한국산업위생학회지 제 5 권 제 2 호
Korean Ind. Hyg. Assoc. J
Vol. 5, No. 2, November, 1995

규조토 분진 측정 및 분석 방법의 비교에 관한 연구

동국대학교 의과대학 예방의학교실

임현술 · 김지용 · 정희경

— Abstract —

A Study on Evaluation for Sampling and Analytical Methods of Diatomaceous Earth Dust

Hyun Sul Lim · Ji Yong Kim · Hoe Kyeong Cheong

Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dongguk University

This study was performed in a diatomite factory located at Pohang City, Kyeongsangbuk-Do. The major objectives were to evaluate sampling and analytical methods of diatomaceous earth dust.

Concentrations of total and respirable diatomaceous earth dust were measured. Size distribution of dust was analyzed by a personal cascade impactor and the particle size analyzer which is an application of multiple diffraction method. Also crystalline silica in respirable and total dust samples was analyzed quantitatively by X-ray diffraction and Fourie Transform Infrared Spectroscopy(FTIR).

The results were as follows:

The airborne total and respirable dust concentrations, particle size distribution, and cristalline silica(quartz) concentrations showed approximately a log-normal distribution. The means of totaldust concentrations at flour maufacturing, fire brick grinding and packaging processes exceeded the Korean and American Conference of Governmental Industrial Hygienists standards, 10 mg/m3.

The size distribution of diatomaceous earth dust was log-normal and identified as the rspirable particle mass and thoracic particle mass. Th e crystalline silica in respirable and total dust sampleswas identified to quartz and contained about 10 % in those samples.

Finally, it is necessary to study the applicability of multiple diffraction for particle size distribution to compare the ACGIH's size selective sampling with other materials containing crystalline silica.Also, advanced quantitative study to X-ray diffraction and FTIR methods shoud be carried out to verify general and specific characteristics for respirable crystalline silica.

Key Words : Diatomaceous Earth, Respirable Dust, Size Distribution, Crystalline Silica, Multiple Diffraction, Cascade Impactor, X-ray Diffraction, Fourie Transform Infrared Spectroscopy

※ 이 논문은 작업환경측정기술협의회의 일부 지원으로 연구되었음.

Ⅰ. 서 론

규조토(Diatomaceous earth)는 규조류 침착물에 의해 구성된 무르고 구멍이 많은 실리카 물질이다. 규조토의 성분은 65-90%의 비결정형의 실리카와 작고 다양한 탄산칼슘, 산화철, 알루미늄, 마그네슘, 수분 및 유기물질등이 포함되어 있다. 녹는점은 1400℃ 이고 450℃ 에서 크리스토발라이트(cristobalite)로의 변환이 시작된다. 만약 염화나트륨과 탄산칼슘의 존재 하에서 하소(휘발성분을 태워 없애고 재성분을 남기는 것)가 일어난다면 800℃에서 완벽하게 이루어진다. 자연상태의 규조토에는 결정형 유리규산의 하나인 크리스토발라이트(cristobalite)는 1% 미만이 함유되어 있다(ILO, 1983).

이러한 규조토는 뛰어난 여과물질이며, 여과는 전체 규조토 소비량의 50 %에 해당한다. 이 때문에 설탕정제, 맥주, 양조업, 음료수, 청량음료, 물 공급 및 처리 등에서 사용되며, 또한 염색, 표백, 건조세탁 등에 사용된다. 생산량의 30%는 석면-시멘트 판넬 생산, 비료, 농약, 페인트, 니스, 고무, 아스팔트, 피치, 플라스틱 등등에 사용된다. 또한 콘크리트, 시멘트, 치장벽토, 석고 등에 사용되며, 운반중인 산의 용기 등 깨어지기 쉬운 물질의 포장제와 폭발물, 제초제, 염색재료에서는 촉매제로서 사용되며, 고온의 오븐이나 보일러와 같은 곳의 열절연체로서 사용된다.

유리규산의 결정형태는 석영(quartz), 크리스토발라이트(cristobalite), 트리디마이트(tridymite)이다. 석영은 육각형 구조로 결정이 되어있으며 크리스토발라이트는 사각형구조이고 트리디마아트는 마름모 구조이다. 결정형 유리규산은 모든 광물 중에서 가장 많이 나타나며 대부분의 암석에서 발견된다.

규조토의 위해성은 소성 가공이 안된 규조토에 높은 농도로 장기간 폭로된 근로자에게 규폐증인 규조토폐증을 발생시키며, 결정형 유리규산(크리스토발라이트)을 포함하는 소성 가공된 규조토에 폭로되면 몇 달 만에도 규조토폐증을 일으키며 그 진행이 빠른 것으로 알려져 있다(ILO, 1983). 규폐증은 장기적이고 다양한 호흡성 유리규산에 폭로됨으로써 발생하는 만성적인 폐섬유화 질병으로 주로 광산, 샌드블라스팅(sandblasting), 주물작업 및 연마공정 등의 산업장에서 많이 나타난다. 대체로 발병하기까지는 몇십 년이 흘러야만 그 증상들과 폐의 X-ray 변화를 관측할 수 있으며, 급성 폭로된 경우에는 몇 달에서 몇 년 사이에 악화된 증상변화가 나타나기도 한다(Casarett and Doull, 1991).

현재 우리나라 노동부 산업안전보건법상의 규조토에 대한 작업환경 허용기준은 3종 분진으로 총분진 10㎎/㎥으로 되어 있으며 결정형 유리규산인 크리스토발라이트와 트리디마이트 경우에는 호흡성 분진 0.05㎎/㎥으로 규정되어 있다(노동부, 1991). 이것을 미국정부산업위생전문가협의회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 이하 ACGIH)에서 제시하는 허용기준(ACGIH, 1994)과 비교하여 보면 표 1과 같다.

우리나라 노동부 산업안전보건법에서는 규조토를 3종 분진으로 분류한 점과 규조토 내에 석면의 포함여부를 고려하지 않는 점 그리고 총분진에 포함된 유리규산의 함유율만이 정해진 점과 규조토의 소성가공 여부를 고려하지 않은 점 등이 미국과 다르게 규정되어 있고 결정형 유리규산의 호흡성 분진에 대해서는 같은 규정을 적용하고 있다.

그러나 현재의 규조토 총분진 허용기준이 유리규산 1% 미만의 규조토에 대해 적용하는 규정은 자연

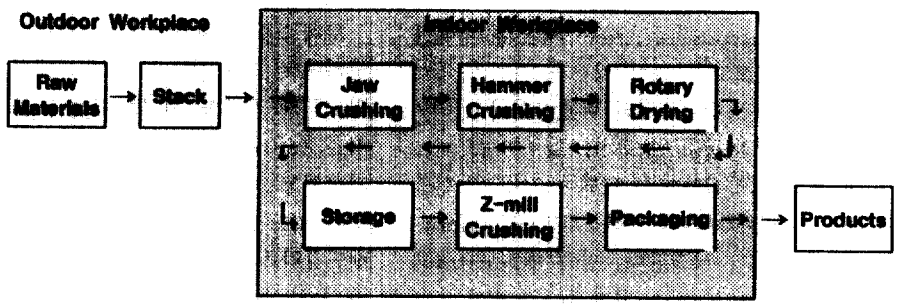
Table 1. Threshold Limit Values of Diatomaceous Earth and Crystalline Silica

Material	Ministry of Labor(Korea)	ACGIH
Diatomaceous Earth	Total Dust, 10㎎/㎥* (3rd group)	Total Dust, 10㎎/㎥** (uncalcined)
Crystalline Silica		
Quartz	Respirable Dust, 0.1㎎/㎥	Respirable Dust, 0.1㎎/㎥
Cristobalite	Respirable Dust, 0.05㎎/㎥	Respirable Dust, 0.05㎎/㎥
Tridymite	Respirable Dust, 0.05㎎/㎥	Respirable Dust, 0.05㎎/㎥

* for Total Dust containing < 1% Silica

** for Total Dust containing no Asbestos and < 1% Crystalline Silica

< Diatomaceous Earth Flour Manufacturing Line>



<Fire Brick Manufacturing Line>

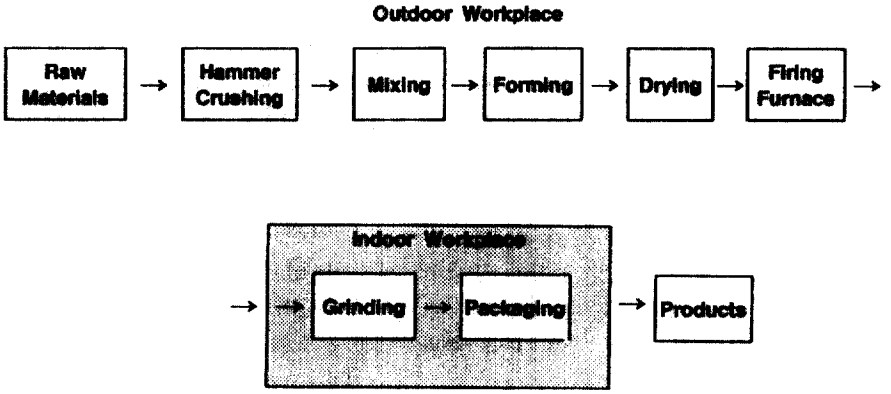


Fig. 1. Flow chrat of daitomaceous earth flour and fire brick manufacturing processes.

상태의 규조토에 65-90%의 유리규산이 함유되어 있다는 사실에 부적합하며, 결정형 유리규산의 호흡성 분진에 대한 허용기준도 실제 작업환경측정에서 결정형 유리규산의 성분별 정량분석과 이들의 호흡성 분진 측정이 동시에 이루어지지 않고 있으므로 허용기준을 적용하기가 불가능한 점이 있다. 또한 소성가공된 규조토의 경우 결정형 유리규산이 형성되므로 이에 대한 폭로 평가는 세 가지 형태의 결정형 유리규산의 공기중 농도를 근거로 하여야(ACGIH, 1986)하나 노동부 허용기준 규정에는 이에 대한 언급이 없다.

규조토 분진에 의한 규조토폐증의 발생을 억제시키고자 분진의 발생양상의 조사 및 분진의 특성에 관한 연구를 통한 효과적인 개선대책이 필요하나, 분진의 측정과 분석에 있어서 호흡성 분진 및 분진의 직경분포에 따른 평가를 위해서는 다단계 직경분립 포집기(Cascade Impactor) 등의 장비가 필요하며 오차가 발생할 가능성이 높아 현실적으로 측정 및 분석의 어려움이 있다(김영식과 윤영노, 1989). 또한 규조토폐증의 발생과 폭로분진의 형태의 관련성의 규명을 통해 작업환경 허용기준의 재설정이 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 규조토의 총분진 및 호흡성 분진의 측정과 규조토 분진의 직경 분포 및 규조토 분진에 포함된 결정형 유리규산에 대한 분석을 위한 기존의 측정, 분석 방법을 비교 평가하여 규조

토 분진의 측정 및 분석 방법의 개선에 기초 자료를 제공하고자 한다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 연구대상

본 연구대상 규조토 가공업체는 경상북도 포항시에 위치하고 있으며 규조토 원석을 채굴하여 규조토 분체, 단열벽돌 제조 및 세라믹 원료를 생산 공급하는 분체업체로 근로자수가 33명 인 영세 소규모 사업장이다. 측정당시에 작업이 정상적으로 이루어지고 있던 공정의 개요를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 규조토 분체 제조 공정

전체의 80% 를 출하하는 공정으로 원광석 투입 후 분쇄공정작업부터는 옥내작업공정으로 이루어져 있다. 규조토 광산에서 채굴한 규조토는 채광장에서 3-4일간 자연 건조시켜 수분함량을 30%로 한다. 규조토 원광의 분쇄는 죠크라샤(Jaw Crusher)로 3-4시간 분쇄하여 원광의 입경을 50-100㎜ 크기로 분쇄한 후 함마밀(Hammer Crusher)로 원광의 입경을 30㎜ 크기로 2차 분쇄한다. 회전건조기(Rotary Dryer)에서 400-500℃로 20분간 건조시켜 수분함량을 7% 이하로 낮춘다. 이 원광을 탱크에 저장시킨 후 각 제트-밀(Z-mill)에 분배하여 제품을 325 Mesh까지 미분쇄한다. 미분쇄된 제품은 지대 및 톤백에 포장하여 출하한다. 이상의 분체제조 공정에서는 1, 2차 분쇄작업과 포장작업에서 규조토 분진이 심하게 발생하여 옥내 작업공정 전체가 분진으로 심하게 오염되어 있는 상태였다.

(2) 단열벽돌 제조 공정

전체의 20%를 출하하는 공정으로 자연건조된 규조토를 1차 분쇄한 후 물과 톱밥을 혼합하여 성형압출기로 단열벽돌을 성형한다. 이것을 자연 상태에서 15일간 건조한 후 소성가마에서 900-1100로 24시간 소성한다. 소성된 단열벽돌의 전단 및 겉면을 연마기로 연마한 후 포장 출하하는 공정으로 옥내 작업공정으로 이루어진 연마 및 포장작업에서 연마된 규조토 분진이 심하게 비산하는 상태였다.

이상의 규조토 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조 공정 중에서 분진이 심하게 발생하는 공정은 모두 동일한 옥내 작업장에 있으므로 규조토 분진의 측정은 옥내 작업공정에 한정하여 실시하였다.

2. 연구방법

본 연구의 시료채취와 분석은 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, 이하 NIOSH)에서 추천하는 공정시험법에 따라 진행하였다. 각 시료의 구체적인 채취 및 분석방법은 표 2와 같다.

(1) 규조토 분진 측정

규조토 총분진 측정은 NIOSH 공정시험법 Method 0500(NIOSH, 1984)에 따라 옥내 작업공정의 생산직 근로자를 대상으로 점심시간 및 휴식시간을 제외한 작업시간동안 유량을 보정한 개인용 고유량 공기포집기(HFS-MSA, USA)를 사용하여 근로자의 호흡위치에서 개인시료를 채취하였다. 장소시료는 사무실과 옥내작업공정에서 작업환경 참고치로 측정하였다. 시료 분석은 중량분석법으로 하였으며 현장 공시료로 보정하였다.

규조토의 호흡성분진은 NIOSH 공정시험법 Method 0600(NIOSH, 1984)에 따라 측정하였다. 즉, 10㎜ nylone cyclone을 시료채취기에 부착하여 PVC filter에 1.7Lpm 정도의 유량으로 포집하

Table 2. Sampling and Analytical Methods of Diatomaceous Earth Dust

Sample	Sampling Media	Flow Rate(Lpm)	Analytical Method
Total Dust	Glass Fiber Filter	2.00	Gravimetric
Respirable Dust	Cyclone + PVC Fliter	1.70	Gravimetric
Particle Size	Glass Fiber Filter	2.00	Multiple Diffraction
Distribution	Cascade Impactor	2.00	Gravimetric
Crystalline Silica in Respirable Dust	Cyclone + PVC Filter	1.70	X-ray Diffraction
Crystalline Silica in Total Dust	PVC Filter	2.00	FTIR

였다.

(2) 규조토 분진의 직경 분포 측정

1) 직경 분립 포집기(cascade impactor)를 이용한 직경 분포 측정 및 분석

호흡성 분진의 직경분포는 ACGIH의 size-selective sampling(ACGIH, 1994)을 적용하여 직경 분립 포집기(Eight-Stage Marple Personal Cascade Impactor, 290 series Model No. 298)를 사용하여 측정하였다.

이 직경 분립 포집기는 8 단계 각각에 분진을 채취하는 포집여과지(collection substrate, 34㎜dia., Mylar media, Sierra Model C-290-My)와 마지막 단계의 분진 포집여과지(Back-Up Filter, 34㎜ dia., polyvivyl chloride media, 5㎛ pore size, Sierra Model F-290-P5)를 장착하여 분진을 포집한다. 각 단계의 포집여과지(collection substrate)는 실리콘 오일을 적당량 도포하여 24시간 건조한 후 분진 포집 전후의 무게를 측정하여 규조토 분진의 직경에 따른 분포를 분석하였다.

2) 다중 회절분석법을 이용한 직경 분포 측정 및 분석

다중 회절분석법은 직경 분립 포집기가 필요 없고 NIOSH 공정시험법 Method 0500(NIOSH, 1984)에 따라 총분진 시료를 채취하여 직경분석기(HR 850 high resolution sub-micron granulometer, CILAS ALCATEL, MARCOUSSIS, France;산업과학기술연구소)를 사용하여 분진의 직경 분포를 측정한 방법이다.

이 방법의 이론적 배경은 다중회절(multiple diffraction)으로 레이저와 같이 간섭성이 강한 광원에서 나온 일정한 파장의 빛을 원형 회절격자에 통과시키면 프라운호퍼(Fraunhofer) 회절 무늬가 형성된다. 이 때 생성된 회절무늬 형태를 분석함으로서 회절 격자의 크기를 측정하는 것이다(Fowles, 1975).

채취된 시료는 증류수에 담가 초음파로 60초간 처리하여 물속에서 규조토 분진을 골고루 분포시킨 다음 노즐을 통해 일정량을 흘리고 이곳에 He-Ne 레이저를 투과시켜 형성된 회절무늬 분석 자료를 토대로 0.1-60㎛ 범위로 세밀한 간격으로 직경 분포를 분석하였다.

(3) 규조토 분진의 결정형 유리규산 분석

1) X선 회절 분석

규조토 분진중의 결정형 유리규산의 분석은 NIOSH 공정시험법 Method 7500(NIOSH, 1994)에 따라 측정 분석하였다. 측정시료는 호흡성 분진중의 결정형 유리규산을 정량하기 위해 PVC 여과지와 10㎜ 나일론 사이클론을 사용하여 포집한 호흡성 분진과 규조토 총분진 중의 결정형 유리규산을 정량하기 위해 총분진을 따로 채취하였다. 테트라하이드로휴란(tetrahydrofuran)으로 측정 여과지를 녹인 뒤 진공여과장치를 통해 은막여과지(silver membrane filter, 직경 25㎜, 0.45㎛ pore, Nucleopore)에 올려 전처리하였다.

X-ray 회절 분석기의 분석 조건은 전압 40㎸, 전류 30㎃, 측정 각속도 2°/min으로 20°에서 40°까지 측정하였다. 결정형 유리규산의 표준물질은 석영(silicon dioxide, GR등급, FW:60.08, 片山, 일본)을 사용하여 정량분석을 실시하였으며, 공시료의 회절 피크를 고려하여 각 시료의 결정형 유리규산 회절 피크를 정량하였다.

2) Fourie Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) 분석

FTIR을 이용한 규조토 분진의 결정형 유리규산의 측정 및 분석은 미국국립산업안전보건연구원의 공정시험법 Method 7603(NIOSH, 1994)에 따라 실시하였다. 측정한 시료는 포집 전후에 무게를 측정하였으며, 분진이 포집된 여과지를 600 에서 2시간 동안 회화시킨 후 회화된 재에 KBr을 300㎎ 정도 첨가하여 미세하게 같아 7㎜ die 를 사용하여 pellet을 만들었다. 이 pellet을 FTIR Spectrophotometer(Bruker IFS 66, Germany)를 이용하여 800 ㎝-1에서 유리규산의 흡수도를 측정하여 석영을 표준물질로 사용한 표준곡선으로 총분진 시료중의 결정형 유리규산을 정량하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 규조토 분진의 폭로 평가

1) 총분진 및 호흡성 분진의 폭로농도

일반적으로 작업환경중 유해물질의 폭로농도 분포는 정규분포보다는 대수정규분포하는 것(ACGIH,

1989)으로 알려져 있으며, 실제 측정 분석자료를 평가한 결과 그림 2와 그림 3에서 보듯이 총분진 폭로농도와 호흡성 분진의 폭로농도는 근사적으로 대수정규분포하는 것으로 나타났으며 Kolmogrove-Smirnove 적합도 검정(Daniel, 1987)을 통하여 대수정규분포하는 것을 확인하였다. 이에 따라 총분진 및 호흡성 분진에 대한 분석결과를 기하평균과 기하표준편차로 표시하였다. 한편 호흡성 분진은 허용기준이 결정형 유리규산에 대하여 규정되어 있으므로 분석결과와 직접적으로 비교할 수 없으므로 참고치로 제시하였다.

옥내 작업으로 이루어지는 각 공정별로 규조토 총분진과 호흡성 분진을 측정하여 분석하여 본 결과 전체적으로 분체 제조 공정과 단열공정의 연마작업에서 총분진이 허용기준보다 높은 폭로수준을 나타내었다. 따라서 앞의 옥내 작업 공정을 동일 폭로군으로 하여 전체 분석자료에 대한 평가를 하였다.

표 3은 규조토 총분진 및 호흡성 분진에 대한 전체 결과를 개인시료와 장소시료로 구분하여 나타낸 것이다.

개인시료의 총분진 폭로농도는 기하평균 16.89㎎/㎥, 기하표준편차 1.38 (범위 8.86-29.12㎎/㎥)으로 허용기준을 초과하는 상태였으며, 장소시료는 기하평균 10.33㎎/㎥, 기하표준편차 1.52(범위 5.86-21.95㎎/㎥)로 높은 수준을 나타내었다. 한편 개인시료의 호흡성 분진은 기하평균 1.14㎎/㎥, 기하표준편차 2.18(범위 0.35-3.65㎎/㎥)으로 나타났다.

조사대상 규조토 가공 공정은 규조토 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조 공정으로 이루어져 있으며 각각의 작업 공정은 작업자의 작업장소에 따라 옥내작업과 옥외작업으로 구분되어 진다. 측정 당시 규조토 분진의 폭로가 높았던 옥내작업공정으로 이루어진 각 공정의 규조토 총분진과 호흡성 분진의 측정

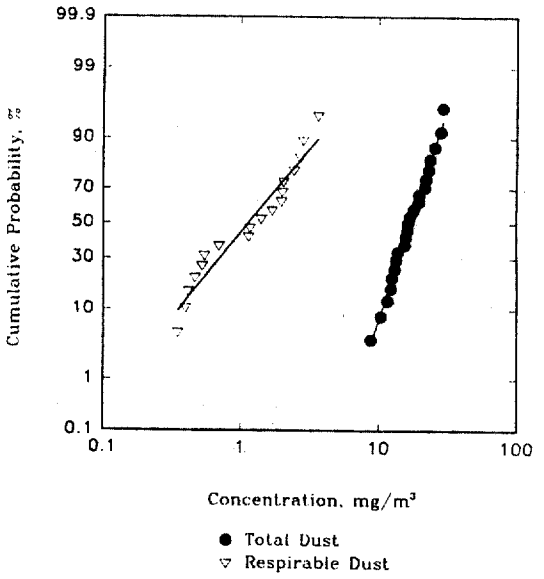


Fig. 2. Cumulatice Lognormal distribution of total and respirable dust - Personal samples.

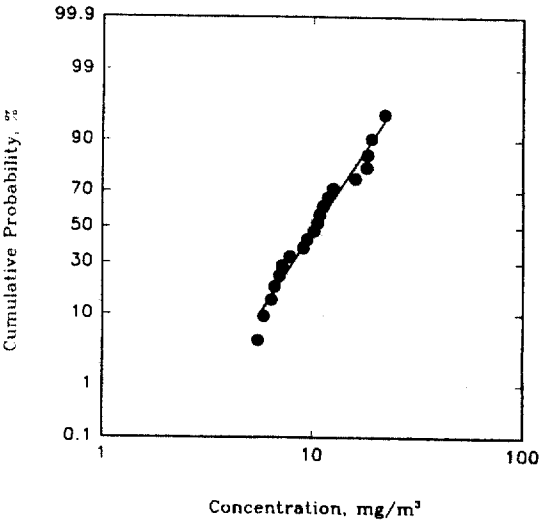


Fig.3. Cumulative lognormal distrubution of total dust - Area samples.

Table 3. Overall Concentrations of Total and Respirable Dust by Samples (unit; ㎎/㎥)

Type of Diatomaceous Sample	Personal Sample				Area Sample			
	n	GM*,	GSD**	Range	n	GM,	GSD	Range
Total	23	16.89,	1.38	8.86 - 29.12	19	10.33,	1.52	5.86 - 21.95
Respirable	18	1.14,	2.18	0.35 - 3.65				

* Geometric Mean

** Geometric Standard Deviation

결과를 표 4에 정리하였다.

표 4와 그림 4에서 보면 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조 공정의 옥내작업 총분진 평균폭로농도가 각각 16.35, 17.76㎎/㎥로 모두 작업환경 허용기준을 초과하는 것을 알 수 있다.

동일 공정에서 측정한 총분진에 대한 호흡성 분진의 농도비를 백분율로 환산하여 보면 분체 제조 공정에서 평균 6.9%, 단열벽돌 제조 공정에서 6.6%로 나타났다. 전체적으로 살펴보면 호흡성 분진의 농도가 총분진의 농도의 6.7% 정도를 차지하고 폭로 농도 범위가 0.35-3.65㎎/㎥를 보였다. 그러나 이 결과만으로는 호흡성 분진의 위해성을 평가할 수 없으므로 분진의 직경 분포와 결정형 유리규산 분석 결과와 함께 비교 분석해야 한다.

2) 장소시료의 총분진 농도

규조토 총분진 측정에 있어 보조적으로 장소시료를 측정한 결과를 표 5에 나타내었다. 옥내작업공정에서 측정한 장소시료는 분체 작업 각공정과 단열벽돌 연마 및 포장 공정으로 각각의 규조토 농도가 기하평균 10.50㎎/㎥, 기하표준편차 1.56 및 기하평균 11.08㎎/㎥, 기하표준편차 1.41로 옥내작업장이 전반적으로 규조토 분진에 오염되어 있는 것으로 나타났다.

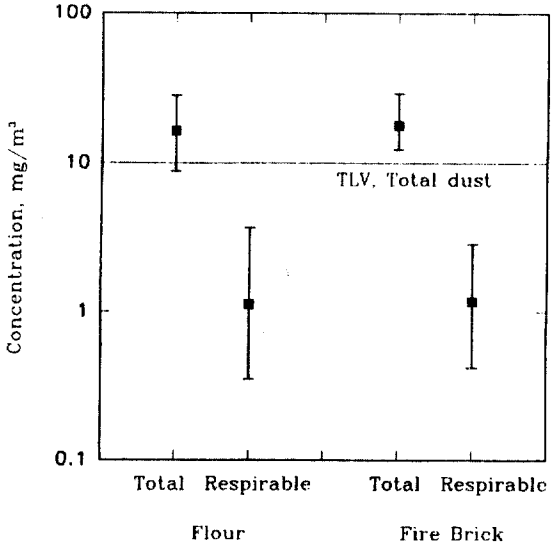


Fig. 4. Concentration of total and respirable dust by processes.

2. 측정방법에 따른 규조토 분진의 직경 분포 비교

1) 직경 분립 포집기(cascade impactor)를 이용한 직경 분포

일반적으로 분진의 직경은 대수정규분포를 하는 것으로 알려져 있다. 현재 많이 사용하고 있는 분진의 직경 측정법은 현미경을 이용한 계수법, 전자기파의 간섭을 이용한 광회절 분석, 표준체를 이용한 분석, 분진의 중량에 따른 침강속도의 차이를 이용한 분석법 및 분진의 관성력을 이용한 방법 등이 있다(대신기술, 1992).

현재 산업위생분야에서 사용하고 있는 직경 분립 포집기는 호흡성 분진의 직경분포를 ACGIH의 분진의 입자 크기별 측정(size-selective sampling)을 적용하여 측정하는 방법이다(Rubow et al. : 1987). 이 방법은 유체의 흐르는 방향을 급변시켜 입자의 운동 관성력을 이용하여 입자를 유체에서 분리하는 방법이다. 직경 분립 포집기의 각 단계에서 분리 포집되는 분진의 직경은 아래의 식에 의해 결

Table 5. Concentrations of Total Dust by Area Samples

Process	Workplace	No. of Sample	Concentration (㎎/㎥)		
			GM	GSD	Range
Flour Manufacture	Indoor	13	10.50	1.56	5.86 - 21.95
Fire Brick Manufacture	Indoor	6	11.08,	1.41	6.36 - 18.18

Table 4. Concentrations of Total and Respirable Dust Personal Samples by Processes

Process	Workplace	Type of Sample	No. of Sample	Concentration(㎎/㎥)		
				GM,	GSD	Range
Flour Manufacture	Indoor	Total	14	16.35,	1.39	8.86 - 28.23
		Respirable	10	1.12,	2.25	0.35 - 3.65
Fire Brick Manufacture	Indoor	Total	9	17.76,	1.38	12.33 - 29.12
		Respirable	8	1.17,	2.22	0.42 - 2.84

정된다.

$$Dp = (St)\,1/2W(9\eta L/C\rho pQ)\,1/2 \quad \text{--- (1)}$$

여기서

St = Stock's Number

W = slot width, cm

η = gas viscosity, gm/cm-sec

L = slot length, cm

ρp = particle mass density, gm/cc

C = Cunningham slip correction

Q = volumetric flow rate in the impactor stage, cc/sec

식 1에 따라서 공기중 25℃, 1기압하에서 2Lpm으로 분진을 포집할 경우 각 단에 포집되는 분진의 직경은 표 6과 같이 결정된다. 이 때 분진의 직경은 밀도가 1인 구형 분진의 공기역학적 직경에 해당된다. 또한 포집기의 각 단에서 손실이 일어나므로 각 단계의 포집효과도 보정하여야 한다. 이 포집효과(effectiveness)은 포집효율과 내부손실로 다음과 같이 결정된다.

$$E = e(1-f)$$

여기서,

포집효율(sampling efficiency), e : 직경 분립 포집기 주위에 있는 부유분진 중에서 포집기 입구 안쪽으로 유입된 부유분진의 비율 내부손실(internal loss), f : 직경 분립 포집기 안쪽으로 유입된 부유분진 중에서 각 단계의 포집여과지나 back-up filter와 관계없는 포집기 내부 표면에 포집된 분진의 비율

실제 측정에 사용한 직경 분립 포집기의 포집효과는 실험적으로 표 6과 같이 주어진다. (Rubow et al. :1987)

Table 6. Cascade Impactor Cut-Points at 2Lpm

Impactor Stage No.	Cut-Point Dp(㎛)	Effectiveness
1	21.3	0.52
2	14.8	0.61
3	9.8	0.78
4	6.0	0.89
5	3.5	0.95
6	1.55	0.96
7	0.93	0.97
8	0.52	0.99
Back-Up Filter	0	1.00

직경 분립 포집기를 이용하여 규조토 분진의 측정은 분체 제조 공정과 단열 벽돌의 연마 및 포장 공정에서 이루어 졌으며 총 30개의 시료를 포집하였

Table 7. Size Distribution of Diatomaceous Earth Dust Sampled by Cascade Impactor

Impactor Stage No.	Cut-Point Dp(㎛)	Cumulative Particle mass(%)	Effectivness Correction Cumulative Particle mass(%)
1	21.3	77.5	69.2
2	14.8	60.4	49.1
3	9.8	45.3	35.1
4	6.0	31.8	24.1
5	3.5	22.1	16.6
6	1.55	13.7	10.2
7	0.93	7.3	5.4
8	0.52	2.9	1.8
Back-Up Filter	0.26	0.0	0.0
		MMD* =11.1	MMD = 15.0
		GSD** = 5.8	GSD = 4.6

* MMD : Mass Median Diameter, 50% of the particle mass is borne by particles larger than the MMD.

** GSD : Geometric Standard Deviation is the ratio MMD/Dp(16%) where Dp(16%) is the particle size for which 16% of the mass is borne by particles smaller than Dp(16%).

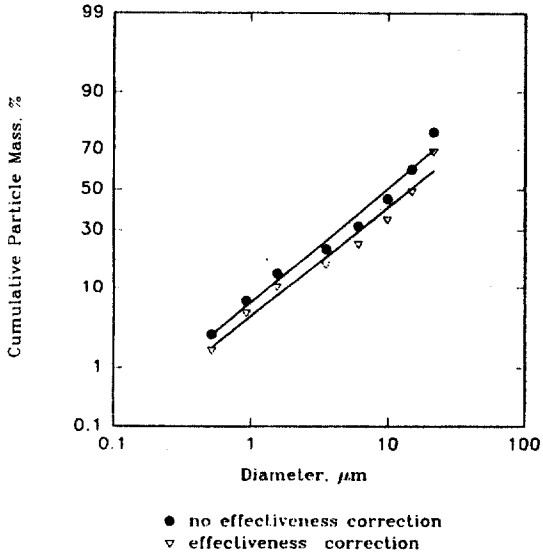


Fig. 5. Size distribution of diatomaceous earth dust sampled by cascade impactor - Cumulative lognormal distribution.

다. 그 결과를 살펴보면 표 7과 그림 5와 같다. 그림 5에서 보듯이 분진의 직경분포는 근사적으로 대수 정규분포함을 알 수 있다.

표 7에서 보면 전체 시료의 분석결과 규조토 분진의 직경에 따른 분진의 누적 질량 분포가 MMD (Mass Median Diameter) 가 11.1㎛, 기하표준편차 5.8을 보였다. 또한 직경 분립 포집기의 각 단의 포집효율을 적용하였을 때 MMD가 15.0㎛, 기하표준편차 4.6의 분포를 나타내었다. 따라서 이를 ACGIH에서 제시하는 Particle Size-Selective Sampling Criteria (ACGIH, 1994)와 비교해 보면 기관지 침착성 분진(thoracic dust)으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 여기에서 직경 분립 포집기로 분진의 직경분포를 측정한 경우에 포집효율 적용 여부에 따라 직경 분포에 차이가 발생함을 유의할 필요가 있다.

2) 다중 회절분석법을 이용한 직경 분포

다중 회절분석법은 분진 입자와 전자기파와의 간섭, 즉 산란과 회절현상에 의해 분진의 크기와 분포를 측정한 방법이다. 이 방법의 이론적 배경은 다중 회절(multiple diffraction)으로 레이저와 같이 간섭성이 강한 광원에서 나온 일정한 파장의 빛을 원형 회절격자에 통과시키면 프라운호퍼(Fraunhofer) 회절 무늬가 형성된다. 이 때 생성된 회절무늬 형태를 분석함으로서 회절 격자의 크기를 측정하는 것이다(Fowles, 1975).

입자에 단일 파장의 빛을 조사했을 때의 회절광의 강도는 아래와 같은 식으로 나타낸다.

$$I(\sin\theta) = Eok2Dp4\,|J1(kDpsin\theta)/kDpsin\theta|2 \quad (2)$$

여기서

Eo = Light Intensity per Unit Area

$k = 2\pi/\lambda$

λ = Wavelength

θ = Diffraction Degree to Incident Light

Dp = Particle Diameter

J1 = Bessel Function of the First Kind, the First Order

따라서 입자에 의한 전방 회절강도의 각도 분포를 검출하면 입자지름을 구할 수 있다(대신기술, 1992).

이러한 원리로 이루어진 분진 직경 분석기(particle size analyzer)는 시료 분체를 물속에 분산시킨 현탁액을 시료실 상부에서 아래로 흘려 그것에 레이저광을 조사하여 분산 입자에 의한 회절광의 강도 분포를 특수한 회전 필터를 통해 각도 분포로 바꾸어 검출하여 마이크로프로세서로 데이터를 처리하는 방식으로 구성되어 있다.

채취된 규조토 시료는 증류수에 담가 초음파로 60초간 처리하여 물속에서 규조토 분진을 골고루 분포시킨 다음 노즐을 통해 일정량을 흘리고 이곳에 He-Ne 레이저를 투과시켜 형성된 회절무늬 분석자료를 토대로 0.1-60㎛ 범위로 세밀한 간격으로 직경 분포를 분석하였다.

그림 6와 7은 총분진의 직경 분포를 대수정규확률분포와 대수정규누적확률분포로 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 규조토 공정에서 폭로되고 있는 분진의 직경이 근사적으로 대수정규분포하고 있음을 알 수 있다.

표 8은 각 공정별로 분진의 직경 분포를 분석한 결과를 나타내고 있다. 전체 공정에 대해 살펴보면 직경의 총기하평균값이 6.59㎛(범위 0.10-60.0)이고 기하표준편차가 3.32으로 기관지 침착성 분진과 호흡성 분진에 해당한다고 볼 수 있다. 작업 공정별로 보면 분체 제조 공정의 분진 직경의 기하평균값이 6.66㎛(범위 0.10-60.0), 기하표준편차 3.63이고 단열벽돌 제조 공정의 분진은 기하평균값 6.49

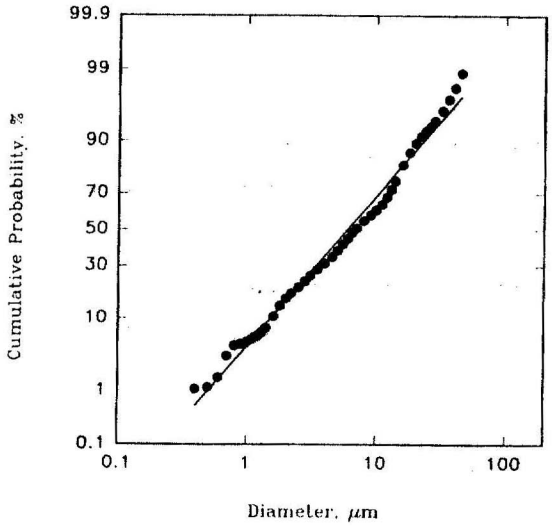


Fig. 6. Size distribution of diatomaceous earth dust analyzed by particle size analyzer - Cumulative lognormal distribution.

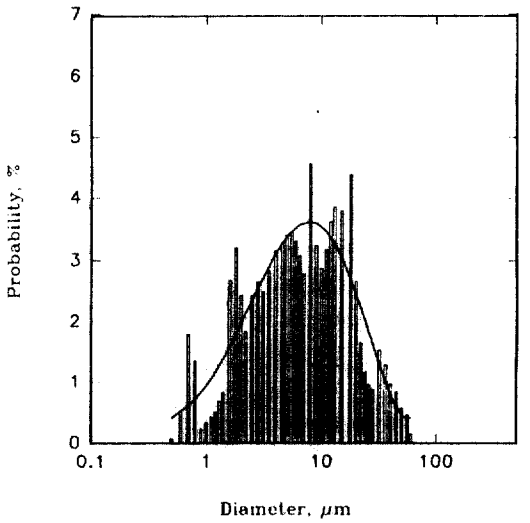


Fig. 7. Size distribution of diatomaceous earth dust analyzed by particle size analyzer - lognormal distribution.

㎛(범위 0.10-60.0), 기하표준편차 3.34의 직경분포를 보여주고 있다.

또한 직경이 10㎛ 이하인 분진의 백분율은 분체제조 공정에서 61.9%, 단열벽돌 제조공정에서 65.2%를 차지하고 있다. 전체적으로 호흡성 분진의 백분율이 63.2%를 차지하므로 총분진의 농도가 작업환경 허용기준을 크게 초과하는 옥내작업공정인 경우에는 적절한 작업환경관리 대책 및 작업자 보호대책이 필요하다.

3) 직경 분포 측정 방법의 비교 고찰

흡입된 공기중에 존재하는 고체상의 입자등과 같은 화학물질들의 잠재적인 위험성은 질량농도 뿐만 아니라 입자크기에도 달려있다. 왜냐하면 상기도내의 침착위치에서의 입자크기의 영향과, 상기도내의 특정지역에 침착된 물질과 연관하여 많은 직업병들이 발생하기 때문이다. 따라서 ACGIH TLV 위원회는 규폐증과 호흡성 분진 질량농도사이의 확실한 관련성이 있음을 인식하여 몇년동안 결정형 유리규산(crystaline silica)의 TLV 로서 입자 크기별 TLV를 권장해왔다(ACGIH, 1994).

이에 따른 입자 크기별 허용기준은 3가지 형태로 나타난다.

㉠ 흡입성 분진 허용기준(Inhalable Particulate Mass TLVs) : 상기도 어느곳이나 침착될 때 위험

Table 8. Size Distribution of Diatomaceous Earth Dust by Processes

Process	Median Size(㎛)	Range(㎛)	Percentile of dust below 10㎛(%)
Flour			
Drying	3.80	0.70 - 20.0	71.3
Packaging 1	11.04	0.80 - 60.0	43.2
Packaging 2	6.62	0.10 - 45.0	64.9
Packaging 3	6.68	0.60 - 22.0	60.8
Packaging 4	6.93	0.10 - 22.0	69.1
Tonbag Packaging 1	7.16	0.70 - 40.0	57.3
Tonbag Packaging 2	7.37	0.50 - 40.0	60.5
Tonbag Packaging 3	5.22	0.70 - 26.0	70.8
Tonbag Packaging 4	6.25	0.60 - 45.0	65.6
Conveyer	7.75	0.10 - 60.0	55.5
	GM* = 6.66		Average
	GSD** = 3.63	0.10 - 60.0	61.9
Fire Brick			
Grinding 1	3.99	0.70 - 20.0	83.6
Grinding 2	6.61	0.60 - 20.0	64.4
Grinding 3	8.75	0.10 - 60.0	54.0
Grinding 4	6.20	0.80 - 26.0	69.9
Packaging 1	6.27	0.60 - 36.0	64.9
Packaging 2	9.63	0.10 - 60.0	51.2
Packaging 3	5.59	0.10 - 22.0	68.2
	GM = 6.49		Average
	GSD = 3.34	0.10 - 60.0	65.2
Total	GM = 6.59		Average
	GSD = 3.32	0.10 - 60.0	63.2

* Geometric Mean

** Geometric Standard Deviation

해질 수 있는 물질에 대한 허용기준으로 바람의 방향을 고려하여 포집기 종류에 관련없이 아래의 포집효율에 따라 포집되는 입자들이 해당된다.

$SI(d) = 50\%(1 + e^{-0.06d})$, $0 < d \leq 100㎛$

㉡ 기관지 침착성 분진 허용기준(Thoracic Particulate Mass TLVs) : 폐기도와 가스교환구역 어느곳이나 침착될 때 위험해 질 수 있는 물질로 아래와 같은 포집효율에 따라 포집되는 입자들이다.

$ST(d) = SI(d)[1-F(X)]$

여기서

$X = \ln(d/\ )/\ln(\ )$

$= 11.64㎛$

$= 1.5$

F(X) =the cumulative probability function of a standardized normal variable, X

ⓒ 호흡성 분진 허용기준(Respirable Particulate Mass TLVs) : 가스교환구역에서 침착될 때 위험해 질 수 있는 물질로 아래와 같은 포집효율에 따라 포집되는 입자들과 일치한다.

$SR(d) = SI(d)[1-F(X)]$

여기서

$= 4.25\mu m$

$= 1.5$

이상에서 이전 정의와 가장 많이 틀린 점은 호흡성 분진 포집기의 median cut point(중앙값)가 3.5㎛에서 4㎛로 증가한 것이다.

직경 분립 포집기는 호흡성 분진의 직경분포를 위와 같은 ACGIH의 분진의 입자 크기별 측정(size-selective sampling)을 적용하여 측정하는 방법이다(Rubow et al. : 1987). 이 직경 분립 포집기는 목재분진(wood dust), 석탄 분진, 유리규산 분진 및 기타 분진의 호흡성 분진의 측정등 적용 범위가 다양하다. 또한 측정하고자 하는 분진의 특성에 따라 1 식에서 보듯이 포집 유량을 적절히 변화시킴으로써 포집되는 분진의 직경 분포를 조절할 수 있다.

그러나 이 방법은 직경 분립 포집기의 포집시간의 조정이 어려운 점, 정전기 처리의 문제점 등의 제한점(김영식과 윤영노, 1989)과 분진의 직경을 세밀하게 분리 포집할 수 없는 단점이 있다. 또한 포집 유량이 변화함에 따라 분진의 포집 직경이 변화하기 때문에 정확한 분진의 직경 분포를 측정하기위해서는 시료포집 펌프의 포집 유량이 항상 일정하도록 유지하여야 한다. 포집 유량이 너무 높을 경우에는 분진의 반발과 관성 충돌 손실이 증가할 수 있고 유량이 너무 낮을 때는 관성 침강 손실이 증가하므로 적정한 유량의 선택도 반드시 지켜져야 한다. 또한 포집하는 분진의 종류와 형태 그리고 포집여과지에 따라 반발과 재비산이 있다. 이것을 방지하기 위하여 포집여과지 표면에 그리스 처리를 하여야 한다(Esmen & Lee : 1980; Hinds et al. : 1985).

식 1에 따라서 공기중 25℃, 1 기압하에서 2Lpm으로 분진을 포집할 경우 각 단에 포집되는 분진의 직경은 표 6과 같이 결정된다. 이 때 분진의 직경은 밀도가 1인 이상적인 구형 분진의 공기역학적 직경에 해당된다. 실질적인 분진의 직경은 일반적으로 분진의 밀도는 1이 아닌 경우가 많으므로 분진의 종류에 따라 밀도를 보정해야 한다. 이경우에 규조토 분진에 대한 밀도를 보정한 분진의 포집 직경이 표 7에서 보듯이 공기역학적 직경과 많은 차이 있음을 알 수 있다. 표 7에서 보면 전체 시료의 규조토 분진의 직경에 따른 분진의 누적 질량 분포가 MMD (Mass Median Diameter)가 11.1㎛, 기하표준편차 5.8을 보였다. 또한 직경 분립 포집기의 각 단의 포집효과를 적용하였을 때 MMD가 15.0㎛, 기하표준편차 4.6의 분포를 나타내었다. 여기에서 직경 분립 포집기로 분진의 직경분포를 측정한 경우에 포집효율 적용 여부에 따라 직경 분포에 차이가 발생함을 유의하여야 한다. 다중 회절분석법은 분진 입자와 전자기파와의 간섭, 즉 산란과 회절현상에 의해 분진의 크기와 분포를 측정한 방법이다. 분진 직경 분석기(particle size analyzer)는 시료 분체를 물속에 분산시킨 현탁액을 시료실 상부에서 아래로 흘려 그것에 레이저광을 조사하여 분산 입자에 의한 회절광의 강도 분포를 특수한 회전 필터를 통해 각도 분포로 바꾸어 검출하여 마이크로프로세서로 데이터를 처리하는 방식으로 구성되어 있으며 분진의 직경을 1-60㎛ 범위로 세밀한 간격으로 분석할 수 있다.

이 방법으로 분석한 규조토 분진의 직경 분포는 전체 공정에 대해 총기하평균값이 6.59㎛(범위 0.10-60.0)이고 기하표준편차가 3.32으로 직경 분립 포집기를 이용하여 측정한 결과와 다른 분포를 보여주고 있다. 즉, 이것은 규조토 총분진 시료에 있는 규조토 분진의 실질적인 직경 분포를 나타내고 있다. 그러나 공기역학적 직경이 아니면 호흡기내 침착하는 분진의 크기를 정확히 예측하기 어렵기 때문에 ACGIH에서는 호흡성 분진에 대하여 모두 공기역학적 직경으로 허용기준을 정하고 있으므로 직접적인 비교 평가하기에는 불충분한 점이 있다.

분진 직경 분석기를 이용한 분진의 직경 분포 측정은 직경 분립 포집기를 이용하여 측정 할 때 복잡한 전처리 과정과 측정시에 주의할 점 등이 없이 일반적인 총분진을 포집하여 바로 분진의 실질적인 직경 분포를 측정하는 장점이 있다. 그러나 이 분진의 크기와 공기중 부유 분진의 침강속도로 나타낸 공기역학적 직경과는 근본적인 차이가 있다. 그리고 시료를 현탁액으로 만들어 분석하기 때문에 수용성 분

Table 9. Results of X-ray Diffraction and FTIR of Quartz (㎎/㎥)

Type of Diatomaceous Sample	X-ray Diffraction				FTIR			
	n	GM*,	GSD**	Range	n	GM,	GSD	Range
Total	5	0.76,	1.40	0.42 - 0.95	12	0.47,	2.33	0.06 - 1.17
Respirable	14	0.15,	1.71	0.07 - 0.37				

* Geometric Mean

** Geometric Standard Deviation

진이나 물과 잘 반응하는 물질로 구성된 분진인 경우에는 적용할 수 없다. 또한 물리 화학적 특성이 다른 분진일 경우에는 산란 광의 세기가 분진의 크기 뿐만 아니라 분진의 기하학적 모양, 굴절율 그리고 에너지 흡수 효율 등에 따라 달라지게 되므로 분진의 종류에 따라 보정이 필요하다(Myer et al. : 1982).

따라서 다중 회절분석법을 이용한 분진의 직경 분포 측정방법이 결정형 유리규산을 포함하는 여러가지 광물성 분진에 대하여 적용 가능한가 여부와 ACGIH 정의에 따른 분진의 크기별 허용기준과 비교 평가 할 수 있는 방법이 있는가에 대한 다양하고 심도있는 연구가 필요하다.

3. 규조토 분진의 결정형 유리규산 분석 - X선 회절분석과 IR 분석

규조토 원광에 대한 대한광업진흥공사와 한국화학검사소 및 한국동력자원연구소의 성분 분석 결과를 보면 유리규산이 78.4% 그리고 알루미나가 10.43 %로 주요 성분을 이루고 있다. 따라서 규조토 분진 속에도 같은 비율로 유리규산이 함유되어 있을 것으로 추정된다.

유리규산은 앞에서 살펴보았듯이 비결정형인 경우에는 총분진으로 허용기준을 설정하고 있으나 결정형인 경우에는 호흡성 분진으로 각 결정성분에 따라 석영에 대해서는 0.1㎎/㎥ 그리고 크리스토발라이트와 트리디마이트에 대해서는 0.05㎎/㎥으로 엄격하게 허용기준을 정하고 있다. 그러므로 규조토 분진 중에서 결정형 유리규산이 존재하면 작업환경에 대한 평가를 단순히 총분진 만으로 평가할 수 없고 결정형 유리규산을 분석 평가하여야 한다(ACGIH, 1986).

결정형 유리규산의 분석은 X선 회절분석과 IR 분석법 모두 NIOSH 공정시험법에 따라 하였다. 결정

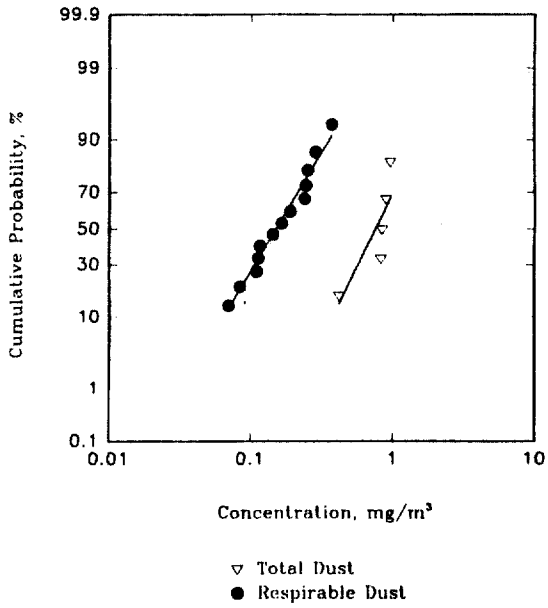


Fig. 8. Cumulative lognormal distribution of quartz X-ray diffraction.

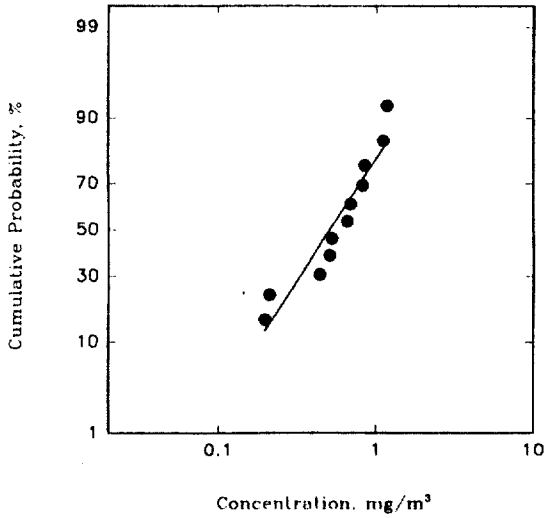


Fig. 9. Cumulative lognormal distribution of quartz FTIR.

형 유리규산의 분석은 표준물질을 석영으로 사용하여 각각의 분석 피크에서 석영을 정량하였다. X선 회절분석은 총분진시료 중의 결정형 유리규산 함량과 호흡성 분진 중의 결정형 유리규산 농도를 각각 분석하였고 IR 분석은 총분진 중의 결정형 유리규산에 대해서만 실시한 결과 그림 8과 9에서 보듯이 공기중 농도가 근사적인 대수정규분포를 나타내었다.

표 9에서 보면 호흡성 분진 중의 결정형 유리규산 즉, 석영의 공기중 농도는 기하평균이 0.15㎎/㎥, 기하표준편차 1.71의 분포를 보였다.

총분진 중의 결정형 유리규산의 농도는 X선 회절분석에서 기하평균 0.76㎎/㎥, 기하표준편차 1.40으로 나타났고 IR 분석 결과 기하평균 0.47㎎/㎥, 기하표준편차 2.33으로 나타나 차이를 보였다. 이러한 농도 차이는 총분진을 포집한 일자가 서로 다르기 때문이다. 그러나 각 총분진 시료의 농도중에 결정형 유리규산의 농도 백분율은 X선 회절분석에서 평균 10.5%, IR 분석에서 10.3%로 나타나 분석방법에 따른 각 총분진 시료중의 석영의 함유 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다(t-test, p=0.77).

결정형 유리규산을 분석하는 방법으로 X선 회절분석법과 IR 분석법은 서로 잘 일치한다. 그러나 흑연, 지르코늄, 규산염, 고령토 및 산화철 등은 X선 회절 분석에 방해물질로 작용하고 석영의 입자 크기에 따라 X선 회절 분석과 IR 분석에 오차를 발생시킨다(Toffolo & Lockington : 1981). 따라서 광물성 분진 중에서 결정형 유리규산을 분석할 때 각 분진의 종류 및 결정 구조에 따른 X선 회절 분석과 IR 분석의 장단점 및 적합성에 대한 비교 연구가 이루어져야 한다.

Ⅳ. 결 론

총분진과 호흡성 분진 측정 분석결과 규조토 가공공정 중에서 옥내작업공정으로 이루어지는 분체 제조 공정, 단열벽돌 제조 공정 중에서 연마 및 포장작업이 총분진의 허용기준을 초과하는 유해한 작업공정으로 확인되었다. 또한 직경 분석 및 결정형 유리규산 분석을 통해서 작업환경중에 존재하는 규조토 분진이 호흡성 분진에 해당하며 결정형 유리규산이 10% 이상 함유되어 있는 것으로 나타났다.

1. 총분진의 폭로농도, 호흡성 분진의 폭로농도, 분진의 직경분포 및 결정형 유리규산의 농도는 근사적으로 대수정규분포하는 것으로 나타났다.

2. 개인시료의 총분진 폭로농도는 기하평균 16.89㎎/㎥, 기하표준편차 1.38(범위 8.86-29.12 ㎎/㎥)으로 허용기준을 초과하는 상태였으며, 장소시료는 기하평균 10.33㎎/㎥, 기하표준편차 1.52(범위 0.40-4.22㎎/㎥)로 높은 수준을 나타내었다. 개인시료의 호흡성 분진은 기하평균 1.14 ㎎/㎥, 기하표준편차 2.18(범위 0.35-3.65㎎/㎥)으로 나타났다.

3. 직경 분립 포집기로 분진의 직경분포를 측정한 결과 규조토 분진의 직경에 따른 분진의 누적 질량분포가 MMD(Mass Median Diameter)가 11.1㎛, 기하표준편차 5.8을 보였다. 또한 직경 분립 포집기의 각 단의 포집효과를 적용하였을 때 MMD가 15.0㎛, 기하표준편차 4.6의 분포를 나타내었으며, 직경이 10㎛ 이하의 분진이 전체 시료에서 각각 60%, 50% 정도를 차지하고 있다. 직경 분립 포집기로 분진의 직경분포를 측정한 경우에 포집효율 적용 여부에 따라 직경 분포에 차이가 발생함을 유의할 필요가 있다.

4. 다중 회절분석법에 의한 직경분포의 측정결과 전체 공정에 대해 직경의 총기하평균값이 6.59㎛(범위 0.10-60.0)이고 기하표준편차가 3.32으로 나타나 기관지 침착성 분진과 호흡성 분진에 해당한다고 볼 수 있다. 작업 공정별로 보면 분체 제조 공정의 분진 직경의 기하평균값이 6.66㎛(범위 0.10-60.0), 기하표준편차 3.63이고 단열벽돌 제조 공정의 분진은 기하평균값 6.49㎛(범위 0.10-60.0), 기하표준편차 3.34의 직경분포를 보여주고 있다.

5. 다중 회절분석법으로 분석한 규조토 분진의 직경 분포는 전체 공정에 대해 총기하평균값이 직경분립 포집기를 이용하여 측정한 결과와 다른 분포를 보여주고 있다. 즉, 이것은 규조토 총분진 시료에 있는 규조토 분진의 실질적인 직경 분포를 나타내고 있으므로 ACGIH 의 정의에 따라 각 분진의 크기별 허용기준과 직접적인 비교 평가하기에는 불충분한 점이 있다.

7. X선 회절분석법으로 분석한 호흡성 분진 중의 결정형 유리규산 즉, 석영의 공기중 농도는 기하평균이 0.15㎎/㎥, 기하표준편차 1.71의 분포를 보였다.

8. 총분진 중의 결정형 유리규산의 농도는 X선 회절분석에서 기하평균 0.76㎎/㎥, 기하표준편차 1.40으로 나타났고 IR 분석 결과 기하평균 0.47㎎/㎥, 기하표준편차 2.33으로 나타나 차이를 보였으나, 각 총분진 시료의 농도중에 결정형 유리규산의 농도 백분율은 X선 회절분석에서 평균 10.5%, IR 분석에서 10.3%로 나타나 분석 방법에 따른 각 총분진 시료중의 석영의 함유 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다(t-test, p=0.77).

결론적으로 다중 회절분석법을 이용한 분진의 직경 분포의 측정에 있어 결정형 유리규산을 포함하는 여러가지 분진에 대한 적용성 여부와 ACGIH 정의에 따른 분진의 크기별 허용기준과 비교 평가 할 수 있는 방법에 대한 다양하고 심도있는 연구가 필요하다.

또한 결정형 유리규산을 분석하는 방법으로 X선 회절 분석법과 IR 분석법은 서로 잘 일치하지만 방해물질의 존재와 석영의 입자 크기에 따라 X선 회절 분석과 IR 분석에 오차를 발생시키므로 광물성 분진 중에서 결정형 유리규산을 분석할 때 각 분진의 종류 및 결정 구조에 따른 X선 회절 분석과 IR 분석의 장단점 및 적합성에 대한 비교 연구가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

김영식, 윤영노 : 태백지역 석탄광산에서의 호흡성 분진의 입경 분포, 근로복지공사 중앙병원 부설 직업병연구소, 직연보 11-89-11, 1989

노동부 : 유해물질 허용농도, 노동부고시 제 91-21, 노동부, 1991

대신기술 : 최신 분체기술 핸드북, 대신기술, 1992, 17-55

윤영노, 김영식 : 태백지역 석탄광산의 작업부서별 호흡성 분진의 폭로농도, 근로복지공사 중앙병원 부설 직업병연구소, 직연보 10-89-10, 1989

American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) : *Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices, Cincinnati, Ohio, ACGIH, 1986, 520-526*

ACGIH : *Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants, 7th ed, ACGIH, 1989, 21-23*

ACGIH : *Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1994-1995, Cincinnati, Ohio, ACGIH, 1994*

Casarett LJ and Doull J : *CASARETT AND DOULL's TOXICOLOGY, The Basic Science of Poisons, fourth editio, Pergamon Press, Inc., 1991, 30 7*

Daniel WW : *Biostatistics: A Foundation for Analysis in the Health Sciences, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1987, 603 - 609*

Esmen NA and Lee TC : *Distortion of cascade impac-tor measured size distribution due to bounce and blow-off, Am. Ind. Hyg. Assoc. J(41), 1980, 410 - 419*

Fowles GR : *Introduction to Modern Optics, 2nd ed, New York, Holt,Rinehart and Winston, Inc., 1975, 106 - 125*

Hinds WC, Liu WV and Froines JR : *Particle Bounce in a Personal Cascade Impactor: A Field Evaluation, Am. Ind. Hyg. Assoc. J(46), 1985, 517 - 523*

International Labour Office(ILO) : *Encyclopedia of Occupational Health and Safty, 3rd(revised) ed, Vol.2, Geneva, ILO, 1983, 2033-2035*

Myer WR and McJiton CE : *Empirical calibration of a laser particle size analyzer for silica dust, Am. Ind. Hyg. Assoc. J(43), 1982, 145 - 148*

National Institute for Occupational Safty and Health (NIOSH) : *NIOSH Manual of Analytical Methods, 3rd ed., DHHS(NIOSH) Publication No. 84-100, Cincinnati, Ohio, NIOSH, 1984*

National Institute for Occupational Safty and Health (NIOSH) : *NIOSH Manual of Analytical Methods, 4th ed., DHHS(NIOSH) Publication No. 84-100, Cincinnati, Ohio, NIOSH, 1994*

Rubow KL, Marple VA, Olin J and McCawley MA : *A Personal Cascade Impactor: Design, Evaluation and Calibration, Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 48(6), 1987, 532 - 538*

Toffolo D and Lockington N : *Direct infrared spectrophotometric analysis of free crystalline silica in respirable dust from a steel foundry, Am.Ind. Hyg. Assoc. J (42), 1981, 579 - 585*