

일부 분진 작업장에서의 공기중 분진 입경분포

김영식 · 이병인 · 홍성철

국립밀양전문대학 환경보호과

A Survey of Particulate Size Distribution in Work Environment

Kim Young Sik · Yi Pyong In · Hong Sung Chul

*Miryang National Junior College
Dept. of Environmental Protection*

ABSTRACT

Authors investigated the particulate size distribution in work environment of Banwol and Changwon industrial complex. Size distributions of particles exposed to workers in welding and in grinding process were evaluated by ambient cascade impactors.

Respirable matter fractions were calculated from the size distribution data by the respirable particle mass of the ACGIH criteria.

I. 서 론

공기 중에 부유하는 분진은 입경 면에서 $100\mu\text{m}$ 이하로 알려져 있으며 입경에 따라 인체의 폐조직에 침착되는 부위가 다른 것으로 알려져 있다. 따라서 분진 사업장에서 발생하는 부유분진의 입경분포를 파악하는 것은 진폐예방 측면에서 공학적 개선 방안을 강구하는데 중요한 자료일 뿐만 아니라 근로자 건강 보호 측면에서도 중요하다.

그러므로 분진 사업장의 작업장내 공기 중에 부유하는 분진의 입경을 조사할 필요가 있으며 근로자에게 진폐를 유발시키는 입경의 파악과 진폐예방을 위해서라도 입경조사는 필수적이다.

호흡성 분진은 그 크기면에서 폐 내에 침착되어

진폐를 유발할 잠재력이 높은 분진이므로 ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)에서 분진과 관련된 TLVs를 적용하는데 size-selective sampling을 적용하여야 한다고 하였다.¹⁾

공기 중에 부유하고 있는 분진 중에서 호흡성 분진의 크기에 해당하는 입경이 차지하는 비율이 어느 정도인가는 진폐와 관련하여 진폐를 유발하는 분진의 평가나 예방의 관점에서 중요하다. 또한 호흡성 분진의 제거는 새삼 논할 필요가 없을 것이다.

일부 분진 사업장에서 발생하는 부유분진 중의 입경분포에 관한 조사가 드문 실정이며, 공기 중에 부유하는 분진 중에 호흡성 분진이 차지하는 비율이 어느 정도인가에 대한 조사도 거의 없는

*본 논문은 직업병 연구소 연구사업으로 수행된 논문임.

실정이다.

그러므로 분진 사업장에서 발생하는 부유분진 중 호흡성 분진이 차지하는 비율을 파악하고 향후 분진 작업장의 입경분포에 관한 조사나 연구를 위하여 전단계 조사로서 경기도 반월지역과 경남 창원에 위치한 중전기 제조업체의 일부 분진 사업장을 대상으로 조사하였다.

II. 방법과 재료

1. 조사대상과 시기

조사대상은 경기도 반월지역의 일부 분진 발생 사업장과 경남 창원에 위치한 중전기를 제조하는 중공업체를 대상으로 조사가 가능한 13개 사업장을 선정하였다.

조사대상 사업장의 측정지점은 공장 배치도와 작업공정 도면을 검토하여 분진 발생 실태를 파악한 후 근로자의 행동영역과 작업을 고려하여 선정하였다.

부유분진의 입경분포 조사대상은 주로 용접, 기계 가공, 사상 등의 작업이 진행되고 있는 부서로 하였으며 이들 사업장의 대부분이 용접 작업을 하고 있었기 때문에 용접 작업을 주 대상으로 조사하였다.

조사시기는 1990년 9월부터 동년 11월까지였다.

2. 기 기

1) 다단형 입경 분리 포집기(Ambient cascade impactor) : Andersen Samplers Inc.의 Model 2110K로 각 단계 분진이 과도하게 포집되어 발생하는 분진의 과부하(overflow)현상을 막기 위한 cyclone preseparator가 유입부에 있으며 10단(stage)으로 구성되어 있으며 사용 유량은 3Lpm이었다. 펌프는 $\pm 5\%$ 의 유량을 일정하게 유지하는 기능이 있으며 12V 직류전원을 사용하였다. 사용 전후에 유량을 보정하였고 조사시간 동안 유량의 변동이 없었다.

각 단의 등가 공기 역학경 절단 입경(cut-size)은 Table 1과 같다.

2) 유량보정계(Pump calibrator) : 비누거품을 사용하는 soap bubble calibrator로 개인용 입경 분리 포집기의 보정은 MAS사의 Model A로 100

Table 1. Aerodynamic equivalent particle diameter at 50% collection efficiency

Stage No.	Cut-size(μm)
Cyclone	21
1	28
2	17
3	6.8
4	4.1
5	2.6
6	1.5
7	0.84
8	0.54
9	0.33
10	0.08

-4,000 ml/min의 범위에서 0.1 ml/min까지 유량보정이 가능한 기종이다.

3) 직시천평(Electrobalance) : Shimadzu L-200SM으로 0.01 mg까지 판독이 가능하다.

3. 재 료

Glass fiber collection substrate : 공기 중의 부유분진의 입경별 포집용으로써 직경 47mm 유리섬유 여지로 된 slot가 4개인 collection substrate로 Andersen Samplers Inc.사에서 구입하였다.

4. 측정 방법

부유분진의 입경분포를 파악하기 위하여 다단형 입경 분리 포집기를 분진이 발생하고 있는 부서에 설치하여 포집하여 시료는 실험실로 운반하여 분진의 무게를 측정하였다.

부유분진의 입경분포 측정은 근로자에게 작업의 방해를 주지 않도록 작업장의 바닥면에서 75~120cm의 높이에 평판을 설치하여 그 위에 다단형 입경 분리 포집기를 설치하여 포집하였으며 다단형 입경 분리 포집기의 유입부는 기류 방향에 대해 직각으로 향하도록 하고 수평을 유지하였다.²⁾

여과지와 collection substrate는 수분조절기(desiccator)에서 24시간 건조시킨 후 칭량하였으며 5회 반복하여 산정하였다. 여지 무게(mg)에 대한 정밀도(시료수 \times 측정수)는³⁾ 0.02%(0.00~

0.08%) (660 × 5)였다.

5. 자료 분석 방법

시료 채취 전후의 각 단의 여지 무게를 실험실에서 칭량한 후 각 단별로 분진의 무게 비율과 누가 비율을 계산하여 대수확률지(log probability graphs)의 가로축은 입경, 세로축은 누적비율로 표시한 후 각 단의 입경에 해당되는 분진의 누적비율로 표시한 다음 도식화하여 기하평균(mass median diameter)과 기하표준편차(geometric standard deviation)을 구한다. 이 때 기하평균은 각 단의 입경분포가 대수분포를 한다는 가정하에 대수확률지의 누적 비율을 표시한 50%에 해당되는 입경을 말하며 기하표준편차는 다음 식 1을 사용하여 구한다.

$$\text{기하표준편차} = \frac{\text{누적비율 84\%에 해당되는 입경}}{\text{기하평균}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{또는} = \frac{\text{기하평균}}{\text{누적비율 16\%에 해당되는 입경}}$$

호흡성 분진의 비율은 ACGIH에서 정의한 그래프 방법(graphic method)이 현재 사용되고 있으며 구하는 방법은 다음과 같다.⁴⁾

- 1) 입경분포 조사 결과를 확률대수지에 입경과 누적비율을 도식화한다.
- 2) 각 단의 하한(lower size), 중간(midpoint size), 상한(upper size)값에 해당되는 입경의 누적비율을 구한다.
- 3) ACGIH의 정의에 의한 호흡성 분진을 대수확률지에 누적비율이 15.9%일 때 5.25 μm, 누적비율이 50%일 때 3.5 μm, 누적비율이 84.1%일 때 2.33 μm의 값을 도식화한다.
- 4) 각 단의 상한, 하한, 중간값의 입경에 해당되는 누적비율을 ACGIH에서 규정한 호흡성 분진의 입경분포곡선에서 구한다.
- 5) 4)에서 구한 값을 식 2의 심프슨 공식(Simpson's rule)을 사용하여 평균 호흡성 분진 비율을 산출한다.
- 6) 각 단의 분진 비율(mass fraction, %)과 5)에서 구한 평균 호흡성 분진 비율을 곱하여 호흡성 분진 비율을 구한다.

7) 각 단의 호흡성 분진 비율의 합을 구하고 이 값이 조사한 입경분포에서 차지하는 호흡성 분진의 비율이다.

$$RF = \frac{(RF_{LL} + 4(RF_{MP}) + RF_{UL})}{6} \dots\dots\dots (2)$$

여기서

- RF : 평균 호흡성 분진 비율
- RF_{LL} : 하한 입경에서 호흡성 분진 비율
- RF_{MP} : 중간 입경에서의 호흡성 분진 비율
- RF_{UL} : 상한 입경에서의 호흡성 분진 비율

Ⅲ. 결과 및 고찰

경기도 반월지역의 일부 분진 사업장과 경남 창원에 위치한 중진기를 생산하는 중공업체를 대상으로 공기 중에 부유하는 부유분진의 입경분포를 다단형 입경 분립 포집기로 측정된 결과는 다음과 같았다.

포집한 시료 중에서 포집된 분진의 양이 저울의 눈금 한도의 10배가 되지 않는 0.1mg이하의 것은 제외하였고,²⁾ 입경 분립 포집기의 collection substrate중 분진이 과도하게 포집된 것(overload)이나 각 단에서 0.1mg이하의 것이 포함된 시료는 제외하였다.⁵⁾

본 조사에 사용한 다단형 입경분립 포집기의 수가 적어서 많은 시료의 포집에 어려움이 있었고 사업장의 사정으로 인하여 반복 측정이 불가능하였으며, 또한 다단형 입경 분립 포집기의 적절한 시료 채취를 하는데 있어서 시료 채취 시간의 부족으로 인하여 시료의 포집량이 부족한 것이 많았는데 특히 기계 가공 및 사상의 경우가 심하였으며, 이는 작업 공정중에 계속 작업에 임하는 것이 아니라 필요시 수시로 작업하는 경우가 많았기 때문이다.

위에서 언급한 이유와 제한된 입경 분리 포집기로 인하여 전체 시료의 30% 정도 밖에 활용할 수 없었다.

1. 부유분진의 입경분포

진폐증은 산업장에서 발생하는 각종분진을 흡입함으로써 체에 불가역적인 병리학적 변화, 즉 분진과 관련하여 섬유조직의 증식 또는 분진에 의

한 망상형성(reticulation)의 병적 변화가 생기는 것을 주요 소견으로 한다.

이러한 진폐증의 발생에 다음과 같은 여러 인자가 있다.

- 1) 분진의 농도
- 2) 분진의 입경분포
- 3) 분진의 물리 화학적 성질
- 4) 분진농도의 시간 공간적인 변화

이 중에서 가장 영향을 미치는 것이 분진의 입경분포로 침적 위치가 입경에 따라 기도 내에서 침적되는 위치가 다를 뿐만 아니라 분진의 농도와 크기에 따라 근로자가 직업병에 이환되는 기간이 달라지게 된다.

일반적으로 공기중에서 부유하는 분진은 입경면에서 100 μm 이하로 알려져 있으며, 입경에 따라 침착되는 부위가 다른 것으로 알려져 있다.^{6,7)}

폐에 침착되어 진폐를 유발시키는 분진을 호흡성 분진이라 하며 미국의 ACGIH(1990)에서는 기하평균이 3.5 \pm 0.3 μm 기하표준편차가 1.5(\pm 0.1)라고 정의 하였다. 따라서 근로자에게 폭로되는 분진의 농도도 중요하지만 근로자의 보호 측면에서 입경분포는 중요하다.

미국의 ACGIH(1990)에서 분진과 관련된 TLVs를 적용하는데 size-selective sampling을 3가지로 분류하였다.

1) Inspirable particulate mass TLVs(PSS-TLVs) : 기도(respiratory tract)내에 침착되어 유해하게 되는 분진에 적용하며 포집효율(E)이 50(1 + exp[k - 0.06 d_a]) \pm 10인 분진을 말하며, 공기역학경(d_a)은 0 < d_a \leq 100 μm 범위를 갖는다.

2) Thoracic particulate mass TLVs(TPM-TLVs) : 폐내의 통기관(lung airway)과 가스교환부위(gas-exchange region)에 침착되어 유해하게 되는 분진에 적용하며 양적인 면에서 입경의 대수정규분포 누적곡선(cumulative log-normal function)상의 공기역학경의 중앙값이 10 \pm 1.0 μm 이며 기하표준편차가 1.5(\pm 0.1)인 입경분리 포집효율을 갖는 입자로 구성된 분진을 말한다.

3) Respirable particulate mass TLVs(RPM-TLVs) : 가스 교환 부위에 침적하는 물질에 적용하며 공기역학경의 중앙값이 3.5 \pm 0.3 μm 이며 기하표준편차가 1.5(\pm 0.1)인 입경분리 포집효율을

갖는 입자로 구성된 분진으로 정의하였다.

그러므로 작업장내 공기 중 부유하는 분진 중에서 폐에 침착되는 분진의 크기에 해당되는 입경이 차지하는 비율이 어느 정도인가를 파악하는 것이 진폐 예방의 측면에서 공학적 개선 방안을 강구하는데 중요한 자료일 뿐만 아니라 근로자의 건강 보호 측면에서도 중요하다. 따라서 일부 분진 사업장을 대상으로 입경분포를 조사한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Size distribution of particles

Process	Mass median diameter, μm	Geometric standard deviation
Welding	0.56	7.29
Welding	0.28	16.07
Welding	0.60	6.17
Welding	0.37	7.27
Welding	0.44	7.50
Welding	0.60	8.33
Welding	0.48	7.29
Welding	0.25	19.20
Welding	0.40	7.50
Welding	0.41	7.52
Welding	0.53	6.79
Welding	0.54	7.04
Welding	0.33	7.27
Grinding	1.90	19.00
Grinding	1.20	6.00
Grinding	1.90	6.79

+ 기하평균은 mass median diameter임.

Table 2에서 입경의 기하평균은 입경분포를 대표하는 입경으로서 mass median diameter를 의미하고 기하표준편차는 입경분포의 정도를 나타내는 것으로 기하표준편차가 1.00일 때 단분산(monodisperse)한다고 말한다. 즉 그 때의 입경이 모두 같은 것을 의미하고 기하표준편차가 크면 입경의 차가 심한 것 - 입경의 분포가 큰 것 - 을 말한다.

Table 2에 나타난 바와 같이 mass median diameter가 0.28~1.90 μm 로 ACGIH의 size-selective sampling criteria의 분류에 의하면 흡인성 분진보다 작은 입경을 나타내고 있었다.

2. 부유분진의 호흡성 분진 비율

근로자에게 폭로되는 분진 중에서 진폐를 유발하는 것으로 알려진 호흡성 분진이 어느 정도인가를 파악하는 것은 분진의 잠재적 유해도(potential hazard)를 측정하는데 도움이 된다. 다시 말해서 호흡성 분진이 차지하는 비율이 높다는 것은 같은 분진농도라도 호흡성 분진의 비율이 낮은 분진보다 진폐의 발생 확률이 높다는 것을 의미하고 분진 작업장에서 근무하는 근로자의 근무시간이 동일하더라도 즉, 폭로시간이 동일하더라도 진폐에 이환될 가능성이 크다는 것을 의미한다.

그러므로 입경분포 자료에서 호흡성 분진이 차지하는 비율을 계산하였으며 부유분진중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율은 Table 3과 같다. Table 3에 나타난 것과 같이 공기 중에 부유하고 있는 분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율이 가장 높은 것은 73.50%이고 가장 낮은 것은 43.7%이었다. 따라서 조사대상 사업장의 부유분진이 진폐를 일으킬 확률이 높은 것으로 나타났다.

Table 3. Respirable mass fraction of particles

Process	Respirable mass fraction(%)
Welding	63.68
Welding	73.40
Welding	65.15
Welding	70.06
Welding	69.06
Welding	63.72
Welding	66.74
Welding	70.46
Welding	70.13
Welding	65.77
Welding	65.28
Welding	70.13
Welding	73.50
Grinding	44.23
Grinding	49.96
Grinding	43.70

IV. 결 론

분진 작업장의 입경분포와 관련된 조사와 연구를 위하여 입경 분립 포집기(cascade imactor)를 사용하여 경기도 반월지역의 일부 분진 발생 사업장과 경남 창원에 위치한 중전기를 제조하는 중공업체를 대상으로 조사가 가능한 13개 사업장을 대상으로 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 용접공정의 부유분진 입경은 0.28~1.60 μ m 연마 공정은 1.20~1.90 μ m으로 ACGIH의 분류에 의하면 흡인성 분진보다 작은 입경을 나타내고 있다.
2. 공기 중에 부유하고 있는 분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율이 가장 높은 것은 용접공정의 73.50%이고 가장 낮은 것은 연마공정의 43.7%이었다.

참 고 문 헌

- 1) ACGIH, Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices 1990~1991, Cincinnati, ACGIH, 1990.
- 2) 通商産業省立地公害局, 鑛山における粉塵濃度のマニュアル, 東京, 鑛業労働災害防止協會, 1986.
- 3) APHA-AWWA-WPCF, Standard methods, 15th ed, Washington, APHA, 1981.
- 4) Lodge JP, Chan TL, Cascade impactor, Sampling and data analysis, Akron, Am Ind Hyg Assoc, 1986.
- 5) Clayton GD, Clayton FE, Patty's industrial hygiene and toxicology, 3rd ed, vol 3, New York, Wiley, 1978.
- 6) Paul F. Holt, Inhaled dust and disease, New York, John Wiley & Sons, 1987.
- 7) 조규상, 진폐증, 카톨릭산업의학센터, 1985.