

일부 석탄광산 기중 부유분진의 입경 분포와 호흡성 분진 비율

근로복지공사 직업병연구소

윤 영노 · 김 영식

—Abstract—

Size Distributions and Respirable Mass Fractions of Airborne Coal Dust in Underground Coal Mines

Yoon Young No, Kim Young Sik

Institute of Occupational Diseases Korea Labour Welfare Corporation

Authors investigated size distributions of airborne mixed coal dust at drillings, coal-faces, and separating sites of underground coal mines in Taebaek, Hwasun, and Jeomchon area by ambient cascade impactors. And Respirable mass fractions were calculated from the size distributions by the ACGIH criteria.

Key words : coal mine, mixed coal dust, size distribution, ambient cascade impactor, respirable mass fraction

I. 서 론

공기 중에 부유하는 분진은 입경 면에서 100 μm 이하로 알려져 있으며 입경에 따라 침착되는 부위가 다른 것으로 알려져 있으며(WHO, 1984) 대한산업보건협회 1989년도 조사에 의하면 전체 직업병의 52%가 진폐증이고 이중 89%가 석탄광업에서 차지하고 있다. 따라서 직업병을 감소시키고 예방하는 측면에서 진폐증의 비중이 크므로 이에 대한 대책이 시급하다. 진폐증의 예방은 우선적으로 석탄광산에 대하여 집중적으로 이루어질 필요가 있다.

호흡성 분진은 그 크기면에서 폐 내에 침착되어 진폐를 유발할 잠재력이 높은 분진이므로

ACGIH에서 분진과 관련된 TLV_s를 적용하는데 size-selective sampling을 적용하여야 한다(ACGIH, 1990)고 하였다.

석탄광산에서 발생하는 부유분진의 입경분포를 파악하는 것은 진폐예방 측면에서 공학적 개선 방안을 강구하는데 중요한 자료를 뿐만 아니라 근로자 건강 보호 측면에서도 중요하다.

따라서 석탄광산의 갱내 공기와 선탄장의 공기 중에 부유하는 석탄분진의 입경을 조사할 필요가 있다.

공기 중에 부유하고 있는 분진 중에서 호흡성 분진의 크기에 해당하는 입경이 차지하는 비율이 어느 정도인가는 진폐와 관련하여 진폐를 유발하는 석탄 분진의 평가나 예방의 관점에서 중요하다.

석탄광산의 갱내 작업장에서 발생하는 부유분진 중에서 강하분진에 대한 입경분포 조사는 일부 이루어졌으나(오재현 등, 1970) 부유분진의 입경분포에 관한 조사가 드문 실정이다. 공기 중에 부유하는 석탄분진 중에 호흡성 분진이 차지하는 비율이 어느 정도인가에 대한 조사도 거의 없는 실정이다.

그러므로 석탄광산에서 발생하는 갱내 부유분진의 입경분포와 부유분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율을 파악하기 위하여 태백, 화순, 점촌 지역의 일부 석탄광산을 대상으로 조사하였다.

II. 방법과 재료

1. 조사 대상과 시기

조사 대상은 강원도 태백, 전라남도 화순, 경상북도 점촌 지역의 석탄광산 중에서 석탄사업 합리화 방안에 의해 향후 폐광되지 않고 지속적으로 운영이 가능한 광업소 중에서 조사가 가능한 14개 석탄광산을 선정하였다. 조사 대상 석탄광산의 막장 선정은 갱내 도면상에서 가용막장 중 측정이 가능한 막장을 완전 무작위 추출 방법으로 선정하였다.

부유분진의 입경분포 조사대상은 굴진 막장, 채탄 막장, 선탄장이었다.

조사시기는 1989년 10월부터 동년 11월과 1990년 9월 동안 조사하였다.

2. 기기

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

각 단의 등가 공기역학적 절단 입경(cut-size)는

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

표 1과 같다.

2) 유량보정계(pump calibrator) : 비누거품을 사용하는 soap bubble calibrator로 개인용 입경분리 포집기의 보정은 MAS사의 Model A로 100-4,000 mL/min의 범위에서 0.1 mL/min까지 유량보정이 가능한 기종이다.

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

3. 재료

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

4. 측정 방법

부유분진의 입경분포를 파악하기 위하여 다단형 입경 분리 포집기를 각 부서별로 포집하였으며 포집한 시료는 실험실로 운반하여 분진의 무게를 측정하였다.

부유분진의 입경분포 측정은 굴진 막장에서 근로자에게 작업의 방해가 주지 않도록 굴진면에서 3 m 이내의 거리 내에서 바닥면에서 75-120 cm의 높이에서 포집하였다.

채탄 막장에서는 연층 채탄의 경우는 굴진 막장과 같이 측정하였고 승 막장의 경우는 막장의 크기와 작업조건에 따라 채탄면에서 1-3 m의 거리에서 측정하였다.

선탄장에서는 선탄부의 작업위치에서 작업의 방해를 주지 않는 범위에서 선탄부 간의 중심부에서 바닥으로부터 120-150 cm의 높이에서 측정하였다.

다단형 입경 분립 포집기의 유입부는 기류 방향에 대해 직각으로 향하도록 하고 수평을 유지하였다(通商産業省 立地公害局, 1986).

collection substrate는 수분조절기(desiccator)에서 24시간 건조시킨 후 칭량하였으며 5회 반복하여 산정하였으며, 여지 무게(mg)에 대한 정밀도(시료수×측정수) (APHA, 1985)는 0.02%(0.00-0.08%) (660×5)였다.

III. 결과와 고찰

석탄광산에서 발생하는 석탄분진을 각 부서에 따라 공기 중에 부유하는 부유분진의 입경분포를 다단형 입경 분립 포집기로 측정한 결과는 다음과 같았다.

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

본 조사에 사용한 다단형 입경 분립 포집기의 수가 적어서 많은 시료의 포집에 어려움이 있었고 석탄광산의 사정으로 인하여 반복 측정이 불가능하였다.

다단형 입경 분립 포집기의 적절한 시료 채취를 하는데 있어서 시료 채취 시간의 부족으로 인하여 시료의 포집량이 부족한 것이 많았는데 특히 큰 광업소의 경우가 심하였다. 이것은 가용 막장까지 도달 시간이 많이 걸렸기 때문이다.

1. 부유분진의 입경분포

일반적으로 공기 중에 부유하고 있는 분진은 그 크기 면에서 약 100 μm 이하로 알려져 있으며, 입경에 따라 침착되는 부위가 다른 것으로 알려져 있다(WHO, 1984).

ACGIH는 부유분진 중에서도 기관지 침착성 분진(thoracic particulate)은 폐내의 통기관과 가스교환부위에 침적되어 유해하게 되는 분진에 적용하는데 양적인 측면에서 입경의 대수정규분포 누적곡선상에서의 공기역학경의 중앙값이 $10 \pm 1.0 \mu\text{m}$ 이며 기하표준편차가 $1.5 (\pm 0.1)$ 인 입경분리 포집효율을 갖는 입자로 구성된 분진을 말한다. 또한 호흡성 분진(respirable particulate)은 가스 교환 부위에 침적하는 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.

근로자에게 폭로되는 석탄분진의 농도도 중요하지만 근로자의 건강 보호 측면에서 입경분포는 중요하다. 따라서 굴진 막장과 채탄 막장, 선탄장에서 근무하는 근로자의 폭로분진을 대상으로 입경분포를 조사한 결과는 표 2와 같다.

표 2에서 입경의 기하평균은 입경분포를 대표하는 입경으로서 mass median diameter를 의미하고 기하표준편차는 입경분포의 정도를 나타내는 것으로 기하표준편차가 1.0일때 단분산(monodisperse)한다고 말한다. 즉 입경이 모두 같은 것을 의미하고 기하표준편차가 크면 입경의 차가 심한 것-입경분포가 큰 것-을 말한다.

굴진, 채탄, 선탄장의 입경분포의 일례를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

표 2에 나타난 것과 같이 세 부서 중에서 굴진 막장의 부유분진의 입경이 $1.8-2.6 \mu\text{m}$ 로 가장 작으며 대표입경이 ACGIH(1989)에서 정의한 호흡성 분진의 입경보다 작은 입경임을 알 수 있고, 채탄막장의 입경도 $1.7-6.6 \mu\text{m}$ 로 호흡성 분진의 입경과 기관지 침착성 분진의 범주에 포함되며 선탄장의 입경분포는 $6.3-6.9 \mu\text{m}$ 로 기관지 침착성 분진의 입경임을 알 수 있다.

2. 부유분진 중 호흡성 분진의 비율

근로자에게 폭로되는 분진 중에서 진폐를 유발하는 것으로 알려진 호흡성 분진이 어느 정도 비중을 차지하는가를 파악하는 것은 진폐를 유발하는 분진의 잠재적 유해도(potential hazard)의 추정이 가능하게 된다. 다시 말해서 호흡성 분진이

Table 2. Size distribution of airborne mixed coal dust in underground coal mines

Coal mine	Drilling		Coalface		Seperating site	
	M_g	σ_g	M_g	σ_g	M_g	σ_g
A	1.8	5.63	4.7	5.41	6.3	4.50
B	2.4	7.06	5.6	4.32	5.7	6.43
C	2.0	4.80	6.6	4.31	7.0	8.05
D	2.5	4.31	4.3	7.17	5.0	7.54
E	2.2	5.21	5.4	4.45	6.7	5.23
F	1.9	4.55	6.1	5.19	6.3	4.50
G	2.6	4.20	5.7	5.43	6.9	7.43
H	2.0	5.24	5.4	4.79	6.9	7.55

Note) M_g : mass median diameter, μm
 σ_g : geomertic standard deviation

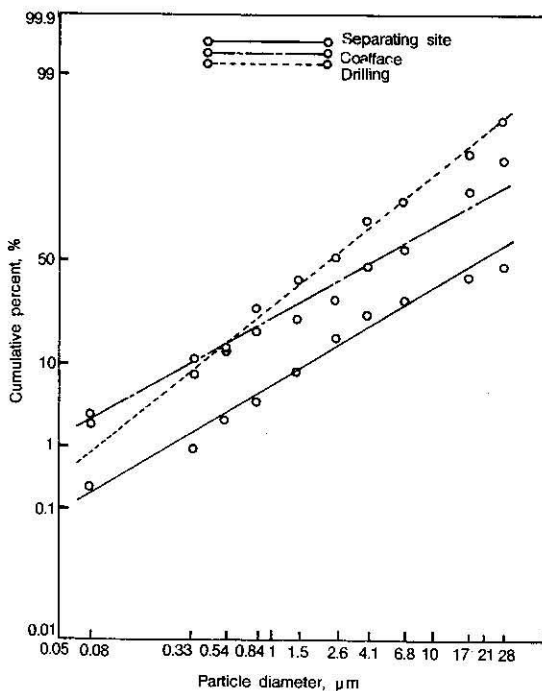


Fig. 1. Size distribution of airborne suspended coal dust in underground coal mine C

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 차

지하는 비율을 계산하였다.

호흡성 분진의 비율을 구하는 방법(Lodge, 1986)은 다음과 같다.

- 1) 입경분포 조사 결과를 확률대수지에 입경과 누적비율을 도식화한다.
- 2) 각 단의 하한, 중간, 상한값에 해당되는 입경의 누적비율을 구한다.
- 3) ACGIH의 정의에 의한 호흡성 분진을 대수 확률지에 누적비율이 15.9%일 때 $5.25 \mu m$, 누적비율이 50%일 때 $3.5 \mu m$, 누적비율이 84.1%일 때 $2.33 \mu m$ 의 값을 그림 2와 같이 도식화한다.
- 4) 각 단의 상한, 하한, 중간값의 입경에 해당되는 누적비율을 ACGIH에서 규정한 호흡성 분진의 입경분포곡선에서 구한다.
- 5) 4)에서 구한 값을 식 1의 심슨 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.

$$RF = \frac{(RF_{LL} + 4(RF_{MP}) + RF_{UL})}{6} \dots\dots (\text{식 1})$$

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

기중 부유분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율을 구한 결과는 표 3과 같다.

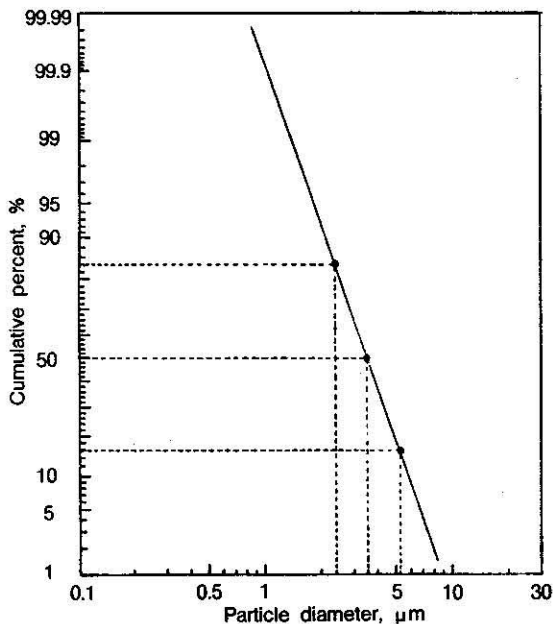


Fig. 2. Size distribution of respirable particulate matter defined by ACGIH

Table 3. Respirable mass fraction of airborne mixed coal dust at work site in underground coal mines

Coal mine	Respirable mass fraction (%)		
	Drilling	Coalface	Separating site
A	59.11	46.25	32.44
B	54.49	43.24	21.32
C	63.42	34.39	37.13
D	66.25	40.94	18.94
E	57.43	43.39	23.67
F	61.63	37.34	27.32
G	60.51	34.13	20.57
H	55.34	39.56	20.23

표 3에 나타난 것과 같이 굴진부서의 공기 중에 부유하고 있는 분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율이 55.34—66.25%로 다른 부서에 비하여 가장 높게 나타났으며, 이는 채탄부서나 선탄부서에 비하여 진폐에 발생 확률이 높다는 것을 의미하고 있다. 따라서 석탄작업 부서중에서 굴진부서가 채탄부서나 선탄부서보다 진폐증의 유병율이 높은 것으로 보고 되고 있는 사실과 일치하고 있다(문우기 등 1985; 김한주 등, 1985).

다만 본 조사에서의 자료가 충분하지 못하므로 각 부서별 대표입경과 기하표준편차, 호흡성 분진이 차지하는 비율을 참고 자료로 활용할 수는 있으나 향후보다 충분한 조사가 이루어져야 할 것이다.

IV. 요약

석탄광산에서 발생하는 갱내 부유분진의 입경 분포와 부유분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율을 파악하기 위하여 태백, 화순, 점촌 지역의 일부 석탄광산을 대상으로 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 굴진막상의 부유분진의 입경이 가장 작으며 대표입경이 ACGIH(1989)에서 정의한 호흡성 분진의 입경보다 작고 채탄막상의 입경은 호흡성 분진의 입경과 같으며 선탄장의 입경도 기관지 침착성 분진의 입경을 나타내고 있다.
2. 굴진부서의 공기 중에 부유하고 있는 분진 중에서 호흡성 분진이 차지하는 비율이 다른 부서에 비하여 가장 높게 나타났다.

참고 문헌

- ACGIH: *Threshold limit values and biological exposure indices for 1990-1991, Cincinnati, ACGIH, 1990, 45-46*
- 대한산업보건협회: 근로자건강진단종합연보, 1989, 22-32
- 오재현, 정철영: 탄진에 관한 조사보고, 채광 연구 보고 1970; 3: 193-218
- 通商産業省 立地公署局: 鑛山にける粉塵濃度のマニユアル, 東京, 鑛業労働災害防止協會, 1986, 4, 14-15, 18-19

APHA-AWWA-WPCF : *Standard methods*, Washington, APHA, 1981, 20-21

Lodge JP, Chan TL : *Cascade impactor, Sampling and data analysis*, Akron, Am Ind Hyg Assoc, 1986, 39-61

WHO : *Evaluation of exposure to airborne particles on the work environment*, Switzerland, WHO, 1984, 19-24

김한주, 윤임중 : 일부 탄광지역 굴진막장의 분진상태와 굴진부 진폐증의 유병율에 대한 역학적 조사, 카톨릭대학 의학부 논문집, 1985, 975-985

문우기, 김한주 : 한국 채탄 광부의 진폐증 발생에 관한 역학적 연구, 카톨릭대학 의학부 논문집, 1985, 951-961