

有害 粉塵事業場의 粉塵制御에 關한 研究

김영식 · 오광중*

밀양산업대학교 환경공학과, *부산대학교 환경공학과

A Study on Control of Dusts in Work Environment

Young-Sik Kim and Kwang-Joong Oh*

Department of Environmental Engineering, Miryang National University

*Department of Environmental Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

Authors investigated the size distribution and mass fraction of dusts in work environment of Changwon industrial complex. Size distribution of suspended dusts in welding and grinding processes were evaluated using ambient cascade impactors. The mass median diameters of dusts were 0.25 to 0.60 μm at welding sites and 1.20 to 1.92 μm at grinding sites. Respirable mass fractions were 63.68 to 73.50% at welding sites and 43.24 to 51.47% at grinding sites. Respirable fractions were calculated from the size distribution data for the ACGIH criteria by the respirable particle mass. In case of dust removal system, electrostatic precipitator and bag filter were appropriate for welding process and grinding process, respectively.

Keywords: size distribution, ambient cascade impactor, respirable mass fraction

I. 서 론

산업장에서 분진이 발생하는 경우는 물질의 분쇄, 절단, 가공 및 포장, 용접시 주로 공기 중에 비산하며¹⁾ 분진의 특성은 공정과정에서 사용되는 시설 즉 연마기, 분쇄기 등의 종류와 규모, 조업방법 그리고 화학적인 반응과 방법에 따라 달라진다.

공기 중에 부유하는 분진은 입경면에서 100 μm 이하로 알려져 있으며,²⁾ 대한산업보건협회 1993년도 조사에 의하면 전체 직업병의 41.5%가 유해분진에 의해 발생하는 진폐증으로 최근에는 업종의 다양화로 인하여 점차 증가하는 추세에 있다.³⁾ 따라서 분진사업장에서 발생하는 부유분진의 제어는 진폐예방의 측면과 작업환경의 개선으로 인하여 기업의 생산성을 증대시킬 수 있다.

이러한 공학적 개선방안을 강구하기 위해서는 발생하는 분진의 입경분포와 이중 호흡성분진이 차지하고 있는 비율을 파악함으로써 효과적인 집진장치 시설의 선정과 설계에 이용할 수 있다. 그러나 제조업에서 발생하는 분진에 관한 연구는 불충분한 실정으로 효과적인 개선방안을 강구하는데 이러한

과정은 필수적이다.^{4,5)}

이러한 관점에서 분진 사업장에서 발생하는 유해 분진 제어에 관한 적절한 처리방법의 강구는 매우 중요한 문제로, 본 연구에서는 기존의 문헌조사와 수행된 실험결과들을 참조하여 국내의 분진발생 산업장에서 발생하는 분진의 입경분포와 호흡성분진 비율을 파악하여 각 공정에 적합한 분진제어 방법을 제시함으로써 쾌적한 작업환경을 조성하고, 나아가 근로자의 직업병의 예방 및 생산성 향상에 도움이 될 수 있도록 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험재료

1) 다단형 입경분립포집기(Ambient cascade impactor): Andersen samplers Inc.의 model 2110 K로 각 단에 분진이 과도하게 포집되어 발생할 수 있는 분진의 과부하(overload)현상을 막기 위한 cyclone preseparator가 유입부에 있으며 10단(stage)으로 구성되어 있으며 사용 유량은 3l/min이었다. 펌프는 5 \pm 5%의 유량을 일정하게 유지하는 기능이 있으며

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

Stage No.	Particle 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

주) 공기역학적직경이란 단위밀도 1 g/cm^3 을 갖는 구형 입자의 직경을 말한다.

12 V 직류 전원을 사용하였다. 사용전후에 유량을 보정하였고 조사기간 동안 유량의 변동은 없었다. 각 단의 등가 공기역학적직경 절단입경(cut-size)은 Table 1과 같다.

2) 유량보정계(Pump calibrator): 비누거품을 사용하는 soap bubble calibrator로 개인용 입경분리 포집기의 보정은 MSA사의 model A로 100~4,000 ml/min 범위에서 0.1 ml/min까지 유량보정이 가능한 기종이다.

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

4) 유리섬유포집재(Glass fiber collection substrate): 공기중 부유분진의 입경별 포집용으로 직경 45 mm 유리섬유여지로 된 slot가 4개인 collection substrate로 Andersen samplers Inc.에서 구입하였다.

2. 측정방법

1995년 1월부터 2월까지 경남 창원에 위치한 분진발생 사업장을 조사대상으로 하였으며, 공장 배치도와 작업공정 도면을 검토하여 분진발생 실태를 파악한 후 근로자의 행동영역과 작업을 고려하여 측정지점을 선정하였다.

조사대상 공정에서 작업시간 동안 입경분리 포집기(Andersen sampler)로 시료를 포집하였으며, 일부 공정에서는 분진의 농도가 높은 경우, 각 단계 분진이 과도하게 퇴적되어 과부하가 발생할 우려가 높은 때는 포집시간을 조정하였다.

시료채취 전후의 각 단의 여지를 실험실에서 칭량한 후 각 단별로 무게비율과 누적비율을 계산하여

대수확률지에 도식한 후 각 누적비율을 계산하였다. 또한 분진중 진폐의 잠재력이 높은 호흡성 분진의 비율은 ACGIH(미국산업위생전문가회의)에서 정의한 그래프 방법(Graph method)을 사용하였다.

3. 자료분석방법

시료채취 전후의 각단의 여지 무게를 실험실에서 칭량한 후 각 단별로 분진의 무게비율과 누가비율을 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)를 구한다. 이때 기하평균은 각 단의 입경분포가 대수분포를 한다는 가정하에 대수확률지의 누적비율을 표시한 50%에 해당되는 입경을 말하며 기하표준편차는 다음 식을 사용하여 구하였다.

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

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

호흡성분진의 비율은 ACGIH에서 정의한 그래프 방법(graphic method)이 현재 사용되고 있으며 구하는 방법은 다음과 같다.⁶⁾

1) 입경분포 조사 결과를 확률대수지에 입경과 누적비율을 도식화한다.

2) 각 단의 하한입경(lower size), 중간입경(mid-point size), 상한입경(upper size)값에 해당되는 입경의 누적비율을 구한다.

3) ACGIH의 정의에 의한 호흡성분진을 대수확률지에 누적비율이 15.9%일 때 $5.25\ \mu\text{m}$, 누적비율이 50%일 때 $3.5\ \mu\text{m}$, 누적비율이 84.1%일 때 $2.33\ \mu\text{m}$ 의 값을 Fig. 1과 같이 도식화한다.

4) 각 단의 상한입경, 하한입경, 중간입경 값에 해당되는 누적비율을 ACGIH에서 규정한 호흡성분진의 입경분포곡선에서 구한다.

5) 4)에서 구한 값을 식 2의 심프슨 공식(Simpson's rule)을 사용하여 평균 호흡성 분진비율을 산출한다.

6) 각 단의 분진비율(mass fraction, %)과 5)에서 구한 평균 호흡성 분진비율을 곱하여 호흡성분진비율을 구한다.

7) 각 단의 호흡성분진 비율의 합을 구하고 이 값이 조사한 입경분포에서 차지하는 호흡성분진의 비율이다.

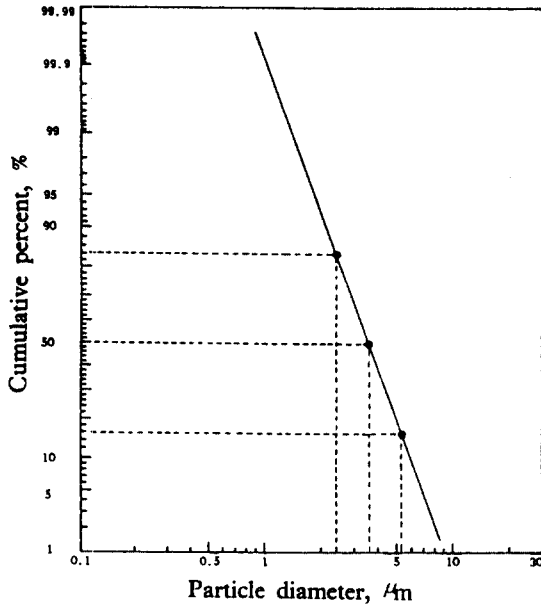


Fig. 1. Size distribution of respirable dust defined by ACGIH.

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

여기서 RF = 평균 호흡성분진 비율

RF_{LL} = 하한입경에서의 호흡성분진 비율

RF_{MP} = 중간입경에서의 호흡성분진 비율

RF_{UL} = 상한입경에서의 호흡성분진 비율

III. 결 과

1. 조사대상 사업장에서의 부유분진의 입경분포

본 측정대상 사업장의 주된 작업공정은 용접과 연마공정이 대부분을 차지하고 있었으며, 작업장내 발생하는 부유분진의 입경분포를 측정한 결과는 Table 2, 3과 Fig. 2와 같이 조사되었다.

Table 2, 3에서 입경의 기하평균은 입경분포를 대표하는 입경으로서 mass median diameter를 의미하고, 기하표준편차는 입경의 정도를 나타내는 것으로 기하표준편차가 1.00일 때 단분산(monodispersion)한다고 말한다. 즉, 그때의 입경이 모두 같은 것을 의미하고 기하표준편차가 크면 입경의 분포가 큰 것을 의미한다.

Table 2와 3에 나타난 바와 같이 mass median diameter가 용접공정인 경우 0.28~0.60 μm , 연마공정의 경우 1.20~1.92 μm 로 나타났다. 따라서 위의 조사결과로부터 용접공정에서 발생하는 분진의 입경보다 연마작업에서 발생하는 분진의 입경이 훨씬 크다는 결과를 보여주고 있다. 이는 용접공정의 경우 발생하는 분진의 형태가 흙(fume)상태로 발생되기 때문에 대체로 분진의 입경이 작은 반면에 연마공정의 경우 주로 표면가공 형태의 작업이 대부분 이루어지기 때문에 발생하는 분진의 입경이 큰 것으로 나타났다.

위의 결과에서 기하평균 범위의 차가 심하였는데 이는 작업의 양, 작업형태, 작업위치, 주변 작업장의 환경에 의해 좌우된 것으로 판단되었다.

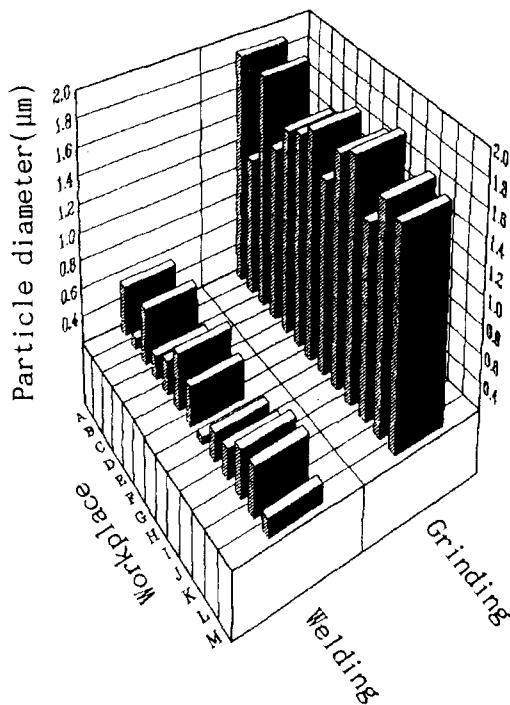
Table 2. Size distribution of dust at welding sites

Workplace	No. of samples	Mass median diameter, μm	Geometric standard deviation	Range
A	3	0.56	7.29	6.45~ 7.65
B	4	0.28	16.07	15.65~17.44
C	4	0.60	6.17	5.56~ 7.34
D	5	0.37	7.27	5.24~ 7.97
E	3	0.44	7.50	6.75~ 7.95
F	5	0.60	8.33	6.88~ 8.76
G	4	0.48	7.29	6.45~ 8.01
H	4	0.25	19.20	17.98~20.34
I	4	0.40	7.50	5.78~ 9.67
J	4	0.41	7.52	6.67~ 8.54
K	3	0.53	6.79	4.67~ 8.71
L	3	0.54	7.04	5.78~ 9.62
M	3	0.33	7.27	7.09~ 7.65

Table 3. Size distribution of dust at grinding sites

Workplace	No. of samples	Mass median diameter, μm	Geometric standard deviation	Range
A	3	1.90	19.00	16.45~22.43
B	3	1.20	6.00	5.75~ 7.49
C	3	1.90	6.79	5.95~ 7.55
D	2	1.45	12.43	10.45~14.41
E	3	1.66	16.54	14.86~17.99
F	3	1.72	9.45	8.86~10.54
G	3	1.83	8.64	7.11~10.03
H	2	1.57	9.75	9.23~10.27
I	3	1.84	7.45	6.73~ 9.37
J	3	1.92	10.43	9.03~10.97
K	2	1.56	8.57	7.89~ 9.25
L	2	1.80	6.54	5.85~ 7.23
M	2	1.74	10.64	9.67~11.61

주) 기하평균은 mass median diameter임.

**Fig. 2.** Average particle diameter by process.

2. 부유분진 중 호흡성분진 비율

본 측정대상 사업장에서 발생하는 부유분진 중 호흡성분진이 차지하는 비율을 계산한 결과 Table 4와 같다.

Table 4에 나타난 바와 같이 부유분진 중에서

Table 4. Respirable mass fraction of dust (%)

Workplace	Welding	Grinding
A	63.68	44.23
B	73.40	49.96
C	65.15	43.70
D	70.06	45.65
E	69.06	48.44
F	63.72	50.27
G	66.74	46.25
H	70.46	47.45
I	70.13	51.47
J	65.77	43.24
K	65.28	46.74
L	70.13	46.23
M	73.50	45.59

호흡성분진의 비율을 보면 용접공정의 경우 최저 63.68%이고, 최고 73.50%로 나타났다. 또한 연마공정의 경우 43.25~51.47%로 나타났으며, 이는 앞의 입경분포 결과와 일치하고 있다. 즉, 발생하는 분진의 입경이 작을수록 인체의 폐내 침착될 수 있는 분진이 많다는 것을 의미하고 반대로 입경이 크면 적다는 것을 의미한다.

현재 국내의 제조업체 중 진폐증이 차지하는 비율은 1987년 5.03%에서 1992년 8.10%로 계속 증가하는 추세를 나타내고 있어 이에 대한 예방과 대책이 중요시되고 있다. 따라서 근로자에게 폭로되는 분진 중에서 진폐를 유발하는 것으로 알려진 호흡성분진이 어느 정도인가를 파악하는 것은 진폐

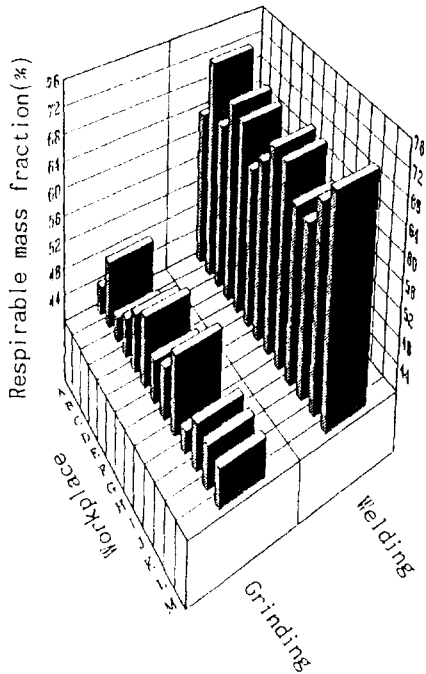


Fig. 3. Respirable mass fraction of dust by process.

를 유발하는 분진의 잠재적 유해도(potential hazard)를 추정이 가능하게 한다. 다시 말하면, 호흡성분진이 차지하는 비율이 높다는 것은 같은 분진농도라도 호흡성분진의 비율이 분진보다 진폐의 발생 확률이 높다는 것을 의미하고 분진 작업장에서 근무하는 근로자의 근무시간이 동일하더라도 즉, 폭로시간이 동일하더라도 진폐증에 이환될 가능성이 크다는 것을 의미한다.

일반적으로 발생하는 분진의 제어는 분진의 화학적 특성과 물리적 특성에 의해 영향을 받으며, 그 중에서 특히 분진의 입경에 의해 좌우된다.⁷⁾ 현재 국내에서 사용되는 분진제어시스템은 주로 여과집진장치, 사이클론, 전기집진장치 등이 사용되고 있으나, 분진의 특성, 특히 분진의 입경을 고려하지 않고 적당하게 설치되어 있어 이에 대한 대책이 시급한 형편이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 공학적인 개선방안을 강구하기 위하여 용접공정과 연마공정에서 발생하는 분진의 입경분포와 호흡성분진의 비율을 파악함으로써 효과적인 집진장치시설의 선정과 설계에 이용할 수 있도록 하였다.

Table 5. The application of dust removal system⁸⁾

		GASEOUS POLLUTANTS				AEROSOLS							
						PARTICLE DIAMETER SIZE, MICRONS							
						0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000	
CHARACTERISTICS OF POLLUTANTS	HIGH DEW POINT & HIGH CONCENTRATIONS	SOLUBLE IN WATER OR SUITABLE SOLVENT	ADSORBENT SOLID SURFACE	COMBUSTIBLE VAPORS					←——→				
										←——→			
ORGANIC POLLUTANTS	GAS CONDENSER	GAS SCRUBBER	GAS ADSORBER	INCINERATION/CATALYTIC COMBUSTION	MISTS & SPRAYS	ELECTROSTATIC PRECIPITATOR			MECHANICAL SEPARATOR				
						WET COLLECTOR			COARSE BED				
						PACKED BED							
INORGANIC POLLUTANTS					DUST & FUMES	ELECTROSTATIC PRECIPITATORS							
						WET COLLECTORS							
						HIGH ENERGY			LOW ENERGY				
						BAG FILTER							
						CYCLONES & MECHANICAL SEPARATORS			IMPINGEMENT SEPARATORS				
									SETTLING CHAMBER				

Table 5는 분진입경에 따른 집진장치의 선정을 나타내는 도표로 본 조사 결과에서 적용가능한 집진제어 시스템은 용접공정의 경우, Table 2에 나타난 바와 같이 입경의 범위가 0.28~0.60 μm 이므로 전기집진기가 가장 효과적인 것으로 나타났다. 일반적으로 전기집진기의 경우 분진의 입경이 작은 흠(fume)을 포집할 때 주로 많이 사용하며, 분진의 제거효율이 높고, 온도와 습도에 영향을 받지 않는 반면에 시설비가 고가이다.

연마공정의 경우, Table 3에 나타난 바와 같이 입경의 범위가 1.20~1.92 μm 이므로 여과집진장치(bag filter)가 가장 적합한 것으로 나타났다. 여과집진장치의 경우 분진 제거율이 높은 반면에 온도와 습도에 의해 집진시 영향을 받으므로 설치시 이러한 점을 고려하여야 한다.

이와 같이 분진제어 시스템의 선택절차는 환경오염물질과 환경규제치에 따라 적절한 제어 시스템을 선택한 후 제어 시스템에서 처리되는 배출가스와 분진의 물리, 화학적 특성에 따라 공정을 모사한 다음 최종적으로 경제성을 파악하여 최적의 공정을 선택하여야 한다.

IV. 결 론

유해 분진 사업장의 분진제어와 관련된 조사를 위하여 입경분립포집기를 사용하여 경남 창원에 위치한 분진발생 사업장을 대상으로 조사한 결과 다음과 같다.

1. 부유분진의 입경분포는 용접의 경우 0.28~0.60 μm , 연마의 경우 1.20~1.92 μm 로 그 범위로 용접 공정에서 발생하는 분진의 입경보다 연마공정에서 발생하는 분진의 입경이 크게 나타났다.

2. 호흡성분진의 비율은 용접공정의 경우 63.68~73.50%로 연마공정의 43.25~51.47%보다 크게 나타났으며, 이는 용접분진이 연마분진보다 인체내 폐에 잘 침착된다는 것을 의미한다.

3. 작업공정별 분진제어방법은 용접공정의 경우 전기집진기가 적합하고 반면에 연마공정의 경우 여과집진기가 적합한 것으로 나타났다.

4. 본 연구에선는 용접과 연마공정을 대상으로 조사하였지만 향후 타 공정의 분진 특성과 입경분포에 관한 연구가 필요하리라 생각된다.

감사의 글

분진발생 사업장을 대상으로 발생하는 분진의 입경분포와 호흡성 분진의 비율을 파악함으로써 작업장내 분진제어방법 선정에 도움이 되는 자료를 제공하고자 하였습니다. 조사자료가 용접과 연마공정으로 제한되었지만 향후 분진발생 공정과 관련된 분진제어분야에 작은 도움이 되기를 바랍니다.

끝으로 연구수행에 협조하여 주신 신도건공(주) 남연우 사장님에게 감사를 드리고 본 과제가 수행할 수 있도록 도와주신 한국과학재단의 산학협력과 담당자에게 감사드립니다.

참고문헌

- Holt, Paul F. : Inhaled Dust and Disease, John Wiley & Sons, New York, 12-15, 1987.
- William C. Hinds : Aerosol Technology, Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, John Wiley & Sons, 7-10, 1982.
- 대한산업보건협회 : 특수건강진단종합연보, 1994.
- 김영식, 윤영노 : 일부 석탄광산 기중 부유분진의 입경분포와 호흡성분진 비율, 한국산업위생학회지, 제1권(제1호), 62-67, 1991.
- 김영식 : 일부 분진 작업장에서의 폭로분진의 입경분포와 호흡성분진 비율, 한국환경과학회지, 제1권(제2호), 25-31, 1992.
- Lodge, J.P. and T.L. Chan : Cascade Impactor, Sampling and Data Analysis, *Am. Ind. Hyg. Assoc.*, 39-40, 1986.
- Vinit Mody and Ray Jakhete : Dust Control Handbook, Noys Data Corporation, 63-67, 1988.
- R.D. Ross : Air Pollution and Industry, Van Nostrand Reinhold Company, 303-305, 1972.