

모 구조토 가공업체의 구조토 분진 폭로평가 및 개선방향에 관한 연구

동국대학교 의과대학 예방의학교실
정희경 · 김지용 · 정해관 · 임현술

— Abstract —

A Study on Evaluation of Worker Exposure to Diatomaceous Earth Dust and Engineering Control in a Diatomite Factory

Hoe Kyeong Cheong, Ji Yong Kim, Hae Kwan Cheong, Hyun Sul Lim

Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dongguk University

This study was performed in a diatomite factory where silicosis had been found at October, 1993. The major objectives were to evaluate worker exposure to diatomaceous earth and to present engineering control methods for workplace management. Total and respirable dust of diatomaceous earth were measured. Size distribution of dust was analyzed by applying the multiple diffraction method. Also crystalline silica in respirable dust samples was analyzed qualitatively by X-ray diffraction. The suitable Local Exhaust Ventilation systems for that factory were recommended. The results were as follows.

The airborne total and respirable dust concentrations by exposure groups showed approximate normal distribution. The means of total dust exposures at flour manufacturing, fire brick grinding and packaging, ceramic raws packaging processes exceeded Korean and ACGIH standards, $10\text{mg}/\text{m}^3$. The means of total and respirable dust concentrations to high exposure groups were 6.8 and 3.9 times higher than those of low exposure groups, respectively.

The size distribution of diatomaceous earth dust was lognormal with a median diameter of $7.07 \mu\text{m}$ (range, $0.10\text{-}60.0 \mu\text{m}$) and with a geometric standard deviation of 1.43.

The crystalline silica in respirable dust samples was identified to quartz and cristobalite and/or tridymite.

Above results suggest that engineering controls and periodic environmental and medical surveillances will be important for preventing silicosis in the diatomite factory.

Key Words : Diatomaceous Earth, Silicosis, Respirable Dust, Size Distribution, Crystalline Silica, Multiple Diffraction, X-ray Diffraction, Local Exhaust Ventilaton

I. 서 론

규조토(Diatomaceous earth)는 주성분이 유리규산(SiO_2)으로서 부스러지기 쉽고, 다공성의 구조로 되어 있으며, 시멘트 혼합제, 흡수제, 여과재, 충전재, 내화벽돌 및 단열재 등으로 널리 사용되고 있다. 규조토의 성분은 65-90 %가 비결정형 유리규산이며 그 외에도 소량의 탄산칼슘 산화철, 알루미늄, 마그네슘, 수분 및 유기물질이 포함되어 있고 결정형 유리규산의 하나인 크리스토팔라이트(cristobalite)는 1 % 미만이 함유되어 있다(ILO, 1983).

규조토의 위해성은 소성가공이 안된 규조토에 높은 농도로 장기간 폭로된 근로자에게 규폐증인 규조토폐증을 발생시키며, 결정형 유리규산(크리스토팔라이트)을 포함하는 소성가공된 규조토에 폭로되면 몇 달만에 규조토폐증을 일으키며 그 진행이 빠른 것으로 알려져 있다(ILO, 1983).

현재 우리나라 노동부 산업안전보건법상의 규조토에 대한 작업환경 허용기준은 3종 분진으로 총분진 10 mg/m^3 으로 되어 있으며 결정형 유리규산인 크리스토팔라이트와 트리디마이트(tridymite) 경우에는 호흡성 분진 0.05 mg/m^3 으로 규정되어 있다(노동부, 1991). 이것을 미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 이하 ACGIH)에서 제시하는 허용기준(ACGIH, 1993)과 비교하여 보면 표 1과 같다. 우리나라 노동부 산업안전보건법에서는 규조토를 3종 분진으로 분류한 점과 규조토내에 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 앞에서 살펴보았듯이 현재의 규조토 총분진 허용기준이 유리규산 1 %미만의 규조토에 대해 적용하는 규정은 자연상태의 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 세가지 형태의 결정형 유리규산의 공기중 농도를 근거로 하여야(ACGIH, 1986)하나 노동부 허용기준 규정에는 이에 대한 언급이 없다.

규조토폐증에 대한 조사보고(임현술 등, 1991)에 의하면 모 규조토 가공업소 근로자에 있어 규조토폐증의 유병율이 20.0 % (대상자 35명중 규조토폐증 7례)로 나타났다. 이조사의 조사대상 가공업소는 규조토를 $800-1000^\circ\text{C}$ 로 가열하여 가공하는 공정으로 1988년도에는 노동부의 제 1종 분진 허용기준인 2 mg/m^3 을 초과하는 수준이었으나 1989년부터는 규조토 분진이 제 3종 분진으로 분류되어 규조토 분진의 허용농도가 10 mg/m^3 으로 정해지고 결정형 유리규산에 대해 호흡성 분진으로 표 1과 같이 현재의 기준이 추가됨에 따라 1990년도의 규조토 총분진의 측정은 모두 허용범위 내에 있었으며 결정형 유리규산에 대한 측정은 이루어지지 않았다고 밝히고 있다.

또한 규조토 가공업체에서 발생한 규조토폐증의 진행에 관한 추적조사(임현술 등, 1993)에 의하면 또 다른 규조토 가공업체의 규조토폐증 총 발생 밀도가 6.26명/100인년(조사대상자 24명중 규조토폐증 4명)으로 나타났다. 이 조사대상 규조토 가공업체도 규조토 원석을 250°C 로 가열하여 가공하는 공정으로 1989년부터 1992년까지 작업환경측정 결과 총분진이 현재 노동부 허용기준을 초과하지 않는 것으로 조사되었으나 결정형 유리규산에 대한 측정은 이루어지지 않아 정확한 작업환경 평가는 할 수 없었으며, 허용기준 이하의 규조토 분진 농도에서 규조토폐증이 발생한 사실에 근거하여 결정형 유리규산의 호흡성 분진의 측정을 통한 정확한 작업환경 평가와 규조토 분진의 총분진 허용농도에 대한 연구가 필요하다고 밝히고 있다.

본 조사 대상 규조토 가공업체는 규조토 원석을 채굴하여 규조토 분체, 단열벽돌 제조 및 새라

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

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

*for Total Dust containing < 1% Silica

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

믹 원료를 생산 공급해왔으며, 동국대학교 포항 병원에서 실시한 1993년도 특수건강진단에서 규조토폐증의 발생이 발견되어 작업환경 개선 및 근로자 건강관리 대책 수립의 필요성이 대두되었다.

따라서 본 조사의 목적은 규조토의 총분진 및 호흡성 분진을 작업공정별로 측정 분석하며 직경 분포 및 결정형 유리규산에 대한 정성분석을 하여 규조토 분진의 위해성을 평가하고자 하였으며 이를 통해 작업환경 개선을 위한 기초자료를 제시하는데 있다.

II. 대상 및 방법

1. 조사대상

본 조사는 1993년 10월 6일과 7일 양일간에 걸쳐 08:00~17:00까지 점심시간과 휴식시간을 제외한 8시간 작업시간동안 각 공정의 생산직 근로자를 대상으로 규조토 분진에 대한 작업환경을 측정하였다. 측정당시에 작업이 정상적으로 이루어지고 있던 공정의 개요를 살펴보면 다음과 같다.

1) 분체 제조 공정

전체의 70 %를 출하하는 공정으로 원광석 투입 후 분쇄공정작업부터는 옥내작업공정으로 이루어져 있다. 규조토 광산에서 채굴한 규조토는 채광장에서 자연건조한 후 옮겨와 1,2차 분쇄와 강제 건조(300~400 °C)한다. 이것을 3차 분쇄하여 포장한 후 출하하고 있다. 이 공정에서는 1,2차 분쇄작업과 포장작업에서 규조토 분진이 심하게 발생하는 상태였다.

2) 단열벽돌 제조 공정

전체의 20 %를 출하하는 공정으로 자연건조된 규조토를 1차 분쇄한 후 톱밥 등을 혼합하여 벽돌로 성형한 것을 900~1100 °C로 소성한다. 소성된 단열벽돌을 연마기로 연마한 후 포장 출하하는 공정으로 옥내작업공정으로 이루어진 연마 및 포장작업에서 연마된 규조토 분진이 심하게 비산하는 상태였다.

3) 세라믹 원료 제조 공정

전체의 10 %를 출하하며 전체작업이 옥외작업 공정으로 이루어져 있다. 자연건조된 규조토를 1차 분쇄한 후 수분을 첨가하여 혼합하고 이것을 성형 및 강제건조시켜 500~600 °C로 소성가공한다. 가공된 세라믹 원료를 선별 및 포장하여 출하하며 포장작업시에 분진이 심하게 발생하고 있었다.

이상의 규조토 가공공정에서 분체 제조 공정의 분쇄작업과 포장작업, 단열벽돌 제조 공정의 벽돌연마 및 포장작업 그리고 세라믹 원료 제조 공정의 성형 및 포장작업에서 분진이 많이 발생하고 있었다. 따라서 규조토 분진측정은 이들 공정에 중점을 두고 하였다.

2. 시료채취 및 분석방법

본 조사의 시료채취와 분석은 미국 국립 산업 안전보건 연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, 이하 NIOSH)에서 추천하는 공정시험법(NIOSH, 1984)에 따라 진행하였다. 각 시료의 채취 및 분석방법은 표 2와 같다.

1) 규조토 총분진 및 호흡성 분진

Table 2. Sampling and Analytical Methods of Diatomaceous Earth

| Sample | Sampling Media | Flow Rate (Lpm) | Analytical Method |
|-----------------------|--------------------|-----------------|----------------------|
| Total Dust | Glass Fiber Filter | 2.00 | Gravimetric |
| Respirable Dust | Cyclone+PVC Filter | 1.70 | Gravimetric |
| Diameter Distribution | Glass Fiber Filter | 2.00 | Multiple Diffraction |
| Crystalline Silica | Cyclone+PVC Filter | 1.70 | X-ray Diffraction |

각 공정의 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.

2) 직경 분포—다중 회절분석

호흡성 분진의 직경분포는 일반적으로 size-selective sampling(ACGIH, 1992)을 적용하여 직경 분립 포집기(cascade impactor)를 사용하여 측정하고 있다(윤영노와 김영식, 1989). 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.

다중 회절분석법은 직경 분립 포집기가 필요 없고 총분진 시료를 채취하여 직경분석기(HR 850 high resolution sub-micron granulometer, CILAS ALCATEL, MARCOUSSIS, France:산업과학기술연구소)를 사용하여 분진의 직경 분포를 측정하는 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 회절 무늬 형태를 분석함으로써 회절 격자의 크기를 측정하는 것이다(Fowles, 1975).

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

분포를 분석하였다.

3) 결정형 유리규산 — X선 회절 정성분석

결정형 유리규산 측정시료는 PVC 여과지와 10 mm 나일론 사이클론을 사용하여 호흡성 분진만을 채취하여 테트라하이드로퓨란(tetrahydrofuran)으로 여과지를 녹인 뒤 진공여과장치를 통해 은막 여과지(silver membrane filter, 직경 25 mm, 0.45 μm pore, Nucleopore)에 올려 전처리하였다. X-ray 회절 분석기의 분석 조건은 전압 40 kV, 전류 30 mA, 측정 각속도 2°/min으로 20°에서 40°까지 측정하였다. 표준물질을 구하지 못하여 정량분석을 실시하지 못하였으며 공시료의 회절 피크를 고려하여 각 시료의 결정형 유리규산 회절 피크를 정성적으로 구별하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 구조토 분진의 폭로 평가

1) 총분진 및 호흡성 분진의 폭로 농도

각 공정별로 구조토 총분진과 호흡성 분진을 측정하여 분석하여본 결과 전체적으로 분체 제조 공정(옥내)과 단열공정의 연마작업(옥내), 그리고 세마리 원료 제조 공정의 포장작업(옥외)에서 총분진이 허용기준보다 매우 높은 폭로수준을 나타내었고 그 외의 기타 옥외에서 하는 작업공정에서는 허용기준보다 낮은 폭로수준을 나타내었다. 따라서 앞의 세가지 공정의 작업자들을 고 폭로군으로 나머지 작업자들을 저폭로군으로 구분하여 전체분석자료에 대한 평가를 하였다.

일반적으로 작업환경중 유해물질의 폭로 농도 분포는 정규분포보다는 대수정규분포하는 것(ACGIH, 1989)으로 알려져 있으나 실제 측정 분석자료를 평가한 결과 그림 1에서 보듯이 폭로군

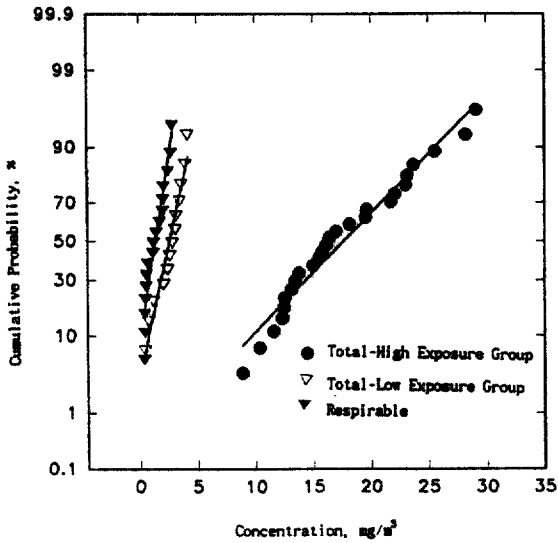


Fig. 1. Cumulative Normal Distribution of Total and Respirable Dust.

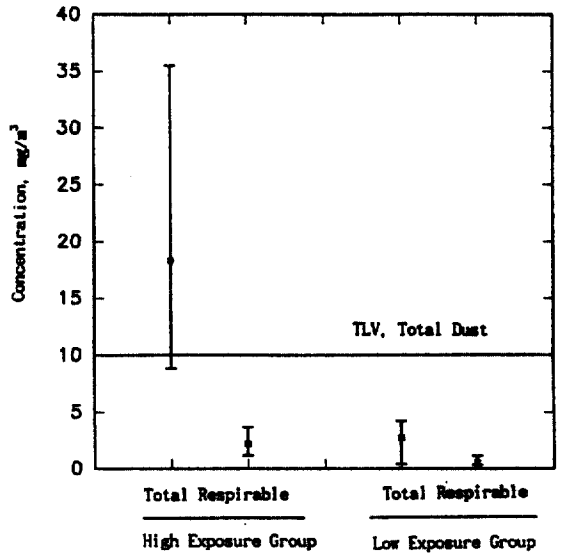


Fig. 2. Overall Concentration of Total and Respirable Dust by Exposure Group.

별 총분진 폭로농도와 호흡성 분진의 폭로농도는 근사적으로 정규분포하는 것으로 나타났다. 이에 따라 총분진 및 호흡성 분진에 대한 분석결과를 산술평균과 표준편차를 표시하였다. 한편 호흡성 분진은 허용기준이 결정형 유리규산에 대하여 규정되어 있으므로 분석결과와 직접적으로 비교할 수 없으므로 참고치로 제시하였다.

표 3과 그림 2는 규조토 총분진 및 호흡성 분진에 대한 전체 결과를 폭로군 별로 구분하여 나타낸 것이다. 고폭로군의 총분진 폭로농도는 평균 18.30 mg/m^3 (범위 $8.86-35.51$)으로 허용기준을 초과하는 상태였으며 저폭로군의 평균폭로농도 2.69 mg/m^3 (범위 $0.40-4.22$)보다 6.8배나 높은 수준을 나타내었다. 또한 호흡성 분진도 고폭로군이 평균 2.20 mg/m^3 (범위 $1.18-3.65$)으로 저

폭로군의 평균농도 0.57 mg/m^3 (범위 $0.35-1.15$)보다 3.9배 높은 폭로수준을 보이고 있다.

규조토 가공 공정은 규조토 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조 공정 그리고 세라믹 원료 제조 공정으로 이루어져 있으며 각각의 작업 공정은 작업자의 작업장소에 따라 옥내작업과 옥외작업으로 구분되어 진다. 이러한 작업장소의 구분에 따른 각 공정의 규조토 총분진과 호흡성 분진의 측정 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4와 그림 3-5에서 보면 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조 공정의 옥내작업 총분진 평균폭로농도가 각각 $16.64, 19.38 \text{ mg/m}^3$ 로 모두 작업환경 허용기준을 초과하는 것을 알 수 있다. 그러나 옥외작업일 경우에는 위 공정의 총분진 평균폭로농도가 $2.90, 2.74 \text{ mg/m}^3$ 으로 허용기준 미만으로

Table 3. Overall Concentrations of Total and Respirable Dust by Exposure Groups

(unit ; mg/m^3)

| Type of Sample | High Exposure Group* | | Low Exposure Group** | |
|----------------|----------------------|------------|----------------------|-----------|
| | Mean \pm SD*** | Range | Mean \pm SD | Range |
| Total | 18.30 ± 6.44 | 8.86-35.51 | 2.69 ± 1.24 | 0.40-4.22 |
| Respirable | 2.20 ± 0.73 | 1.18-3.65 | 0.57 ± 0.26 | 0.35-1.15 |

*Flour Manufacture, Fire Brick Grinding & Packaging and Ceramic Raws Packaging Processes

**Outdoor Workplace except above

***Standard Deviation

Table 4. Concentrations of Total and Respirable Dust by Processes

| Process | Workplace | Type of Sample | No. of Sample | Concentration (mg/m ³) | |
|--------------------------|-----------|----------------|---------------|------------------------------------|-------------|
| | | | | Mean ± SD | Range |
| Flour Manufacture | Indoor | Total | 14 | 16.64 ± 5.27 | 8.86–23.20 |
| | | Respirable | 6 | 2.32 ± 0.80 | 1.42–3.65 |
| | Outdoor | Total | 3 | 2.90 ± 0.78 | 2.05–3.59 |
| | | Respirable | 2 | 0.93 ± 0.72 | 0.70–3.07 |
| Fire Brick Manufacture | Indoor | Total | 9 | 19.38 ± 6.50 | 12.77–26.91 |
| | | Respirable | 1 | 2.84 | |
| | Outdoor | Total | 10 | 2.74 ± 1.45 | 0.40–4.22 |
| | | Respirable | 5 | 0.87 ± 0.97 | 0.40–2.84 |
| Ceramic Raws Manufacture | Outdoor | Total | 5 | 17.70 ± 12.39 | 2.40–23.07 |
| | | Respirable | 4 | 1.40 ± 0.80 | 0.35–2.06 |

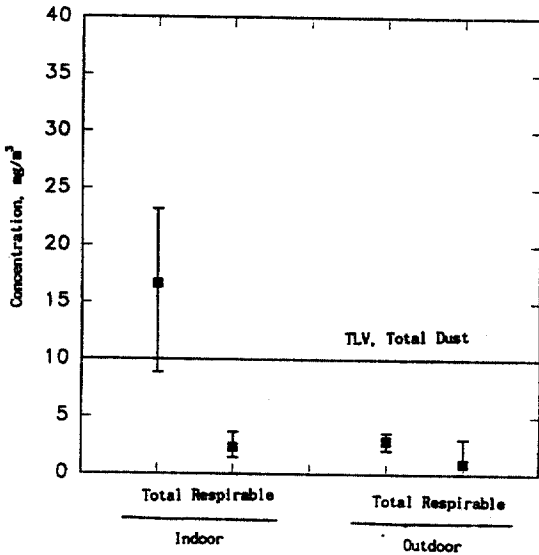


Fig. 3. Concentration of Total and Respirable Dust by Workplace at Flour Manufacture.

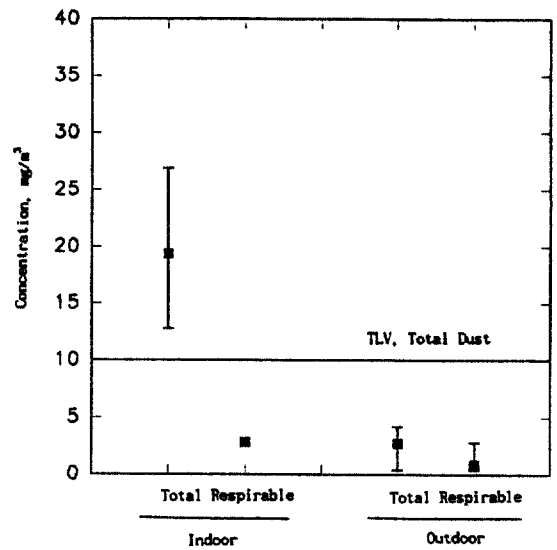


Fig. 4. Concentration of Total and Respirable Dust by Workplace at Fire Brick manufacture.

나타났다. 세라믹 원료 제조 공정의 작업은 모두 외에서 이루어지는 작업으로 주로 세라믹 원료의 선별 포장작업에서 측정된 총분진 평균폭로농도가 17.70 mg/m³으로 허용기준을 초과하는 것으로 나타났다.

결과적으로 전체 구조토 가공 공정중에서 옥내 작업 공정인 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조공정중에서 연마 및 포장작업 그리고 세라믹 원료 제조 공정 중에서 최종 가공된 세라믹 원료를 포장하는 공정이 구조토 분진농도가 가장 높은 작

업 공정으로 확인되었다.

2) 장시시료의 총분진 농도

구조토 총분진 측정에 있어 보조적으로 장소시료를 측정된 결과를 표 5와 그림 6에 나타내었다. 옥내작업공정에서 측정된 장소시료는 지대포장과 단열벽돌을 연마하는 곳으로 각각 5.36 mg/m³와 18.18 mg/m³으로 평균 11.77 mg/m³으로 옥내작업장이 전반적으로 구조토 분진에 오염되어 있는 것으로 나타났다. 한편 사무실의 구조토 총분진 농도는 평균 1.09 mg/m³으로 낮은 수준을 보였

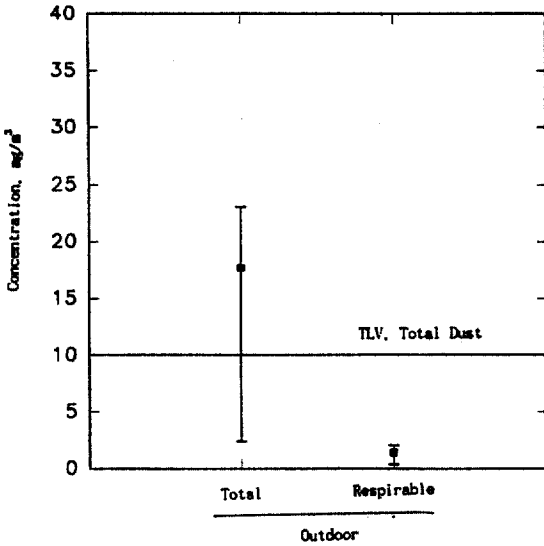


Fig. 5. Concentration of Total and Respirable Dust at Ceramic Raws Manufacture.

Table 5. Concentrations of Total Dust by Area Samples

| Sampling Area | No. of Sample | Concentration (mg/m ³) |
|---------------|---------------|------------------------------------|
| Indoor* | 2 | 11.77 |
| Office Room | 2 | 1.09 |

*Packaging and Grinding Process

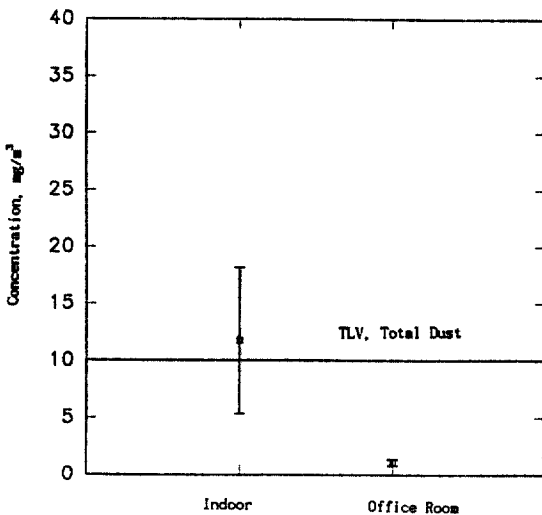


Fig. 6. Concentration of Total and Respirable Dust by Area Samples.

다.

3) 총분진과 호흡성 분진의 폭로 농도 비교

동일작업장에서 측정된 총분진에 대한 호흡성 분진의 농도비를 백분율로 환산하여 보면 분체 제조 공정의 옥내작업 공정에서 6.0-3.1%, 옥외작업 공정에서 34-37%를 보였다. 단열벽돌 제조 공정에서 10-15% 그리고 세라믹 원료 제조 공정에서 2.0-16%로 나타났다. 전체적으로 살펴보면 호흡성 분진의 농도가 총분진의 농도의 2.0-37%를 차지하고 폭로 농도 범위가 0.35-3.65 mg/m³를 보였다. 그러나 이 결과만으로는 호흡성 분진의 위해성을 평가할 수 없고 분진의 직경 분포와 결정형 유리규산 분석결과와 함께 고려해야 한다.

2. 직경 분포 — 다중 희절분석

분진은 그 종류 및 특성이 매우 다양하나 호흡에 의해 폐에 영향을 미치는 크기를 갖는 분진을 호흡성 분진이라고 한다. 일반적으로 분진의 직경은 대수정규분포를 하는 것으로 알려져 있으며 ACGIH에서는 호흡성 분진을 폐의 가스교환부위(gas-exchange region)에 침착될 때 유해하며 그 공기역학적 직경의 중앙값이 $3.5 \mu\text{m} \pm 0.3 \mu\text{m}$ 이고 기하표준차가 $1.5(\pm 0.1)$ 인 직경분리 포집 효율을 갖는 분진으로 정의하고 있다. 또한 기관지 침착성은 분진은 폐기도(lung airways)와 가스교환부위에 침착되어 유해하며 그 공기역학적 직경의 중앙값이 $10 \mu\text{m} \pm 1.0 \mu\text{m}$ 이고 기하표준차가 $1.5(\pm 0.1)$ 인 직경분리 포집 효율을 갖는 분진이다(ACGIG, 1992). 따라서 작업환경중에 존재하는 분진중에서 실제로 인체에 유해한 분진은 직경이 $10 \mu\text{m}$ 이하인 분진이다.

그림 7과 8은 총분진의 직경 분포를 대수정규확률분포와 대수정규누적확률분포로 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 구조토 공정에서 폭로되고 있는 분진의 직경이 근사적으로 대수정규분포하고 있음을 알 수 있다. 표 7과 그림 9는 각 공정별로 직경 분포를 분석한 결과를 나타내고 있다.

전체 공정에 대해 살펴보면 직경의 총기하평균값이 $7.07 \mu\text{m}$ (범위 0.10-60.0)이고 기하표준편차가 1.43으로 기관지 침착성 분진과 호흡성 분

Table 6. Size Distribution of Diatomaceous Earth Dust by Processes

| Process | Median Size (μm) | Range (μm) | Percentile of dust below 10 μm (%) |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|
| <u>Flour</u> | | | |
| Drying | 3.80 | 0.70-20.0 | 71.3 |
| Packaging | 11.04 | 0.80-60.0 | 43.2 |
| 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 |
| Packaging (Area Sample) | 6.93 | 0.10-22.0 | 69.1 |
| | GM* = 6.57 GSD** = 1.43 | 0.10-60.0 | Average 62.0 |
| <u>Fire Brick</u> | | | |
| Mixing | 13.91 | 0.60-50.0 | 33.0 |
| Grinding 1 | 3.99 | 0.70-20.0 | 83.6 |
| Grinding 2 | 6.61 | 0.60-20.0 | 64.4 |
| Grinding (Area Sample) | 8.75 | 0.10-60.0 | 54.0 |
| Packaging 1 | 6.27 | 0.60-36.0 | 64.9 |
| Packaging 2 | 9.63 | 0.10-60.0 | 51.2 |
| | GM = 7.61 GSD = 1.53 | 0.10-60.0 | Average 58.5 |
| <u>Ceramic Rawls</u> | | | |
| Ore Input | 6.23 | 0.60-45.0 | 64.6 |
| Packaging | 7.94 | 0.10-24.0 | 57.2 |
| | GM = 7.06 GSD = 1.18 | 0.10-45.0 | Average 60.9 |
| Total | GM = 7.07 GSD = 1.43 | 0.10-60.0 | Average 60.4 |

*Geometric Mean

**Geometric Standard Deviation

진에 해당한다고 볼 수 있다. 작업 공정별로 보면 분체 제조 공정의 분진 직경의 기하평균값이 6.57 μm (범위 0.10-60.0), 기하표준편차 1.43이고 단열벽돌 제조 공정의 분진은 기하평균값 7.61 μm (범위 0.10-60.0), 기하표준편차 1.53 그리고 세라믹원료 제조 공정의 분진이 기하평균값 7.06 μm (범위 0.10-45.0), 기하표준편차 1.18로 호흡성 분진의 직경분포를 보여주고 있다. 또한 직경이 10 μm 이하인 분진의 백분율은 분체 제조 공정에서 62.0 %, 단열벽돌 제조공정에서 58.5 %, 그리고 세라믹원료 제조 공정에서 60.9 %를

차지하고 있다. 전체적으로 호흡성 분진의 백분율이 60.4 %를 차지하므로 총분진의 농도가 작업 환경 허용기준을 크게 초과하는 국내작업공정인 경우에는 적절한 작업환경관리 대책 및 작업자 보호대책이 세워지지 않는 경우에는 근로자에게 건강상의 위해가 계속해서 발생할 것으로 예상된다.

3. 결정형 유리규산 - X-선 회절 정성분석

구조토 원광에 대한 대한광업진흥공사와 한국 화학검사소 및 한국동력자원연구소의 성분 분석

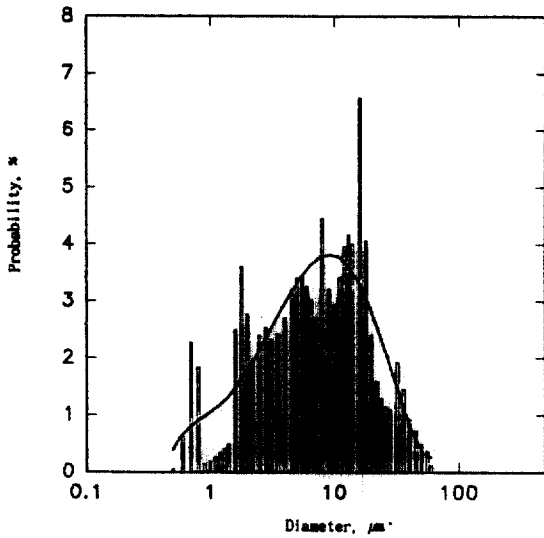


Fig. 7. Size Distribution of Diatomaceous Earth Dust - Lognormal Distribution.

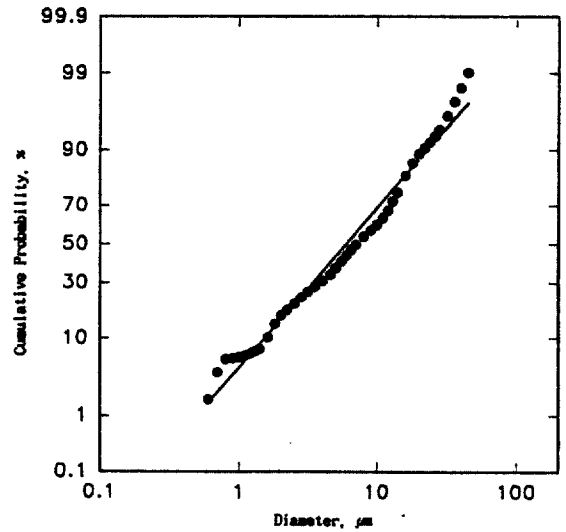


Fig. 8. Size Distribution of Diatomaceous Earth Dust - Cumulative Lognormal Distribution.

결과를 보면 유리규산이 78.4 % 그리고 알루미늄이 10.43 %로 주요 성분을 이루고 있다. 따라서 규조토 분진속에도 같은 비율로 유리규산이 함유되어 있을 것으로 추정된다.

유리규산은 앞에서 살펴보았듯이 비결정형인 경우에는 총분진으로 허용기준을 설정하고 있으나 결정형인 경우에는 호흡성 분진으로 각 결정 성분에 따라 석영에 대해서는 0.1 mg/m^3 으로 크리스토팔라이트와 트리디마이트에 대해서는 0.05 mg/m^3 으로 엄격하게 허용기준을 정하고 있다. 그

리므로 규조토 분진중에서 결정형 유리규산이 존재하면 작업환경에 대한 평가를 단순히 총분진만으로 평가할 수 없고 결정형 유리규산을 분석 평가하여야 한다(ACGHI, 1986).

표 7을 보면 각 옥내작업공정의 거의 모든 분진에 석영과 크리스토팔라이트 또는 트리디마이트가 존재하고 있음을 알 수 있다.

각각의 결정형 유리규산의 공기중 농도에 대해서는 정밀한 정량분석을 통하여 평가하여야 하나 본 작업환경측정 조사에서는 정량을 하지 못하고

Table 7. Results of X-ray Diffraction Qualitative Analysis of Respirable Dust by Processes

| Process | Crystalline Silical | |
|---------------------|---------------------|-------------------------|
| | Quartz | Cristobalite, Tridymite |
| <u>Flour</u> | | |
| Ore Input | ○ | ○ |
| Packaging | ○ | ○ |
| Loading | ○ | ○ |
| Tonbag Packaging | ○ | ○ |
| Carrying | ○ | × |
| <u>Fire Brick</u> | | |
| Grinding | ○ | ○ |
| Packaging | ○ | ○ |
| <u>Ceramic Raws</u> | | |
| Ore Input | ○ | ○ |
| Maintenance | × | × |

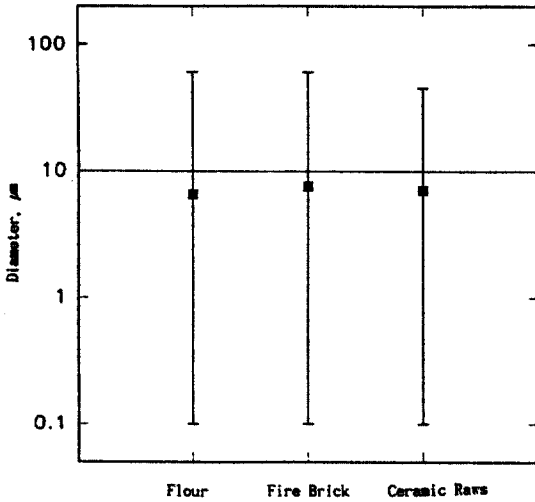


Fig. 9. Median Size and Range of diatomaceous Earth Dust by Process.

정석분석만을 하였다. 그러나 결정형 유리규산의 호흡성 분진의 측정 분석방법중에 하나인 X선 회절분석방법의 최소검출한계량 $5 \mu\text{g}$ 을 근거로 하여 작업환경중에 존재하는 결정형 유리규산의 최소량을 추정하여 보면 대략 $0.011-0.038 \text{ mg/m}^3$ 정도의 수준으로 판단된다. 세라믹원료 공정의 성형작업에서 결정형 유리규산이 검출되지 않은 것은 작업자가 시료채취시에 기계정비를 하고 있었기 때문으로 생각된다.

이상의 결과를 고품로군(분체 제조 공정, 단열

벽돌 제조의 연마작업, 세라믹원료 포장작업공정)의 호흡성 분진 폭로농도 $1.18-3.65 \text{ mg/m}^3$ 와 비교하여 고려하면 구조토 분진중에 결정형 유리규산이 1% 이상 포함되어 있을 가능성이 높다. 따라서 구조토 총분진에 대한 허용기준의 규정(결정형 유리규산의 함유율이 1% 미만인 구조토에 적용)에 따라 구조토 공정에 대해 단순히 총분진 농도만을 비교하여 작업환경을 평가하기에는 무리가 있다. 그러므로 옥내작업공정에는 결정형 유리규산이 존재하고 분진자체의 직경 분포가 전형적인 호흡성 분진에 해당하므로 작업환경 관리 및 작업자 보호 대책을 수립할 때 반드시 호흡성 분진과 결정형 유리규산을 함께 고려해야 할 것이다.

4. 작업환경개선 — 공학적 대책

1) 국소배기시설의 평가

각 공정에서 국소배기시설에서 제어속도나 개구면속도 측정이 가능하였던 곳의 국소배기 성능 측정결과는 표 8과 같다. 각 공정에 설치되어 있는 국소배기는 대부분이 포위식 후드로 설계되어 있었고 분진이 많이 누출되는 지대포장작업 공정에는 플렉시블 덕트가 추가적으로 설치되어 있었다. 분진의 폭로농도가 낮은 수준을 보인 옥외작업공정에서는 국소배기시설이 있었으나 가동하지 않고 있었다. 또한 세라믹 원료 제조 공정중에서

Table 8. Characteristics of Local Exhaust Vntilation

| Process | Type | Control Velocity (m/sec) | Face Velocity (m/sec) |
|-------------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Flour | | | |
| Crushing 1 | Enclosing Hood | Impossible to measure | 0.40-0.45 |
| Crushing 2 | Enclosing Hood | " | 0.70 |
| Packaging | Flexible Duct-1 | 0.10 | 1.50 |
| | Flexible Duct-2 | 0.50 | 9.00 |
| | Flexible Duct-3 | 0.50 | 17.00 |
| Fire Brick | | | |
| Grinding | Enclosing Hood-1 | Impossible to measure | Entrance : 3.20 Exit : 5.00 |
| | Enclosing Hood-2 | " | Entrance : 3.50 Exit : 4.80 |
| | Enclosing Hood-3 | " | Entrance : 4.00 Exit : 4.00 |

성형기에는 국소배기시설이 설치되어 있지 않았으며 총분진 농도가 높았던 세라믹 포장작업 공정에는 새로운 국소배기시설을 설치중에 있었다. 한편 컨베이어에 실려 규조토 분체가 각 공정으로 이송될 때 노출된 곳과 컨베이어를 밀폐한 덮개 틈사이에서 작업환경중으로 분진이 비산하는 상태였으나 컨베이어에는 국소배기시설이 없었다.

작업환경을 관리하기 위한 국소배기 설치시에는 오염원에서 발생하는 오염물질의 종류와 그 물질의 위해성 및 물리화학적 특성을 고려하여 최소 제어속도와 최소 덕트(반송)속도 및 배기유량을 결정하게 된다. 일반적으로 분진이 발생하는 작업공정에서 컨베이어와 분쇄기에 대한 최소 제어속도는 1.016-2.540 m/sec이고 연마작업에서는 최소 제어속도가 2.54-10.16 m/sec로 권고되고 있고, 덕트내의 반송속도는 수평덕트 부분에 분진이 쌓이는 것을 방지하기위해 최소 17.78-20.32 m/sec로 권고하고 있다(ACGIH, 1992). 실제 측정결과와 비교하여 보면 분체 제조공정의 1,2차 분쇄작업인 경우에 포위식 후드로 분쇄할 때 발생하는 분진의 제어속도는 측정할 수 없었으나 개구면에서 작업장으로 분진이 비산되고 있으므로 개구면에서의 속도를 실질적인 제어속도로 고려하여 측정한 결과 0.40-0.70 m/sec로 권고 최소 제어속도보다 미달하는 수준이었다. 또한 포장기에 설치되어 있는 플렉시블 덕트의 경우에는 분체 출구부근의 제어속도가 0.10-0.50 m/sec로 측정되어 최소 제어속도에 못미치고 있었다. 단열벽돌 제조 공정의 연마기에는 포위식 후드가 3개 설치되어 있었고 벽돌 입구와 출구의 실질 제어속도가 각각 3.2-4.0, 4.0-5.0 m/sec로 측정되어 권장 최소 제어속도 2.54-10.16 m/sec를 어느 정도 만족하고 있었으나 벽돌 입구와 출구에서 벽돌을 연마할 때 발생된 연마 분진이 작업장으로 많이 비산하고 있었다. 따라서 분체공정에 설치되어 있는 각 후드의 제어속도를 권장 최소 제어속도 이상으로 향상시켜야 하며 연마기에 설치되어 있는 국소배기 후드의 경우에는 최소 제어속도를 10.16 m/sec이상으로 향상시켜야 할 것이다.

2) 규조토 분진 폭로 감소 대책 — 국소배기시설 개선

각 공정에 국소배기시설이 설치되어 있었으나 국소배기시설 성능평가에서 살펴보았듯이 분진발생원에서 측정한 국소배기시설의 제어속도가 최소 제어속도에 미달하는 상태였다. 작업환경을 개선하기위한 기존의 국소배기시설 성능 향상과 개선방법을 살펴보면 다음과 같다.

〈분체 제조 공정〉

1,2차 분쇄기

(1) 개구면에서의 제어속도를 현재의 0.40-0.45 m/sec에서 최소 제어속도 1.016-2.540 m/sec로 향상시켜야 한다.

(2) 분쇄기 자체의 회전운동에 의해 분진이 투입구와 개구면에서 비산하므로 1차 분쇄기의 원광석 투입구를 제외한 개구면에 덮개를 설치하여 제어속도를 증가시키고 하고 분진비산을 감소시킨다.

(3) 후드의 틈새, 분체의 출입구 등 분진이 비산하는 곳은 최대한 밀폐한다.

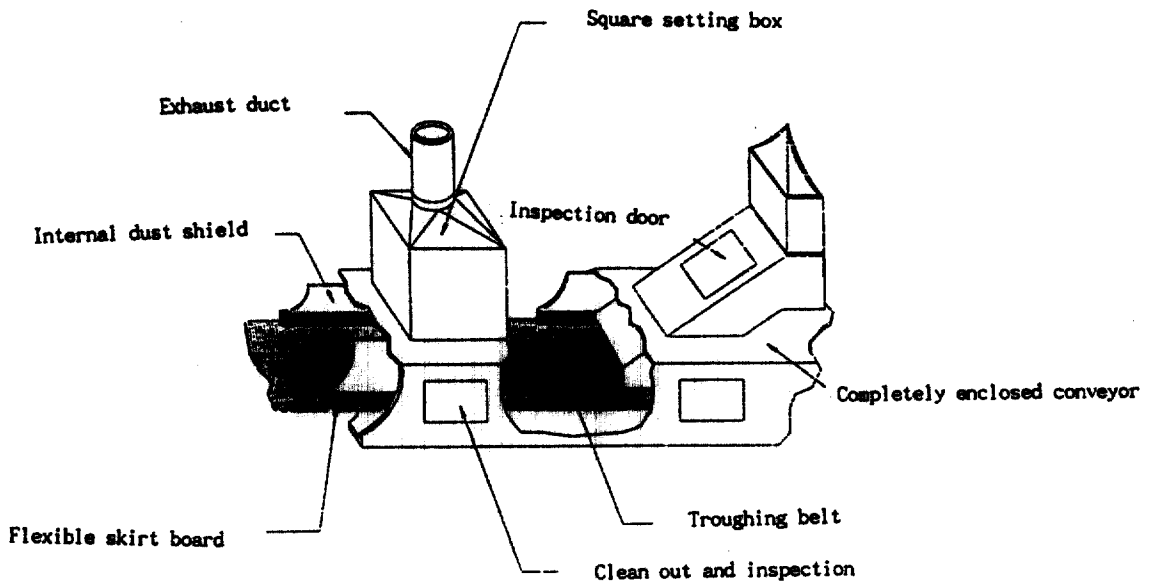
컨베이어 — 그림 10참조

(1) 컨베이어 전환점에 포위식 후드를 설치, 개구면에서 최소제어속도를 1.016-2.540 m/sec로 한다.

(2) 작업에 지장이 없는 한 말단 개구부를 최대한 밀폐한다.

(3) 컨베이어 중간부분은 완전히 밀폐한 포위식 후드를 설치하여 분체 이송도중에 분진이 비산하는 것을 방지한다.

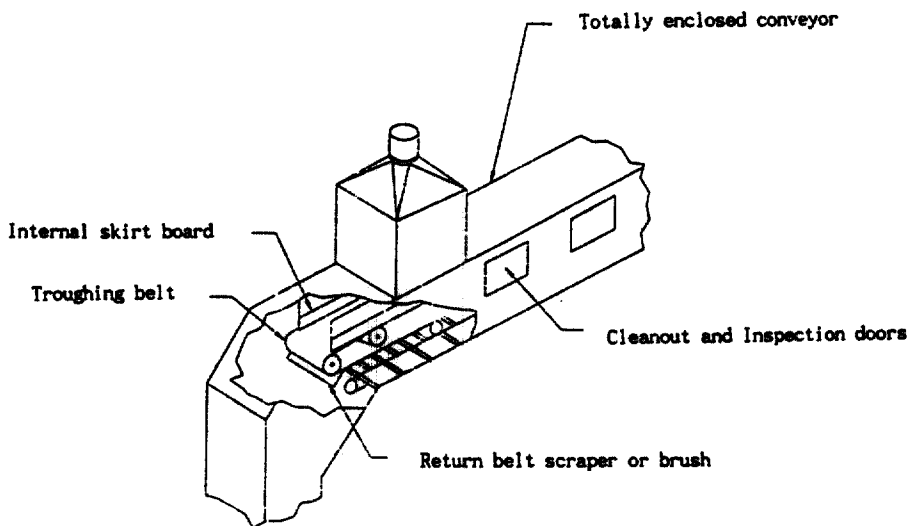
(4) 컨베이어 벨트가 되돌아오는 쪽의 벨트에 부착되어 있는 분진이 벨트의 진동에 의해 낙하 비산한다. 이것을 방지하기 위해서는 되돌아오는 벨트 아래에 분체 털이술과 분체를 받는 장치를 설치하든가 또는 벨트의 청소용 슬롯식 후드(흡인 슬롯)를 설치해 부착되어 있는 분진을 빨아내도록한다.



Minimum duct velocity = 18 m/sec

Exhaust Rate $Q = 76 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ of open area

Fig. 10-1. Local Exhaust Ventilation Hood of Conveyor (Belt Loading).



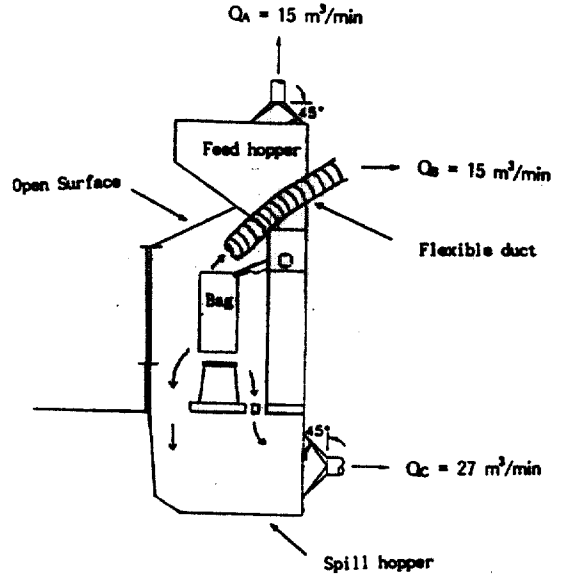
Minimum duct velocity = 18 m/sec

Exhaust Rate $Q = 76 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ of open area

Fig. 10-2. Local Exhaust Ventilation Hood of Conveyor (Head Pulley).

분체 포장기—그림 11참조

- (1) 포장구에 설치되어 있는 플렉시블 덕트의 개구면에서의 유입속도를 18 m/sec으로 향상시킨다.
- (2) 포장지에 분체가 투입될 때 포장지속에 압력이 가해져 분진이 누출되므로 실밥을 2중으로 촘촘히 박은 포장지로 대체하여 사용하도록 한다.
- (3) 포장대에 포위식 후드에 지면에 흘러 넘치는 분체받이 호퍼를 새로 설치하여 배기시킨다.
- (4) 포위식 후드 윗면은 개구면으로 하고 앞면에는 포장을 꺼내는 문을 설치한다.



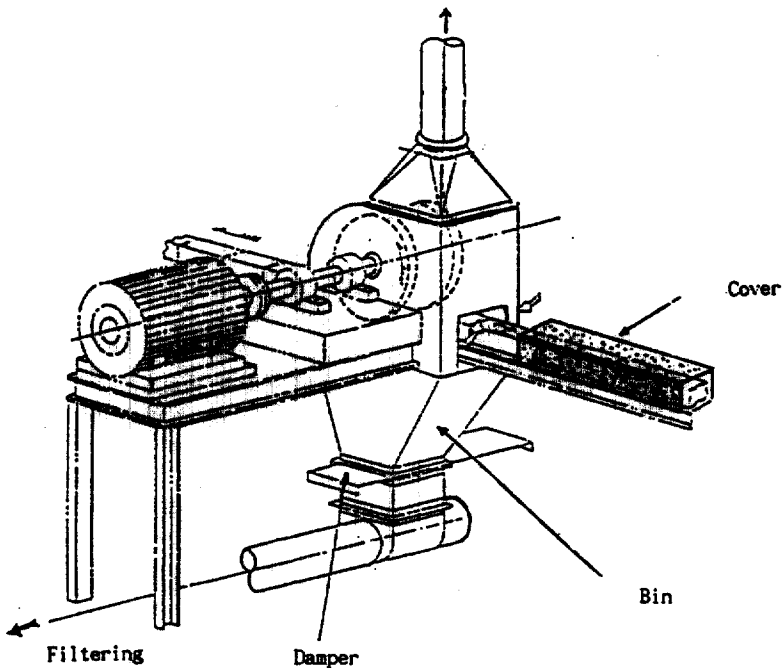
<단열벽돌 제조 공정>

연마기—그림 12참조

- (1) 연마숫돌의 회전으로 숫돌바퀴에서 분진의 비산속도가 크므로 연마 분진이 단열벽돌 입출구

Minimum duct velocity = 18 m/sec

Fig. 11. Local Exhaust Ventilation Hood of Flour Packaging.



Minimum duct velocity = 18 m/sec

Exhaust Rate Q = 40 m³/min

Fig. 12. Local Exhaust Ventilation Hood of Fire Brick Grinding.

에서 후드 밖으로 비산한다. 이것을 방지하기 위해서는 연마기에 설치되어 있는 국소배기 후드의 최소 제어속도를 10.16 m/sec 이상으로 향상시켜야 한다.

(2) 단열벽들의 출입구 역할을 하는 후드 개구부의 면적을 최대한 작게 밀폐시킨다.

(3) 단열벽들이 이동되는 트랙을 작업에 지장을 주지 않는 한 덮개로 완전히 밀폐한다.

(4) 연마기 하부에 완전 밀폐된 먼지저장실을 설치하여 연마분진이 밑으로 누출되는 것을 방지한다.

IV. 결 론

총분진과 호흡성 분진 측정 분석결과 구조토 가공 공정 중에서 옥내작업공정으로 이루어지는 분체 개조 공정, 단열벽돌 제조 공정 중에서 연마 및 포장작업 그리고 세라믹원료 포장작업이 총분진의 허용기준을 초과하는 유해한 작업 공정으로 확인되었다. 또한 직경 분석 및 결정형 유리 규산 분석을 통해서 작업환경중에 존재하는 구조토 분진이 호흡성 분진에 해당하며 결정형 유리규산이 최소한 1% 이상 함유되어 있는 것으로 판단되었다. 따라서 가공 공정 중에서 구조토 분진 발생원에서 적절한 공학적 관리대책을 수립하여 작업자에 대한 구조토 분진의 폭로를 최대한으로 줄여 나가야 할 것이다.

1. 폭로군별 총분진 폭로농도와 호흡성 분진의 폭로농도는 근사적으로 정규분포하는 것으로 나타났다. 고폭로군의 총분진 폭로농도는 평균 18.30 mg/m³(범위 8.86-35.51)으로 허용기준을 초과하는 상태였으며 저폭로군의 평균폭로농도 2.69 mg/m³(범위 0.40-4.22)보다 6.8배나 높았다.

2. 호흡성 분진은 고폭로군이 평균 2.20 mg/m³(범위 1.18-3.65)으로 저폭로군의 평균농도 0.57 mg/m³(범위 0.35-1.15)보다 3.9배 높은 폭로수준을 보이고 있다.

3. 분체 제조 공정과 단열벽돌 제조 공정의 옥내작업 총분진 평균폭로농도가 각각 16.64, 19.38 mg/m³로 모두 작업환경 허용기준을 초과하였다. 세

라믹 원료 제조 공정의 작업은 세라믹 원료의 선별 포장작업에서 측정된 총분진 평균폭로농도가 17.70 mg/m³으로 허용기준을 초과하였다.

4. 구조토 분진의 직경분포는 총기하평균이 7.07 μm(범위 0.10-60.0)이고 기하표준편차가 편차 1.43으로 기관지 침착성 분진과 호흡성 분진에 해당하였다.

5. 작업 공정별로 보면 분체 제조 공정의 분진이 기하평균 6.57 μm(범위 0.10-60.0), 기하표준편차 1.43이고 단열공정의 분진은 기하평균 7.61 μm(범위 0.10-60.0), 기하표준편차 1.53 그리고 세라믹원료공정의 분진이 기하평균 7.06 μm(범위 0.10-45.0), 기하표준편차 1.18로 나타났다.

6. 직경이 10 μm 이하인 분진의 백분율은 전공정에서 평균 60.4%로 나타났다.

7. 호흡성 분진으로 채취한 시료에서 석영과 크리스토팔라이트 또는 트리디마이트의 결정형 유리규산이 존재하고 있었다.

8. 국소배기시설 성능평가 결과 분진발생원에서 측정된 국소배기시설의 제어속도가 최소제어 속도에 미달하는 상태였다.

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
- 윤영노, 김영식: 태백지역 석탄광산의 작업부서별 호흡성 분진의 폭로농도, 근로복지공사 중앙병원부설 직업병연구소, 직연보 10-89-10, 1989
- 임현술, 김지용, 이원재, 윤임중: 구조토 가공업체에서 발생한 구조토폐증의 진행에 관한 추적조사, 대한산업의학회지 1993;5(2):195-204
- 임현술, 이원재, 윤임중: 구조토 가공업소에서 발생한 구조토폐증에 대한 조사, 대한산업의학회지 1991;4(1):61-69
- 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: *Industrial Ventilation—A Manual of Recommended Practice*, 21st ed, Lansing, Mich, ACGIH, 1992

ACGIH: *Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices for 1992-1993*, Cincinnati, Ohio, ACGIH, 1992

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

106-125

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

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