광물의 분석방법 제안

황진연

부산대학교 자연과학대학 지질환경과학과

최근 석면이 함유된 베이비파우더와 페석면 광산 주변의 환경문제 등으로 석면에 대한 관심이 급격히 커져, 이들 광물에 대한 분석법과 연구가 중요하게 부각되고 있다. 이러한 상황에 맞추어 석면의 분석방법과 국내 실정에 대해 소개하고자 한다.

석면(Asbestos)은 글자로 보아 돌에서 나온 섬유라는 의미로 볼 수 있다. 즉 천연의 돌에서 나온 광물질 섬유라고 할 수 있지만, 석면은 광물명이 아니고 광석명이나 상품명으로 사용되는 용어로서 섬유상 광물의 총칭이다. 천연에 산출하는 섬유상 광물은 매우 많은 종류가 있지만, 그동안 산업적으로 많이 사용되고 인체에 암을 유발하는 유해성이 인정되어, 세계보건기구(WHO) 및 국제노동기관(ILO)에서 공식적으로 유해한 것으로 정한 광물은 6가지로 국한된다. 즉, 사문석광물 족에 속하는 온석면(chrysotile, 백석면), 각섬석족에 속하는 황석면(amosite, 갈석면), 청석면(crocidolite), 직섬석(anthophyllite), 투각섬석(tremolite), 양기석(actinolite)으로 섬유상을 나타내는 광물들이다. 같은 광물명이라도 섬유상이 아니면 석면으로 취급되지 않는다(그림 1).

이들은 아주 미세한 섬유로 되어 있어 질기고 타지 않고 열에 강하며 썩지 않는 성질을 가지고 있어 끈의 소재로서 다양한 산업 분야에 활

용해 왔다. 그러나 이 물질은 인체에 폐암, 중피종 등을 유발하는 발암성이 인정되어 세계적으로 많은 규제가 되고 있고, 이미 사용된 석면물질이 많기 때문에 이에 대한 처리가 큰 문제로 대두되고 있다. 이와 같이 유해성 석면이 모두 천연의 지층에서 산출하기 때문에 석면의 분석과 처리에 대해서 광물학적 검토 및 연구가 필요하다.

석면의 분석에 대해서는 크게 공기 중의 분진에 대한 것과 건축자재 및 제품 등의 고형시료에 대한 것으로 나누어 분석방법이 다르게 되어 있다. 미국과 일본에서 사용되는 석면의 분석방법과 기준에 대해서 표 1에 정리하여 나타냈다(황진연, 2009). 공기 중 시료에 대해서는 위상차현미경(PCM)과 전자현미경(SEM, TEM)을 사용하는 방법이 제시되어 있다. 고형시료에 대해서는 일반적인 광물연구에 활용되는 거의 모든 기기들이 사용될 수 있다. 표에서 보듯이 편광현미경(PLM), X-선회절분석(XRD), SEM, TEM, DTG 등의 많은 기기를 사용할 수 있다. 고형시료는 석면과 함께 수반되는 바탕물질에 따라 사용기기 및 방법이 크게 달라질 수 있기 때문에, 정확한 분석이 경우에 따라 매우 어려워 전문가의 판단이 필요하게 된다. 고형시료의 종류가 다양하기 때문에 모든 고형시료에 대한 분석법이 제대로 마련되어 있지 않다

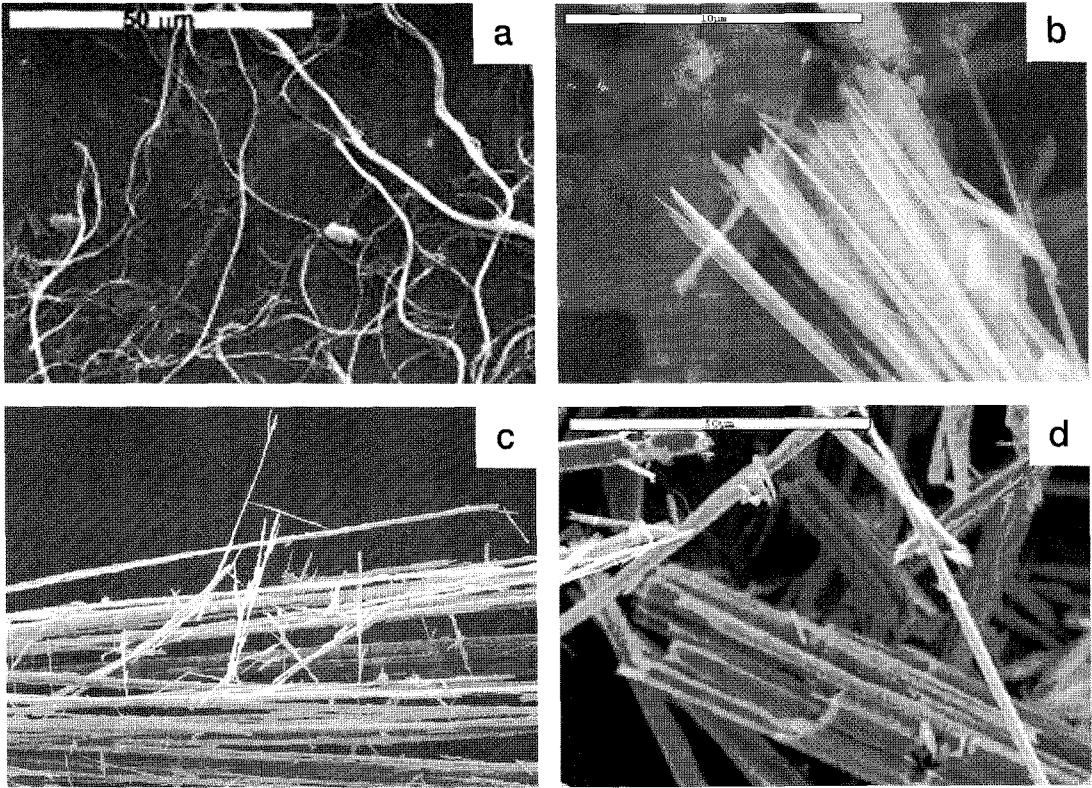


그림 1. 섬유형태를 보이는 석면광물의 SEM 관찰사진(a: 온석면, b: 투각섬석 석면, c: 청석면, d: 직섬석 석면)

## 공기 중 시료의 석면 분석

### 공기 분진의 포집 방법과 시편제작

공기 중의 분진이 포집되는 필터에도 공극크기, 직경, 재질 등이 다양하므로 목적에 따라 특별히 선택할 수 있다. 보통은 0.8μm 공극, 직경 25mm의 MCE 필터(membrane cellulose ester filter)를 사용한다. 이것을 공기흡입펌프에 연결하여 분진을 포집하는데, 펌프의 흡입 유량과 시간도 경우에 따라 달라질 수 있다. 분당 유량이 너무 낮으면 미세입자가 잘 채워지지 않을 수도 있고 너무 높아도 큰 입자가 흡입되

어 측정에 방해할 수 있으므로 0.5-16 L/min의 범위내에서 흡입한다. 보통은 10 L/min의 유속으로 2시간 흡입시켜 1200L의 공기분진을 채취한다.

채집된 필터는 아세톤 증기화장치를 사용하여 슬라이드글라스에 투명하게 증착시킨다. 그리고 트리아세틴을 떨어뜨리고 커버글라스를 붙여 현미경으로 관찰한다.

### 위상차 현미경

위상차 현미경은 물체에서 발생하는 미세한 위상의 차이를 진폭의 차이로 바꾸어서 높은 명

표 1. 대상물질에 따른 국내외 석면의 분석방법과 기준

분석대상		규정자료	분석방법	정성	정량	조건 및 기준	
공기 중 분진	NIOSH		PCM		△	필터: 0.45~1.2 $\mu$ m, MCE	
			TEM	○	○	L $\geq$ 5 $\mu$ m, D $\geq$ 0.25 $\mu$ m, L/D $\geq$ 3	
	JIS		PCM		총섬유	필터: 0.8 $\mu$ m, MCE L $\geq$ 5 $\mu$ m, D $\geq$ 3 $\mu$ m, L/D $\geq$ 3	
			PC·DSM	○	○		
			SEM	○	○		
		TEM	○	○			
산업안전 보건연구원	PCM		△	필터: 0.8 $\mu$ m, MCE L $\geq$ 5 $\mu$ m, D $\geq$ 0.25 $\mu$ m, L/D $\geq$ 3			
고형 시료	건자재	US EPA	PLM	○	○	필터: 0.4 $\mu$ m, PC	
			XRD	○	○	필터: 0.45 $\mu$ m, silver	
			TEM	○	○	필터: 0.2 혹은 0.22 $\mu$ m, MCE	
			SEM	○		필터: 0.2 혹은 0.22 $\mu$ m, MCE	
		NIOSH	PLM	○	○		
			XRD	○	○	필터: 0.4 $\mu$ m, silver	
		JIS	PC·DSM	○	○	L $\geq$ 5 $\mu$ m, D $\geq$ 3 $\mu$ m, L/D $\geq$ 3	
			PLM	○			
			XRD	○	◎	필터: 25mm, 불소수지유리섬유 (기저표준흡수보정법)	
		산업안전 보건연구원	PLM	○	○	필터: 0.8 $\mu$ m, MCE; 0.4 $\mu$ m, PC	
		기타 (광물)	JAWE 자료	XRD	○	○	활석시료: 표준시료혼합법
			JAWE 자료	DTG		○	사문암, 수할석 등의 시료

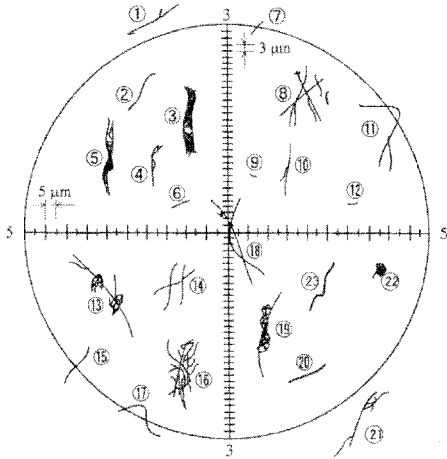
JAWE: Japan Association for Working Environment Measurement,

PC·DSM: 위상차분산현미경, DTG: 미분열중량분석법

암 차이의 이미지로 관찰할 수 있도록 고안된 현미경이다. 즉 미세한 입자도 명암차이를 크게 하여 잘 보이도록 한 것이다. 그러나 이것은 섬유상의 형태를 확인할 수 있으나, 섬유상 물질의 종류는 구분할 수 없다. 채집한 분진시료를 아세트 증착만 하였기 때문에 의류, 종이 등의 유기질 섬유가 포함될 수 있고, 이들과의 구분이 어렵기 때문에, 위상차현미경으로 관찰된 섬유상 물질은 석면이라 말할 수 없으며 모든 섬유를 포함한다.

섬유상 물질의 계수는 관찰되는 시야에 대하

여 일반적으로 규정된 계수법에 의해 갯수를 산출하고, 그에 해당되는 필터의 면적과 공기흡입량으로부터 계산하여 흡입량에 대한 섬유수로서 나타낸다. 계수 대상의 섬유도 기준이 여러 가지지만, 일반적으로 길이 5 $\mu$ m 이상, 폭 3 $\mu$ m 이하, 길이폭비(aspect ratio) 3 이상으로 규정하고 있다. 보통 400배의 배율로 관찰한다. 현미경의 시야에서 석면섬유가 다발로 나타날 수도 있고 일부만 보일 수도 있는데 이러한 여러 경우에 대한 계수방법이 그림 2와 같이 규정되어 있다. 관찰하는 현미경의 시야와 계수하는 섬유



① : 0	② : 1	③ : 0	④ : 1	⑤ : 0
⑥ : 1	⑦ : 1/2	⑧ : 4	⑨ : 0	⑩ : 1
⑪ : 1	⑫ : 1	⑬ : 0	⑭ : 3	⑮ : 1/2
⑯ : 0	⑰ : 0	⑱ : 2	⑲ : 0	⑳ : 1
㉑ : 0	㉒ : 0	㉓ : 1		

그림 2. 광학현미경에서 섬유상 입자의 계수 규정 유기질 물질의 제거와 분산염색방법.

의 수가 많을수록 정확성이 높아지기 때문에 많은 시야에 대해 많은 섬유를 계수하는 것이 좋다. 최저의 관찰범위도 각 기관에 따라 약간씩 다르다. 섬유수가 100개 이상을 계수하도록 할 수도 있지만, 섬유가 적어 100개 이상을 계수하지 못할 때에는 50시야 이상 관찰한 것을 분석치로 나타내도록 하는 경우도 있다.

전술한 바와 같이 공기 중에는 유기질 섬유가 포함되어 석면과 구분이 어렵게 될 수 있다. 따라서 이들 유기질물질을 제거하는 방법으로 저온회화장치를 사용하는데, 이는 플라즈마를 사용하여 낮은 온도에서 유기물질을 분해시키도록 하는 장치이다. 이 처리를 하고 나면 무기질 물질만 남게 되므로 석면을 더 잘 판별할 수 있다. 이러한 처리 후 시료에 대해 특정 석면의 굴절률에 해당되는 굴절액에 침액하게 되면 특정의 분산색이 나타나게 되므로 석면의 종류를 식별할 수 있게 되는데, 이러한 방법을 분산염색법이라 한다. 이러한 특정 분산색을 관찰하기 위해서는 위상차현미경에서 특수 분산용 대물렌즈가 필요하다. 이러한 특수렌즈가 장착된 현미경을 위상차분산현미경(PC·DSM)이라 하여 일본에서 주로 사용된다.

### 전자현미경(SEM, TEM) 관찰

공기 중 시료에 대하여 보다 정확하고 미세한 부분의 석면을 식별하기 위해서 전자현미경(SEM, TEM)을 사용하게 된다. SEM의 경우에는 분진을 채집한 멤브린필터를 그대로 카본코팅으로 시편을 만들든지, 아니면 전술한 것과 같은 저온회화장치로서 유기물을 제거시킨 시편을 코팅하여 관찰할 수도 있다. 공기 분진 채집시에 폴리카본네이트필터를 사용하여 그것을 SEM을 관찰할 수도 있다. SEM에 장착된 EDS를 통하여 화학성분을 분석하여 정확한 석면을 식별하게 된다. 섬유의 계수도 위상차현미경과 유사하게 일정 면적에 대한 섬유수를 계산하여 나타낸다.

투과전자현미경(TEM)의 경우는 측정 시편을 만드는 것이 과정이 매우 복잡하고 정교한 기술이 요구된다. 저온회화장치로서 유기물을 제거시킨 후에 입자들을 재포집하여 여러 과정을 거쳐 시편을 만들는데, 기관에 따라 방법이 다소 다르다.

## 고형시료

### 건축자재

석면을 건축자재에 많이 사용해 왔고 아직도 석면을 함유하는 건축자재가 많은 건물이 존재하기 때문에 건축자재 중의 석면 분석방법에 대해서는 미국 및 일본 등에서 비교적 자세한 규정이 제시되고 있다. 건축자재에는 일반적으로 유기바인더, 석고, 방해석 등의 열처리와 산처리에 분해가 용이한 물질이 다량 함유되어 있다. 따라서 이들 물질을 가열과 산처리를 통하여 제거시키고 석면 부분을 농축시켜서 XRD로 분석하는 방법이 제시되고 있다. 특히 최근에 개정된 일본 JIS방법에 의한 전자재 중의 석면 함유량 측정방법이 정확도가 높은 XRD 정량분석방법으로 알려지고 있다.

미국의 EPA와 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health)에서도 XRD 정량방법이 제시되어 있으나, 오래 전에 나온 방법이고 사용하는 Ag 필터가 고가인 점으로 볼 때 실용성이 다소 낮다. 그리고 전자재의 종류에 따라서 분석의 정밀도가 차이날 수 있다. XRD 정량분석방법은 필터나 시료판의 표준물질을 기준으로 대상 석면과 바탕물질의 흡수정도를 보정하여 회절선의 강도비를 통하여 표준 석면시료의 검량선으로부터 정량하는 것이다.

그리고 건축자재 중의 석면 분석방법에 편광현미경으로 분석하는 방법이 제시되어 있고, 비교적 간편한 방법이기 때문에 많이 사용하고 있으나 정확도가 다소 떨어진다. 편광현미경으로 분석하는 방법으로는 전자재를 그대로 미세 분쇄하여 분말을 슬라이드글라스에 특정 굴절액으로 침액하여 관찰한다. 또는 더 정확도를 높이기 위하여 가열 및 산처리를 행하여 석면을 필터에 농축한 것을 관찰하여 정량할 수도 있다. 편광현미경으로 석면을 식별하는 과정을 그림 3

에 나타냈다. 이렇게 편광현미경으로 식별된 석면에 대하여 시야평가법 및 포인트카운팅법(점계수법)으로 정량할 수 있다. 시야평가법은 일정 비율로 혼합된 표준 시야를 기준으로 하여, 대상 시료의 현미경 시야에 대해 비교 평가하는 것으로 많은 시야를 관찰하여 종합한 결과치를 산출하는 것이다. 포인트카운팅법 시야에 나타나는 석면과 비석면의 입자에 대해 일정각도로 포인트를 이동하면서 점유하는 부분을 계수하여 그 비율을 나타내는 것이다. 한 시료에 대해서도 많은 시편, 시야, 포인트를 계수할수록 정확도가 커진다. 한 시료에 대해 4-8개 시편을 만들고 각 시편에서 50-100개 포인트를 계수하여 400개 이상의 포인트가 카운팅되도록 하고 있다. 산업안전보건연구원의 자료에서는 PLM에 의한 전자재의 정량분석방법이 제시되고 있는데, 이 방법은 미국 EPA의 방법을 따른 것으로 아직 국내에서는 자체적으로 개발된 기준은 없는 실정이다. 국내에서는 건축자재 중의 석면은 주로 광학현미경에 의하여 수행되고 있다. 최근에 필자는 국내 전자재 중의 석면 함유량을 JIS방법에 의한 XRD방법으로 측정하여 자료를 제시하였다(황진연 외, 2009). 전자재에 대한 전자현미경(SEM, TEM)의 방법도 제시되어 있으나, 주로 정성분석에 이용되고 있다.

### 광물제품시료, 토양시료, 암석 등

베이비파우더와 같이 활석(talc) 제품에 수반되는 석면의 분석은 활석이 석면과 같이 가열과 산 처리에 강하기 때문에 건축자재의 방법으로 분석할 수 없다. 그리고 토양 및 암석에 포함되는 석면의 분석은 석면 이외에 포함된 바탕 광물질의 종류에 따라 여러 가지 분석방법이 나올 수 있다. 이와 같이 광물제품이나 토양 및 암석은 천연 지질물질로서 기본적으로 모두 광물로 구성되어 있기 때문에 광물학적 지식을 가지고

석면류 광물의 분석방법 제안

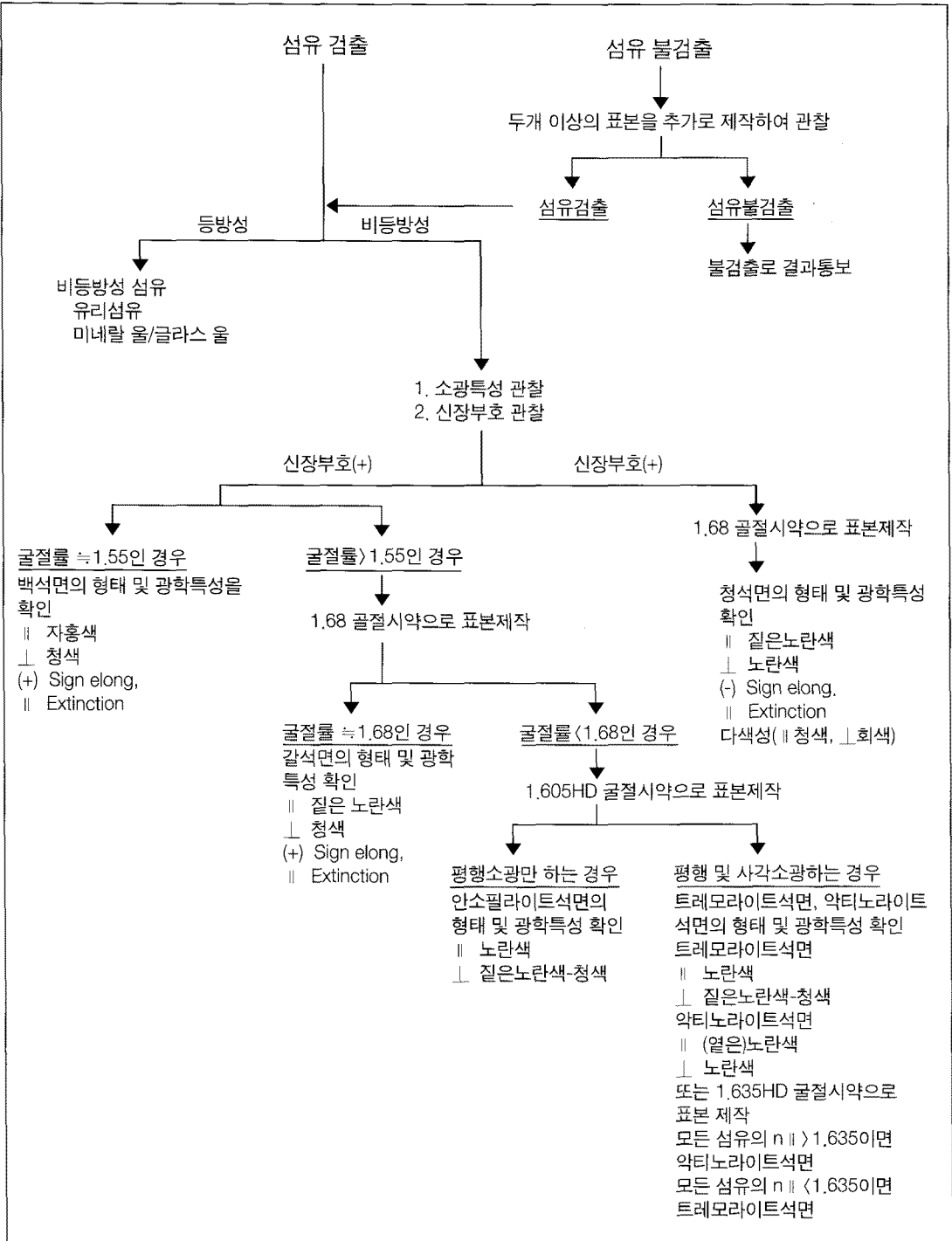


그림 3. 편광현미경을 이용한 석면의 정성분석 과정.

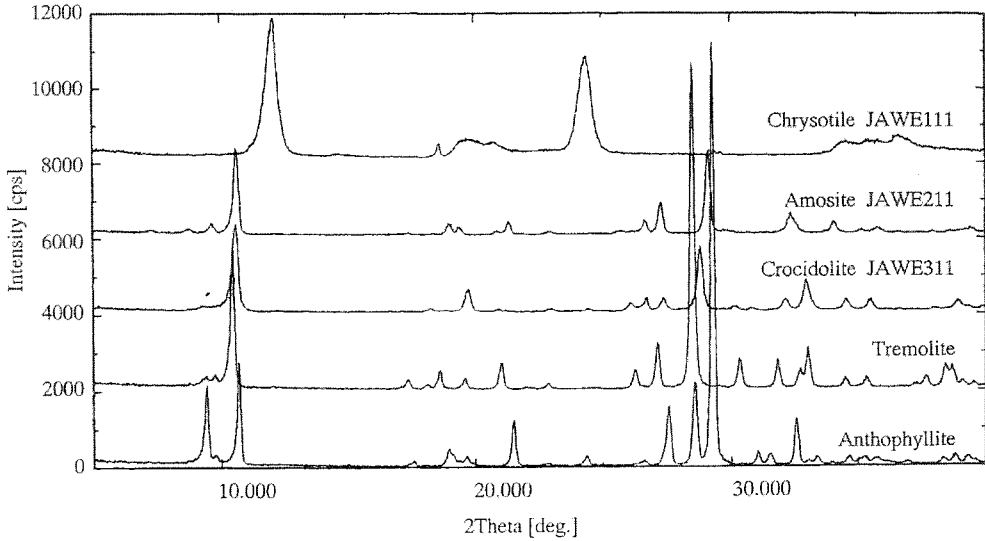


그림 4. 표준 석면의 종류에 따른 X-선회절 패턴.

표 2. 석면 광물의 주요 X-선회절선의 격자면 간격과 JCPDS 자료

Minerals	Principal d-spacing (Å) and relative intensities			JCPDS Powder diffraction file number
	Chrysotile (Serpentine)	7.31 <sub>100</sub>	3.65 <sub>70</sub>	4.57 <sub>50</sub>
	7.36 <sub>100</sub>	3.66 <sub>80</sub>	2.45 <sub>65</sub>	25-645
	7.10 <sub>100</sub>	2.33 <sub>80</sub>	3.55 <sub>70</sub>	22-1162 (theoretical)
Amosite (Grunerite)	8.33 <sub>100</sub>	3.06 <sub>70</sub>	2.75 <sub>670</sub>	17-745 (nonfibrous)
	8.22 <sub>100</sub>	3.06 <sub>085</sub>	3.25 <sub>70</sub>	27-1170
Anthophyllite	3.05 <sub>100</sub>	3.24 <sub>60</sub>	8.26 <sub>55</sub>	9-455
	3.06 <sub>100</sub>	8.33 <sub>70</sub>	3.23 <sub>50</sub>	16-401 (synthetic)
Crocidolite (Riebeckite)	8.35 <sub>100</sub>	3.10 <sub>55</sub>	2.72 <sub>035</sub>	27-1415
	8.40 <sub>100</sub>	3.12 <sub>55</sub>	2.72 <sub>640</sub>	19-1061
Actinolite	2.72 <sub>100</sub>	2.54 <sub>100</sub>	3.40 <sub>80</sub>	25-157
Tremolite	8.38 <sub>100</sub>	3.12 <sub>100</sub>	2.70 <sub>590</sub>	13-437
	2.70 <sub>6100</sub>	3.14 <sub>95</sub>	8.43 <sub>40</sub>	20-1310 (synthetic)
	3.13 <sub>100</sub>	2.70 <sub>660</sub>	8.44 <sub>40</sub>	23-666 (synthetic)

대상 물질에 따라 효과적인 방법을 적용해야 된다. 가열과 산 처리에 약한 광물이 수반될 경우에는 처리를 행하여 석면을 농축시켜 분석하는 것이 좋다. 광물로 주로 구성되는 이러한 고형

물질에 대해서는 X-선 회절분석과 편광현미경으로서 정성분석을 행한다. 이것으로 다소 불명확한 경우에는 전자현미경(SEM-EDS)과 전자현미분석(EPMA) 등으로 보완할 수 있다. 정량

분석으로는 전술한 건축자재와 같이 편광현미경이나 X-선 회절분석방법으로도 가능하다. 그러나 바탕물질의 종류와 함량에 따라 내부표준법, 표준물질 첨가법, 컴퓨터정량프로그램 등의 다양한 방법을 사용할 수 있다.

이러한 분석을 할 때 표준물질의 적절한 선택, 입도, 혼합방법, 분석 자료의 재현성과 정확성 등에 대해 충분히 고려되어야 된다. 건축재료 중 버미큘라이트를 포함하는 뿔칠재료에 포함하는 석면과 베이비파우더의 활석제품에 포함되는 석면의 분석 등에 대해서는 별도의 분석법이 제시되어있기도 한다.

사문암에 포함되는 사문석광물인 크리소타일(백석면)과 안티고라이트를 열적 특성의 차이를 이용하여 미분열중량분석법(DTG)으로 정량분석하는 방법도 제시되어 있다. 이와 같이 광물학적 특성을 이용하여 다양한 기자재와 방법으로 분석이 가능하다. 대상 시료의 특성에 맞추어 석면의 광물학적 특성을 활용한다면 새로운 분석방법이 나올 수 있다.

## 결 언

문제가 되고 있는 모든 석면은 천연 지층에서 산출하는 광물이기 때문에 지질학과 광물학적 지식을 가지고 석면의 분석이 이루어져야 된다. 인공적으로 만들어내는 제품과는 다르게 천연 광물은 그것이 생성되는 조건과 이후의 과정에 따라서 천차만별로 다양하게 산출된다. 따라서 제품을 평가하듯이 단순한 방법으로 석면을 분석하고 평가할 수 있다고 생각하면 안 된다. 30년 가까이 광물에 대해 연구해 온 필자도 할수록 어려운 것을 느끼게 될 정도로 광물의 분석은 단순하지 않다. 하룻강아지 범 무서운 줄 모르는 것처럼 조금 요령을 익힌다고 다 될 수 있는 것이 아니다. 국내에서 석면문제가 크게 대

두되고 나서부터 석면광물 자체를 잘 이해하지 못하는 여러 분야의 사람들도 석면 분석전문가로 나서고 있는 실정이다. 석면이 광물이기 때문에 광물학자나 광물학적 지식을 가진 사람에 의하여 분석방법이 개발되고 분석결과의 정확성이 평가되어야 될 것이다. 지금까지 공기 중에서 채집된 분진시료의 석면분석과 건축자재를 포함하는 일부 고형시료에 대해서는 여러 나라의 관련 기관에서 분석방법이 규정되어 있다. 그러나 각종 광물제품시료와 토양 및 암석에 포함된 석면에 대해서는 국내외적으로 제대로 규정되어 있지 않다. 그러므로 특히 이러한 분석에 대해서는 광물전문가의 참여가 필수적이다. 즉, 국내 폐석면 광산에 대한 현황 파악과 처리에 대한 국가적 과제에는 필히 석면광물을 전공하는 광물전문가의 참여가 필요한 것으로 사료된다. 폐광산에 관련된 토양 및 암석 중의 석면 분석에 대해서는 새로운 분석방법을 모색하도록 많은 관련 연구자들이 노력해야 될 것이다.

## 참고문헌

- 산업안전보건연구원 (2009) 편광현미경을 이용한 고형시료 중 석면분석. 교육 자료.
- 황진연 (2009) 국내 석면의 분석기술 및 연구 현황. 한국광물학회와 한국광해관리공단 주최의 2009년 춘계 석면 심포지엄 “석면의 물질적 본질과 그오염방지 대책”. p. 39-45.
- 황진연, 오지호, 이효민, 윤근택 (2009) 부산지역 다중이용시설에 대한 석면의존재 실태. 2009년 춘계지질과학기술 공동학술대회논문집. p. 252.
- 황진연, 오지호, 윤근택, 이효민 (2009) 생활환경 제품에 포함된 석면과 그 수반광물의 특성. 2009년 한국광물학회 한국암석학회 공



- 동학술발표회 논문집, 18-19.
- EPA(Environmental Protection Agency)  
(1993) "Method for the determination of Asbestos in bulk building materials" (EPA 600-R-93-116)
- NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health):  
NIOSH Manual of Analytical Methods
- 1) NMAM#7400(Asbestos and other fibers by PCM)
  - 2) NMAM#9002(Asbestos (bulk) by PLM)

- 3) NMAM#7402(Asbestos by TEM)
  - 4) NMAM#9002(Asbestos, chrysotile by XRD)
- 日本工業標準(JIS) (2008) 建材製品中のアスベスト含有率測定方法(JIS A 1481).
- 日本工業標準(JIS) (2006) 空気中の繊維状粒子測定方法- 第1部: 光學顯微鏡法 及び 走査電子顯微鏡法(JIS K 3850-1)
- (社)日本作業環境測定協會 (2004) 纖維狀物質測定マニュアル

한국광물학회 홈페이지 <http://www.mskorea.or.kr>

The screenshot shows the homepage of the Korean Mineralogical Society (MSK). At the top, there is a navigation bar with links for '학회소개', '학회지', '학회대회', '회원공간', '광물학자료실', and '계시판'. Below this is a large banner image with the text '한국광물학회 The Mineralogical Society of Korea'. To the right of the banner is a vertical sidebar with 'MSK MENU' and 'The Mineralogical Society of Korea'. The main content area is divided into several sections: 'LOGIN' with fields for '이메일' and '패스워드', '공지/사/항' (MSK NEWS) with a list of news items and dates, and '학/회/동/정' (MEMBERSHIP) with a list of events and dates. At the bottom, there is a footer with logos for '광물과산업' (Mineral and Industry), 'KISTI 한국과학기술정보연구원', '대한지질학회' (Korean Geological Society), '한국과학기술재단' (Korea Science and Technology Foundation), and '산업광물은행' (Industrial Mineral Bank). The copyright notice at the bottom reads: 'Copyright 2005 한국광물학회(The Mineralogical Society of Korea), All right reserved. 서울시 안양구 신원9동 선56-1 서울대학교 지구환경과학부내 Tel:02-877-3073 Fax:02-877-3062 E-mail:koism@kigam.re.kr'.