

일부 분진 작업장에서의 폭로분진의 입경분포와 호흡성 분진 비율

김영식

밀양산업대학교 환경공학과
(1992년 6월 25일 접수)

Size Distributions and Respirable Mass Fraction of Exposed Dust in Work Environment

Young Sik Kim

Miryang National University Dept. of Environmental Engineering
(Manuscript received 25 June 1992)

Abstract

Authors Investigated the particulate size distribution in work environment of Banwol and Changwon industry complex. Size distributions of particles exposed to workers in welding and in grinding process were evaluated by personal cascade impactors. Personal air samplers with personal cascade impactor were attached to the workers.

The mass median diameter measured in welding sites were 0.3 to 3.8 μ m and in grinding sites were 1.5 to 2.6 μ m. Respirable matter fractions were ranged 32.67 to 65.05%.

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

The study relating to characteristics of particle of other industries and particulate size distribution is more needed in the near future

KEY WORDS : particulate size distribution, personal cascade impactors, respirable matter fractions

1. 서 론

산업장에서 분진이 발생되는 경우는 물질의 분쇄, 절단, 가공 및 포장, 용접시 주로 공기 중에 비산하며 (Holt, 1987) 분진의 특성은 공정 과정에서 사용되는 시설 즉 연마기, 분쇄기 등의 종류와 규모, 조업 방법 그리고 화학적인 반응과 방법에 따라 달라진다.

공기 중에 부유하는 분진은 입경 면에서 100 μ 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. (김영식 외, 1991 : 윤영노와 김영식, 1991) 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.(ACGIH, 1992) 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 논란 필요가 없을 것이다.

일부 분진 사업장에서 발생하는 부유분진 중의 입경분포에 관한 조사는 주로 석탄광산을 중심으로 연구(이정주와 윤영노 1988 : 김영식과 윤영노 1991)가 진행되어 제조업에 대한 연구는 불충분한 실정이다. 그러므로 분진 사업장에서 발생하는 분진 중에서 폭로분진의 입경분포 파악과 폭로분진 중에서 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 조사가 가능한 13개 사업장을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

1) 개인용 입경 분립 포집기(Personal cascade impactor) : Andersen Samplers Inc.의 Model 298K로 8 단(stage)으로 구성되어 있으며 inlet visor가 분진이 직접 impactor stage로 유입하는 것을 방지해주는 역할을 하는 기종이며 흡인유량은 2ℓ/min이었다. 펌프는 ±5%의 유량을 일정하게 유지하는 기능이 있는 개인용 공기 포집기(MSA, Flow-lite)를 사용하였으며, 사용 전후에 유량을 보정 하였고 조사 기간 동안 유량의 변동이 없었다.

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

2) 유량보정계(Pump calibrator) : 비누거품을 사용하는 soap bubble calibrator로 개인용 입경 분립 포집기의 보정은 MAS사의 Model A로 100-4,000

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

Stage No.	Size Range(μm)	Cut-size (μm)
1	>20	21.3
2	10 - 15	14.8
3	6 - 10	9.8
4	3.5 - 6	6.0
5	2 - 3.5	3.5
6	1 - 2	1.55
7	0.6 - 1	0.93
8	0 - 0.6	0.52

mL/min의 범위에서 0.1mL/min까지 유량보정이 가능한 기종이다.

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

4) Mylor collection substrate : 폭로 분진의 입경별 포집용으로 직경이 34mm이고 재질이 Mylor이며 6개의 slot가 있는 Andersen Samplers Inc.사의 제품을 사용하였다.

5) Silicone grease : Mylor collection substrate에 분진이 포집될 때 입자가 튀는 것(particle bounce)을 방지하기 위하여 도포하는 것으로 substrate coating으로 불리는데 Dow Corning사의 316 silicone grease를 사용하였다.

2.2. 실험 방법

경기도 반월지역의 일부 분진 발생 사업장과 경남 창원에 위치한 중전기를 제조하는 중공업체를 대상으로 조사가 가능한 13개 사업장을 조사 대상으로 하였으며, 공장 배치도와 작업공정 도면을 검토하여 분진 발생 실태를 파악한 후 근로자의 행동영역과 작업을 고려하여 측정지점을 선정하였고, 조사시기는 1990년 9월부터 동년 11월까지이다.

근로자에게 폭로되는 분진의 입경분포를 파악하기 위하여 개인용 공기 포집기와 개인용 입경 분립 포집기를 근로자에게 착용시켜 포집하였으며, 포집한 시료는 실험실로 운반하여 분진의 무게를 측정하였다.

조사대상 근로자에게 개인용 공기 포집기와 개

인용 입경 분립 포집기를 착용시킨 후 작업시간인 8시간의 근무시간동안 시료를 포집하게 하여 작업이 끝난후 분립 포집기를 회수하였다. 다만 일부 부서에서는 분진 농도가 높은 경우 개인용 입경 분립 포집기의 각 단에 분진이 과대 하게 퇴적되어 과부하(overflow)가 발생할 우려가 높을 때는 포집 시간을 조정하였다.

개인용 입경 분리 포집기는 근로자의 작업에 지장을 주지 않으며 머리에서 반경 30cm 이내의 범위에서 수직을 유지하도록 왼쪽 옷깃과 주머니 뒷개에 클립으로 고정하였다(Morse, 1970 ; Pittsburgh Field Health Group, 1971 ; Clayton *et al.*, 1970 ; OSHA, 1984 ; WHO, 1984).

폭로분진을 개인용 입경 분리 포집기로 포집할 때 포집된 분진이 Mylor에서 rebound 현상이 일어나지 않도록 하기 위해서 impaction greasing template에 Mylor collection substrate를 넣고 silicone grease를 도포하였다.

2.3. 자료 분석 방법

시료 채취 전후의 각 단의 여지 무게를 실험실에서 칭량한 후 각 단별로 분진의 무게 비율과 누적비율을 계산하여 대수확률지(log probability graphs)의 가로축은 입경, 세로축은 누적비율로 표시한 후 각 단의 입경에 해당되는 분진의 누적 비율로 표시한 다음 도식화하여 기하평균(mass median diameter)과 기하표준편차(geometric standard deviation)을 구한다. 이때 기하평균은 각 단의 입경분포가 대수분포를 한다는 가정(ACGIH, 1989)하에 대수 확률지의 누적 비율을 표시한 50%에 해당되는 입경을 말하며 기하표준편차는 다음 식 1을 사용하여 구한다.

$$\text{기하표준편차} = \frac{\text{누적비율 84\%에 해당되는 입경}}{\text{기하평균}} \quad (\text{식1})$$

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

호흡성 분진의 비율은 ACGIH에서 정의한 그래프 방법(graphic method)이 현재 사용되고 있으며, 구

하는 방법(Lodge, 1986)은 다음과 같다.

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% 일때 5.25 μ m, 누적비율이 50% 일 때 3.5 μ m, 누적비율이 84.1% 일때 2.33 μ m의 값을 Fig. 1과 같이 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.

$$RF = \frac{(RF_{LL} + 4(RF_{MP}) + RF_{UL})}{6} \quad (\text{식2})$$

여기서 RF : 평균 호흡성 분진 비율

RF_{LL} : 하한 입경에서의 호흡성 분진 비율

RF_{MP} : 중간 입경에서의 호흡성 분진 비율

RF_{UL} : 상한 입경에서의 호흡성 분진 비율

3. 결 과

3.1. 폭로분진의 입경분포

진폐증은 산업장에서 발생하는 각종분진을 흡입함으로써 폐에 불가역적인 병리학적 변화, 즉 분진과 관련하여 섬유조직의 증식 또는 분진에 의한 망상형성(reticulation)의 병적 변화가 생기는 것을 주요 소견으로 한다. 이러한 진폐증의 발생에는

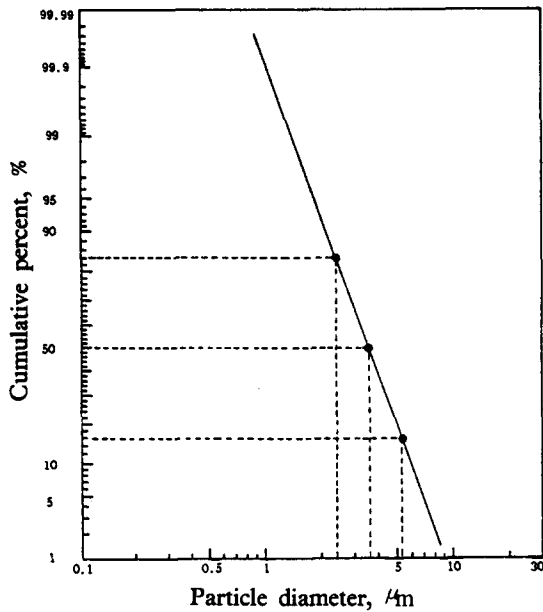


Fig 1. Size distribution of respirable particulate matter defined by ACGIH

다음과 같은 여러 인자가 있다.

- 1) 분진의 농도
- 2) 분진의 입경분포
- 3) 분진의 물리 화학적 성질

4) 분진농도의 시간 공간적인 변화이 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 공기중에 부유하는 분진은 입경 면에서 $100\mu\text{m}$ 이하로 알려져 있으며, 입경에 따라 침착되는 부위가 다른 것으로 알려져 있다.(WHO, 1986; 조규상, 1985)폐에 침착되어 진폐를 유발시키는 분진을 호흡성 분진이라 하며 미국의 ACGIH (1992)에서는 기하평균이 $3.5 \pm 0.3\mu\text{m}$ 기하표준편차가 $1.5(\pm 0.1)$ 라고 정의 하였다. 따라서 근로자에게 폭로되는 분진의 농도도 중요하지만 근로자의 보호 측면에서 입경분포는 중요하다. 미국의 ACGIH (1992)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 $50(1 + \exp[-0.06 da]) \pm 10$ 인 분진을 말하며, 공기역학경(da)은 $0 < da \leq 100\mu\text{m}$ 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 $10 \pm 1.0\mu\text{m}$ 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 침착하는 물질에 적용하며 공기역학경의 중앙값이 $3.5 \pm 0.3\mu\text{m}$ 이며 기하표준편차가 $1.5(\pm 0.1)$ 인 입경분리 포집효율을 갖는 입자로 구성된 분진으로 정의하였다.

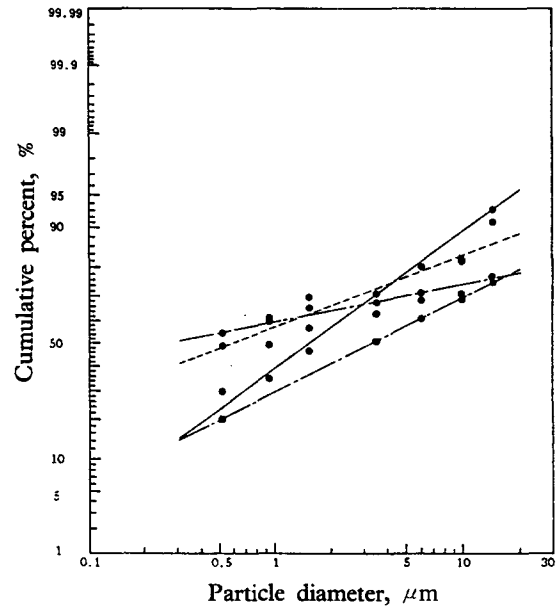


Fig 2. Size distribution of exposed dust in work environment

그러므로 작업장내 공기 중 부유하는 분진 중에서 폐에 침착되는 분진의 크기에 해당되는 입경이 차지하는 비율이 어느 정도 인가를 파악하는 것이

진폐 예방의 측면에서 공학적 개선 방안을 강구하는데 중요한 자료일 뿐만 아니라 근로자의 건강 보호 측면에서도 중요하다. 따라서 일부 분진 작업장에서 근무하는 근로자의 폭로분진을 대상으로 입경분포를 조사한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Size distribution of particles

Process	Mass median diameter, μm	Geometric standard deviation
Welding	1.5	4.67
Welding	3.3	9.42
Welding	0.3	13.33
Welding	0.6	17.33
Welding	3.6	8.18
Welding	2.6	11.82
Welding	3.8	4.87
Welding	3.3	11.38
Welding	3.2	4.71
Welding	1.2	5.83
Welding	0.7	10.29
Grinding	2.6	4.45
Grinding	2.1	4.02
Grinding	2.3	4.00
Grinding	1.5	6.67
Grinding	2.6	4.36

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 용접인 경우 0.3-3.8 μm , 연마는 1.5-2.6 μm 로 유사하게 나타났는데 이는 작업장내 공정이 서로 밀폐되지 않아 작업간 상호 영향을 미친 것으로 나타났으며, ACIGIH(1992)의 size-selective sampling criteria의 분류에 의하면 흡입성 분진에 해당되는 입경을 나타내고 있었다.

발생되는 분진의 대부분은 용접열에 의하여 증발된 금속성 물질이 냉각된 흡과 연마에 의해 비산되는 분진으로 구성되어 있어 작업자세, 작업위치, 작업의 양, 작업방법, 환기시설의 유무, 주변 작업장 환경에 따라 분진의 발생에 크게 좌우되기 때문에 기하평균 범위의 차가 심하였다.

3.2. 폭로분진의 호흡성 분진 비율

1989년도 대한산업보건협회에서 실시한 특수 건강진단을 통해 직업병자로 진단된 근로자는 총 7,568명 이었으며, 유해물질 종류별로 보면 분진 3,937명, 소음 3,410명, 특정화학물질 160명, 납 27명, 그리고 유기용제 직업병자가 21명으로 보고 되었다. 따라서 유해인자에 따른 직업병 분포 현황 중에서 분진에 의한 유소견자가 전체 유소견자의 52.02%를 차지하고 있었다 (대한산업보건협회, 1990).

제조업 중 진폐가 차지하는 비율은 1987년 5.03%에서 1989년 7.10%로 계속 증가하는 추세를 나타내고 있어 이에 대한 예방과 대책이 중요시 되고 있다. 따라서 근로자에게 폭로되는 분진 중에서 진폐를 유발하는 것으로 알려진 호흡성 분진이 어느 정도인가를 파악하는 것은 진폐를 유발하는 분진의 잠재적 유해도(potential hazard)를 추정할 수 있게 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 계산하였다. 폭로분진중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율은 Table 3과 같다. Table 3에 나타난 바와 같이 폭로분진 중에서 호흡성 분진의 비율을 보면 용접의 경우 최저 32.67%이고 최고 65.05%로 나타났고, 연마는 41.14-52.37%로 유사하게 나타났는데 이는 위의 기하평균치의 경향과 일치하며 작업간 상호 영향을 주는 것으로 판명이 되었고, 진폐의 발생 확률이 높은 것으로 나타났다.

따라서 각 공정별 특성에 맞는 표준 국소배기장치의 설치와 효율적인 유지 관리가 필요한 것으로 나타났다으며, 근본적인 작업환경에 대한 대책이 검토되어야 할 것으로 사료된다.

Table 3. Respirable mass fraction of particles

Process	Respirable mass fraction (%)
Welding	51.91
Welding	38.04
Welding	62.32
Welding	63.25
Welding	35.86
Welding	42.82
Welding	32.67
Welding	39.33
Welding	34.64
Welding	57.34
Welding	65.05
Grinding	53.46
Grinding	46.27
Grinding	41.14
Grinding	52.37
Grinding	51.87

4. 고 찰

경기도 반월지역의 일부 분진 사업장과 경남 창원에 위치한 중전기를 생산하는 중공업체를 대상으로 근로자에게 폭로되는 부유분진의 입경분포를 파악하기 위하여 개인용 공기 포집기와 개인용 입경분립 포집기를 근로자에게 착용시켜 입경분포를 측정된 결과는 다음과 같았다.

포집한 시료 중에서 포집된 분진의 양이 저울의 눈금 한도의 10배가 되지 않는 0.1mg 이하의 것은 제외하였고(通商産業省 立地公害局, 1986), 입경분립 포집기의 collection substrate 중 분진이 과도하게 포집된 것(overload)이나 각 단에서 0.1mg 이하의 것이 포함된 시료는 제외하였다(Lodge 등, 1986).

본 조사에 사용한 개인용 입경분립 포집기의

수가 적어서 많은 시료의 포집에 어려움이 있었고 사업장의 사정으로 인하여 반복 측정이 불가능하였다.

개인용 입경분립 포집기에 사용하는 Mylor collection substrate는 정전기로 인하여 운반 도중의 분실이 많았다. Mylor의 정전기를 제거하기 위하여 정전기 방지제를 도포하였으나 효과가 없었다.

또한 다단형 입경분립 포집기의 적절한 시료 채취를 하는데 있어서 시료 채취 시간의 부족으로 인하여 시료의 포집량이 부족한 것이 많았는데 특히 기계 가공 및 사상의 경우가 심하였으며, 이는 작업공정중에 계속 작업에 임하는 것이 아니라 필요시 수시로 작업하는 경우가 많았기 때문이다.

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

여과지와 collection substrate는 수분조절기(desiccator)에서 24시간 건조시킨 후 칭량하였으며 5회 반복하여 산정하였다. 여지 무게(mg)에 대한 정밀도(시료수×측정수)(APHA, 1985)는 Mylor collection substrate가 0.06% (0.00-0.11%)(180×5)이었다.

5. 결 론

분진 작업장의 입경분포와 관련된 조사와 연구를 위하여 개인용 입경분립 포집기(personal cascaded impactor)를 사용하여 경기도 반월지역의 일부 분진 발생 사업장과 경남 창원에 위치한 중전기를 제조하는 중공업체를 대상으로 조사가 가능한 13개 사업장을 대상으로 조사한 결과 다음과 같다.

1. 폭로분진의 입경분포는 용접의 경우 0.3 - 3.8 μm , 연마는 1.5-2.6 μm 로 그 범위가 용접에 비하여 차가 적게 나타났으며, 흡입성 분진에 해당되는 입경을 나타내고 있다.

2. 폭로분진 중에서 호흡성 분진의 비율을 보면 용접의 경우 최저 32.67%이고 최고 65.05%로 나타났다으며, 연마는 최저 41.14%에서 최고 52.37%로 진폐의 발생 확률이 높은 것으로 나타났다.

3. 본 연구에서는 용접과 연마의 공정을 대상으로 입경분포는 조사하였지만 향후 타공정의 분진 특

성과 입경분포에 관한 연구가 필요하리라 생각된다.

감사의 글

본 논문은 직업병 연구소의 1990년도 연구 사업으로 수행되었습니다.

진폐의 발생이 높은 일부 분진 사업장을 대상으로 근로자에게 폭로되는 분진의 대표입경과 호흡성 분진 비율을 파악함으로써 진폐의 예방 방법 선정에 도움이 되는 자료를 제공하고자 하였습니다.

조사자료가 부족한 점이 많지만 향후 관련 분야에 작은 도움이 되었으면 하는 바람으로 부족한 점이나 지도해 주실점이 있으면 많은 조언을 바랍니다.

끝으로 연구 수행에 협조해주신 정호근 소장님과 운영노 선생님 그리고 홍현기 과장님에게 감사를 드리고 장비와 인력을 지원해 주신 근로복지공사 창원병원 작업환경연구실 김세동 실장을 비롯한 관계자에게 감사를 드립니다.

참고문헌

김영식, 운영노, 1989, 태백지역 석탄광산에서의 호흡성 분진의 입경분포, 직업병연구소, 11-89-11, 1-48.

김영식, 이병인, 홍성철, 1991, 일부 분진 작업장에서의 공기중 분진의 입경분포, 한국환경위생학회지, 17(2), 22-26.

대한산업보건협회, 1990, 특수건강진단종합연보, 대한산업보건협회, 22-603.

운영노, 김영식, 1991, 일부 석탄광산 기중 부유분진의 입경분포와 호흡성 분진 비율, 한국산업위생학회지, 1(1), 62-67.

이정주, 운영노, 1988, 태백지역 석탄광업의 갱내

부유분진의 입경분포에 관한 조사, 진폐연구소 논문집, 11-88-3, 89-106.

조규상, 1985, 진폐증, 카톨릭산업의학센터, 23-27.

通商産業省立地公害局, 1986, 鑛山における粉塵濃度のマニュアル, 鑛業労働災害防止協會, 14-19.

ACGIH, 1992, Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices 1991-1992, ACGIH, 42-45.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1989, Air sampling instruments, ACGIH, Inc., 62-66.

APHA-AWWA-WPCF, 1985, Standard methods, APHA, 20-21.

Clayton, G.D. and F.E. Clayton, 1978, Patty's industrial hygiene and toxicology, Wiley, 238 PP.

Holt, Paul F., 1987, Inhaled dust and disease, John Wiley & Sons. 12-15.

Lodge, J.P. and T.L. Chan, 1986, Cascade impactor, Sampling and data analysis, Am. Ind. Hyg. Assoc., 39pp.

Morse K.M., 1970, Problems in the gravimetric measurement of respirable coal mine dust, J. Occup. Med., 12, 400-409.

Pittsburgh Field Health Group, 1971, Sampling and evaluation respirable coal mine dust, Bureau of Mines, 1-30.

WHO, 1984, Evaluation of exposure to airborne particles on the work environment, WHO Offset publication No.80, 22-39.

WHO, 1986, Recommended health-based limits in occupational exposure to selected mineral dusts(silica, coal), WHO technical report series No. 734, 14-19.