

Digital 분진계와 개인용 분진 포집기의 측정값의 관계

근로복지공사 진폐연구소

윤영노 · 이정주 · 정호근 · 최호춘

= Abstract =

Relationship between the Measurement Values of the Digital Dust Indicator and Personal Dust Sampler

Young-No Yoon, M.S.E., Jeong-Joo Lee, M.S.E., Ho Keun Chung, M.D., M.P.H.
and Ho Chun Choi, Ph.D.

The Institute for Pneumoconiosis, Korea Labour Welfare Corporation

The digital dust indicator (Sibata P-5), one of the direct-reading instruments was evaluated for the respirable dust in the underground coal mine environments. As a reference, respirable dust was determined using three cyclones and/or impactors. All the tests were performed on aerosol in twenty underground coal mines. The coefficients of mass-relative concentration were 0.067 ± 0.054 (Mean \pm Standard deviation) (range: 0.006-0.172). The relationship between relative concentration and temperature was not significant statistically. Also, the relationship of relative concentration and relative humidity was not significant. Mass concentration and relative concentration were 5.31 ± 5.22 mg/m³ and 162 ± 163 CPM (Mean \pm Standard deviation) respectively. The range of mass concentration was 1.22-22.69 mg/m³; relative concentration 16-628 CPM. The relationship of mass concentration and relative concentration was not significant in these ranges.

I. 서 론

석탄 광산(이하 탄광)의 작업 환경개선 중에서도 분진 농도의 저감은 진폐증의 유병율의 감소를 가져온다고 보고되어 있다(McDonald, 1981). 그러므로 탄광의 작업 환경개선을 위해서는 우선적으로 분진농도 측정이 이루어져야 한다. 특히 탄광의 호흡성 분진에 관한 중량농도의 정확한 측정은 진폐증 예방의 첫번째 단계이며 이를 위해서는 호흡기계에 침착되는 분진의 침착곡선과 부합되는 측정기를 사용하여야 한다(Pittsburgh Field Health Group, 1971). 분진 농도의 측정은 측정 목적과 원리에 따라 중량농도, 상대농도 등이 있다. 중량 농도법은 여과지를 이용하여 공기중의 입자를 포집한 후 칭량하여 농도를 구하는 방법으로 대표적인 방법

으로는 여과포집법이 있다. 여과포집법은 포집효율이 높고 취급이 간편하며 미세입자의 포집이 용이한 반면 시간에 대한 분진의 농도변화(경시변화)를 파악할 수 없고 측정시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 상대농도법은 부유상태의 분진을 광산란, 광흡수, 결정의 압전현상 등을 이용하여 질량농도에 대한 상대값을 측정하는 것(中央勞災防止協會, 1985; 김광중 등, 1984; 勞働省 安全衛生部 勞働衛生課, 1984)으로 측정이 간단하고 측정기의 취급이 용이하며 저농도의 분진 측정시 감도가 높다. 또한 농도의 경시 변화를 파악할 수 있는 장점이 있으나 분진농도 측정시마다 중량농도 환산계수를 구해야 하고 분진 종류에 따라 상대감도가 변화하는 등의 단점이 있다(Clayton 등, 1978; Sem 등, 1978).

탄광의 호흡성 분진을 평가하는데 있어서 상대농도 측정기를 사용하고자 할 때는, 평행판 분립기(Hori-

zontal elutriator)를 이용한 저유량 공기 포집기(Low volume air sampler)와 병행 측정하여 중량농도 환산계수를 구하여야 하는데(노동부, 1986), 평행판 분립기는 시료 채취중에 수평을 유지해야 하며 중량이 무겁고 크기가 크기 때문에 근로자의 분진폭로농도를 측정할 수 없는 단점이 있으며 국내 대부분의 탄광에서는 전기 사용의 제한과 전력 공급의 어려움으로 인하여 상대 농도 측정기와 병행 측정해야 하는 저유량 공기 포집기(Low volume air sampler)등의 사용이 곤란한 경우가 많다. 반면에 탄광에서의 호흡성 분진 측정은 평행판 분립기보다는 사이클론이 더 적합하다(Knight 등, 1970)고 하였다. 또한 개인용 분진 포집기의 사이클론류는 크기가 작고 가벼우므로 근로자에게 착용시켜 분진폭로농도를 측정할 수 있는 장점이 있다. 따라서 탄광의 호흡성 분진을 평가할 때 상대농도 측정기를 사용할 경우 평행판 분립기를 이용한 저유량 공기 포집기 대신에 개인용 분진 포집기를 대체하는 것이 바람직하다.

우리나라 탄광의 경우 백남원(1967)이 디지털 분진계를 사용하였고, 김한주 등(1985)이 굴진 막장의 호흡성 분진을, 문우기 등(1985)은 채탄막장의 호흡성 분진을 피에조 밸런스(Piezoelectric balance)로 상대농도를 측정하였다. 또한 정 등(1983)은 일반 산업장의 분진에 대하여 상대농도와 중량농도를 비교하였다. 그러나 탄광의 작업 환경 측정에서 있어서 상대농도 측정기로 분진을 측정하는 경우 사이클론을 이용한 개인용 분진포집기(Personal dust sampler)와 상대농도 측정기와의 관계에 대해서는 미처 조사가 이루어지지 않은 실정이다.

그러므로 갱내의 호흡성 분진을 측정하는데 있어서 우리나라에서 많이 사용되고 있는 상대농도 측정기의 하나인 디지털 분진계(Digital dust indicator)와 중량농도 측정기인 개인용 분진포집기의 측정값에 관해서 태백 및 강릉 지방의 탄광을 대상으로 실측조사를 통하여 측정값간의 관계와 중량농도 환산계수를 구해보고자 본 조사를 실시하였다.

II. 방법 및 재료

1. 조사대상 및 시기

태백과 강릉지역의 탄광 67개를 일련번호를 준 후 무작위 추출방법으로 20개 탄광을 선정하였다. 조사대상인 탄광의 막장은 각 탄광별로 가용막장 중에서 측정이 가

능한 1개 막장을 무작위로 추출하여 선정하였다.

조사시기는 1986년 5월부터 동년 11월까지였다.

2. 기지 및 재료

1) 개인용 분진포집기(Personal dust sampler) : 호흡성 분진의 중량 농도 측정용으로 사용전후에 유량계로 유량을 보정하였다. 측정에 사용한 기종은 다음과 같다.

(1) 노인 TR 개인용 분진포집기(Sibata PS-4형, 일본) : 관성충돌을 이용한 분진포집.

(2) Casella personal air sampler(영국) : SIMPED cyclone으로 호흡성 분진의 분리포집.

(3) MSA Fixt-Flo Model 1(미국) : 10 mm nylon cyclone으로 호흡성 분진을 분리포집.

2) 유량 보정계(MSA Pump calibrator Model A) : 비누 거품을 이용한 일차 기준(primary standard)인 bubble cylinder로서 100~4,000 ml/min의 유량보정이 가능한 것으로써 0.1 ml/min까지 가능.

3) 디지털 분진계(Sibata P-5형, 일본) : 광산란을 이용하여 10 μ m 이하의 분진을 CPM(Count per minute)으로 측정.

4) 온습도계 : Assmann 통풍건습도계(Sato, 일본)

5) 직시 천평 (Electrobalance) (Shimadzu L-200 SM, 일본) : 0.01 mg 판독용.

6) 멤브레인 필터(Membrane filter) : 공극(Pore size) 0.45 μ m의 mixed cellulose ester membrane filter.

3. 측정방법

개인용 분진포집기 3대로 중량농도를 측정하여 평균값을 사용하였으며, 디지털 분진계로 상대농도를 동시에 측정하였으며 온습도도 함께 측정하였다.

측정위치는 개인용 분진포집기의 필터 홀더(Filter holder)의 유입부와 디지털 분진계의 흡인구를 근로자의 호흡 영역에서 높이와 방향을 같게 하여, 각각 5~10 cm 떨어져 한 필터 홀더와 흡인구를 고정(Pertti Kuusisto, 1983; Beaulieu 등, 1980)시켜 측정하였다.

측정은 가용막장에서 1교대조의 작업시간 동안에 실시하였으며, 막장에 따라 폭약의 발파 및 발파후 30분, 갱내 붕괴등으로 인한 보수등 측정이 불가능한 시간을 제외한 측정 가능한 시간은 60~255분이었다. 개인용 분진포집기의 유량은 21/min이었으며 작동 후 유량이 정

상상태(Steady state)에 도달되는 5분이 경과한 후 유량계의 눈금을 읽고 시료채취 종료시간에 유량계의 눈금을 확인하였다(Morse 등, 1971; Weiss 등, 1982).

상대농도는 디지털 분진계로 5분간씩 측정하였고 점심 시간 등의 경우는 연속측정 하였다.

Membrane filter는 데시케이터(Desiccator)에서 24시간 건조시킨 후 칭량하는 방법으로 5회 반복하여 산정하였다. 이 때의 여지 무게(mg)에 대한 정밀도(변이계수)(시료수×측정수: 10×5)(APHA, 1985)는 0.24%였다.

온습도의 측정은 아스만 통풍건습계를 5분간 작동하여 건구, 습구가 안정하게 한 후 그 값을 읽었다.

4. 분석방법

측정결과는 상대농도와 중량농도, 상대농도와 온도, 상대농도와 상대습도 등을 회귀분석하였다. 또한 중량농도 환산계수의 분포를 검토하였다.

유의수준은 $\alpha=0.05$ 로 설정하였다.

III. 결과 및 고찰

20개 탄광에 대하여 개인용 분진포집기와 디지털 분진계의 측정값에 관한 조사결과, 분진농도가 매우 낮은 3개 탄광의 선탄장에서는 중량농도의 측정값을 얻을 수 없었으나 디지털 분진계에 의한 농도는 5 ± 1 CPM(평균±표준편차)이었다.

중량농도 측정값을 얻을 수 없었던 3개 탄광을 제외한 17개 탄광의 갱내에서 호흡성 분진의 중량농도와 상대농도의 관계 및 상대농도에 대한 온습도의 영향은 다음과 같다.

1. 상대농도와 온도의 관계

온도의 범위는 $14.2 \sim 28.4^\circ\text{C}$ (평균±표준편차; $17.4 \pm 3.3^\circ\text{C}$)였으며 이 범위에서의 온도와 상대농도는 통계학적으로 유의한 상관관계($p > 0.05$, $r = 0.06$)가 없었다.

이것은 Pertti Kuusisto(1983)의 조사 결과인 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 영점(Zero point)의 안정성이 높은 것과 같은 경향으로 간주할 수 있으며 측정온도의 범위가 14.2°C ($14.2 \sim 28.8^\circ\text{C}$)이므로 이 범위에서의 온도는 상대농도에 영향을 주지 않은 것으로 사료된다.

2. 상대농도와 습도의 관계

상대습도는 70%를 상회하는 습도범위인 86~98%(평균±표준편차; $92 \pm 3\%$)였으며 상대농도와 습도의 관계는 유의한 상관관계($p > 0.05$, $r = 0.01$)가 없었다.

측정습도의 범위가 12%(86~98%)이며 고습도이므로 이 범위내에서의 습도와 상대농도 간에 통계학적인 상관관계가 없었던 것으로 사료된다.

3. 중량농도 환산계수

중량농도 환산계수(K)는 상대농도를 중량농도로 환산할 때 사용하는 계수로서, 식(1)과 같다(勞働省 安全衛生部 勞働衛生課, 1984; 柴田科學, 1980).

$$K = Cps / (R - D) \dots\dots\dots (1)$$

단, Cps = 중량농도, mg/m³

R = 측정치, CPM

D = background 값, CPM

중량농도 환산계수는 Table 1과 같다. Table 1에서

Table 1. Coefficients of mass-relative concentration

Sample number	Weight concentration mg/m ³	Relative concentration CPM	Coefficients of mass-relative concentration
1	1.33	117	0.011
2	1.60	283	0.006
3	1.90	16	0.119
4	2.18	17	0.128
5	2.39	108	0.022
6	2.45	16	0.136
7	2.64	352	0.008
8	2.74	180	0.015
9	3.24	38	0.085
10	3.53	187	0.019
11	4.21	628	0.007
12	5.78	71	0.081
13	7.56	42	0.053
14	7.63	70	0.109
15	8.45	49	0.172
16	11.62	113	0.103
17	22.69	364	0.062
M ± S. D.*	5.41 ± 5.32	162 ± 163	0.067 ± 0.054

* Mean ± Standard deviation

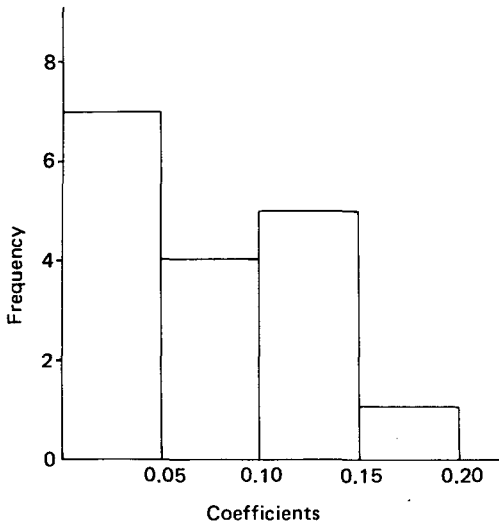


Fig. 1. Distribution of coefficients of mass-relative concentration.

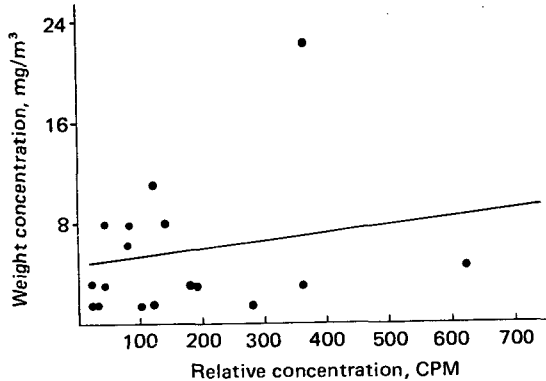


Fig. 2. Relation between relative concentration and weight concentration.

중량농도 환산계수는 0.067 ± 0.054 (평균 \pm 표준편차)의 값을 나타내고 최소값을 0.006, 최대값은 0.173이다. 중량농도 환산계수의 분포를 히스토그램(Histogram)으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

정 등(1983)은 일반 작업장에서 디지털 분진계와 저유량 공기 포집기와 보정계수가 9~35배까지 다르게 나타난다고 보고하고 있는데 본 조사에서도 이와 유사한 값인 1~29배를 나타내고 있다.

4. 중량농도와 상대농도의 관계

중량농도의 범위는 $1.33 \sim 22.69 \text{ mg/m}^3$ 이고 평균은 5.41 mg/m^3 , 표준편차는 5.22 mg/m^3 이었으며 상대농도의 범위는 16~628 CPM(평균 \pm 표준편차; 162 ± 163 CPM)이었다.

일반 작업장에서는 중량농도가 증가함에 따라 상대농도의 값도 증가하는 것이 일반적인 경향이다. 그러나 본 조사에서는 상대농도의 농도범위인 16~628 CPM에 대한 중량농도의 범위인 $1.33 \sim 22.69 \text{ mg/m}^3$ 와의 상관관계는 유의하지 않았다(Fig. 2 : $p > 0.05$, $r = 0.22$).

이는 다음과 같이 추정된다. 디지털 분진계는 광산란을 이용하는 것으로서 분진입자의 투영면적에 비례하여 분진농도를 측정하는 계측기이다. 또한 탄광의 작업환경을 고려해 볼 때 상대습도는 70%를 훨씬 상회하는 92%(범위 : 86~98%)였고 피측정 분진은 흡습성이 강한 석탄 분진이었다. 그러므로 디지털 분진계의 측정부에서 분진입자간의 충돌에 의한 입자의 성장(Tillery 등, 1973) 및 분진입자간의 입경 차이에 의하여 작은 입자가 큰 입자에 가려지는 차단효과(masking effect)에 의하여 고농도에서 디지털 분진계의 측정값이 적게 나타나기 때문에 상대농도의 범위인 16~628 CPM에 대한 중량농도의 범위인 $1.33 \sim 22.69 \text{ mg/m}^3$ 의 상관관계가 나타나지 않는 것으로 사료된다.

탄광의 작업환경(고습도 ; 평균 92%, 분진의 고농도 ; 평균 5.41 mg/m^3)과 중량농도(범위 $1.33 \sim 22.69 \text{ mg/m}^3$)와 상대농도(범위 16~628)의 관계에서 호흡성 분진의 평가는 개인용 분진포집기의 사용이 바람직한 것으로 생각된다.

탄광의 호흡성 분진을 평가하는데 있어서 디지털 분진계를 부득이 사용해야 할 경우 개인용 분진포집기와 병행 사용하여 디지털 분진계의 장점인 취급의 용이와 측정시간이 짧은 것을 이용하여 짧은 시간 안에 소규모의 인력으로 많은 측정지점의 측정이 가능하다. 다만 Fig. 3부터 Fig. 6(상대농도의 시간별 변화 즉 호흡성 분진농도의 경시변화의 예를 Fig. 3에서 Fig. 6까지 나타냈다. Fig. 3은 저농도의 경우이고 Fig. 4~Fig. 6은 고농도의 예이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 시간에 대한 농도 표시가 없는 부분은 측정이 불가능했던 시간이다. Fig. 3~Fig. 6에서 시간에 대한 분진농도의 변화가 심한 것을 알 수 있다)까지 나타난 것과 같이 임의의 시간에서의 순간농도를

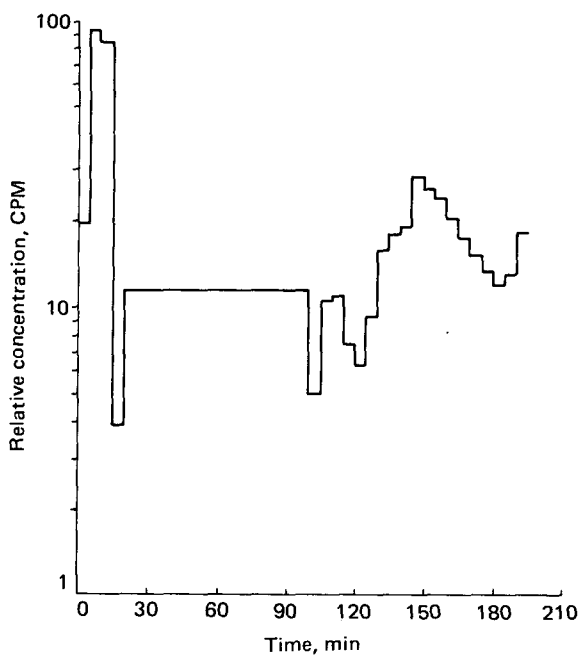


Fig. 3. Variation of relative concentration in sampling time.

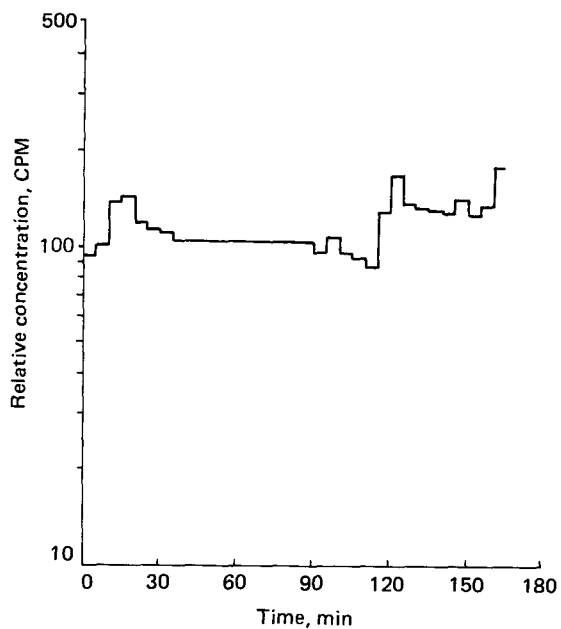


Fig. 4. Variation of relative concentration in sampling time.

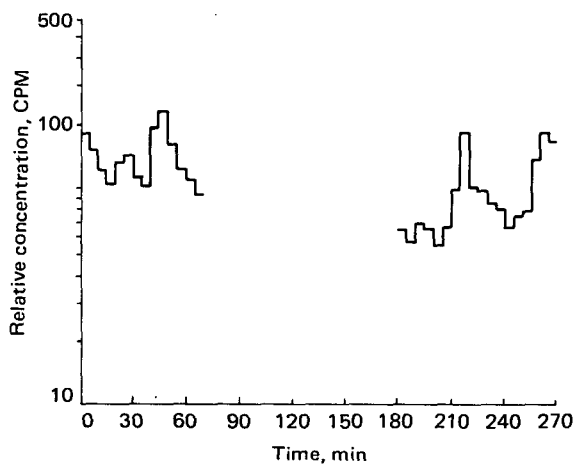


Fig. 5. Variation of relative concentration in sampling time.

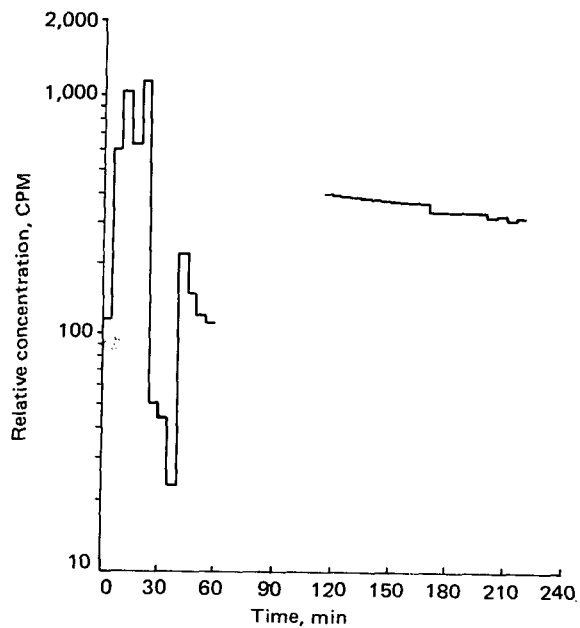


Fig. 6. Variation of relative concentration in sampling time.

측정하는 것보다 일정시간의 간격으로 분진농도를 중량 농도와 비교 검토하면 분진 농도감시(Monitoring)에 디지털 분진계의 사용이 가능하다고 생각된다.

향후 저농도에서 고농도까지의 분진을 발생시킬 수 있는 입자발생기(Dust feeder; aerosol generator)로 온도와 습도를 조정하여 개인용 분진포집기와 디지털 분진계를 비교 검토하는 것이 필요하다고 사료된다.

VI. 결 론

우리나라에서 발생한 진폐증의 점유율이 가장 높은 탄광 중에서 태백 및 강릉지역의 탄광을 대상으로 호흡성 분진의 농도를 평가함에 있어서, 디지털 분진계와 개인용 분진포집기와의 상관관계를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중량농도 환산계수는 0.067 ± 0.054 (평균±표준편차), 범위는 0.006~0.172였다.

2) 중량농도의 측정 범위였던 $1.33 \sim 22.69 \text{ mg/m}^3$ 에서는 중량농도와 상대농도의 값(범위: 16~628 CPM)은 통계학적으로 유의한 상관관계가 없었다 ($p > 0.05$, $r = 0.22$).

3) 상대농도와 온습도의 관계는 통계학적으로 유의한 상관관계가 없었다(온도: $p > 0.05$, $r = 0.06$; 습도: $p > 0.05$, $r = 0.01$).

참 고 문 헌

김광중, 김영환, 나규환 등. 산업위생관리. 신광출판사, 1984, 쪽. 447-453

김한주, 윤임중. 일부 탄광지역 굴진 막장의 분진상태와 굴진부 진폐증의 유병율에 대한 역학적 조사. 가톨릭 대학 의학부 논문집 1985; 38(4):975-985

노동부. 작업환경 측정방법 노동부고시 제86-46호. 노동부, 1986, 쪽.57

문우기, 조규상. 한국 채탄 광부의 진폐증 발생에 대한 역학적 연구. 가톨릭 대학 의학부 논문집 1985; 38(4): 951-961

백남원. 한국 산업장의 안전보건관리 실태조사 보고서. 한국의 산업의학 1967; 6(4):13-26

정광호, 성수원, 안규동. 상대농도와 질량농도 측정법에 의한 기중 분진농도의 비교. 한국의 산업의학 1983; 22(1):1-6

労働省 安全衛生部 労働衛生課. 作業環境ガイドブック-(1)-礦物成分じん 關係一. 東京, 日本作業環境測定協會, 1984, pp. 77-97

柴田科學機械工業株式會社. ドジタル粉じん計取扱説明書. 1980, pp. 9-10

中央勞災害防止協會. 日本じん 肺對策 第2分冊. 東京, 中央勞動災害防止協會, 1985, pp. 41-43

APHA-AWWA-WPCF. Standard methods. 15th ed. Washington, APHA, 1981 pp. 18, 20-21

Beaulieu HJ, Fidino AV, Kim MS et al. A comparison of aerosol sampling techniques: Open versus closed-face filter cassettes. Am Ind Hyg Assoc J 1980; 41: 758-765

Clayton GD, Clayton FE, eds. Patty's industrial hygiene and toxicology. 3rd ed. vol 1. New York, Wiley, 1978, p. 756

Knight G, Lichti K. Comparison of cyclone and horizontal elutriator size selectors. Am Ind Hyg Assoc J 1970; 31:437-441

Mc Donald JC. Recent advances in occupational health No. 1. New York, Churchill Livingstone, 1981, p. 52

Morse KM, Bunsted HE, Janes WC. The validity of gravimetric measurements of respirable coal mine dust. Am Ind Hyg Assoc J 1971; 32:104-114

Tillery MI, Moss OR, Ettinger HJ et al. Effect of humidity on the aerodynamic size characteristics of nonhygroscopic aerosols. Am Ind Hyg Assoc J 1973; 34:440-449

Pertti Kuusisto. Evaluation of the direct reading instrument for the measurement of aerosols. Am Ind Hyg Assoc J 1983; 44:863-874

Pittsburgh Field Health Group. Sampling and evaluation respirable coal mine dust. A training manual. Washington, Bureau of Mines, 1971, pp. 1-4

Weiss SA, Beaulieu HJ, Buchan RM. Air volume measurement error in pumps with rotameters and high range "constant flow" pumps. Am Ind Hyg Assoc J 1982; 43:754-758

Sem GT, Tsurubayashi K. A new mass sensor respirable dust measurement. Am Ind Hyg Assoc J 1978; 35: 720-723