

## 연탄제조 공장의 작업장별 석탄분진의 농도에 관한 연구

신대윤 · 오정룡 · 강공언\*

조선대학교 환경공학과  
\* 건국대학교 환경공학과

### A Study on Airborne Coal Dust Concentration at each Work Site in Coal Briquet Factory

Shin Dae Yewn · Oh Jung Ryong · Kang Gong Unn \*

*Dept. of Environmental Engineering Chosun, University*

*\* Dept. of Environmental Engineering, Kon Kuk University*

#### ABSTRACT

This study was carried out to investigate exposure level, size distribution, and respirable mass fraction of airborne coal dust and heavy metal concentration of respirable coal dust at each work site in coal briquet factory from July 1991 to September 1991. Geometric mean of total dust concentration was  $10.88\text{mg}/\text{m}^3$  at storage shop,  $8.22\text{mg}/\text{m}^3$  at pulverize shop, and  $3.79\text{mg}/\text{m}^3$  at rotary press shop, respectively, but those at storage and pulverize shop were higher than TLV. Geometric mean of respirable coal dust concentration was  $1.03\text{mg}/\text{m}^3$  at storage shop,  $0.78\text{mg}/\text{m}^3$  at pulverize shop, and  $0.55\text{mg}/\text{m}^3$  at rotary press shop, respectively, which were lower than TLV. Aerodynamic 50% cutoff diameter of the suspended coal dust was  $5\mu\text{m}$  at rotary press shop and  $6.8\mu\text{m}$  at storage shop, ranged to thoracic particulate defined by ACGIH, and deposited in the region of respiratory system. The mass fraction rate of respirable dust to the total coal dust was 26.2% at rotary press shop, 18.8% at storage shop, and 13.8% at pulverize shop, respectively. Heavy metal concentrations of the respirable coal dust were  $0.028\text{mg}/\text{m}^3$  in Fe,  $0.0081\text{mg}/\text{m}^3$  in Cu, and  $0.0039\text{mg}/\text{m}^3$  in Pb.

#### I. 서 론

연탄제조공장의 작업환경에서 발생하는 석탄분진은 근로자의 건강에 가장 문제가 되는 진폐증의 원인이 된다.<sup>1)</sup> American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH)는 인체에 유해한 공기중의 부유분진을 호흡성분진(res-

pirable particulate)과 기관지 침착성분진(thoracic particulate)으로 구분하였다. 호흡성 분진은 부유분진중에서 입경의 대수정규분포 누적곡선(cumulative log-normal distribution)상의 공기역학경(aerodynamic diameter)의 중앙값이  $3.5 \pm 0.3\mu\text{m}$ 이고 기하표준편차가  $1.5(\pm 0.1)$ 인 입경분리 포집효율을 갖는 분진으로서 가스교환부위(gas-exchange region)에 침착하여 유해성을

나타낸다고 하였다. 그러나 기관지 침착성분진은 공기역학경의 중앙값이  $10 \pm 1.0 \mu\text{m}$ 이고 기하표준편차가  $1.5 (\pm 0.1)$ 인 입경분리 포집효율을 갖는 분진으로서 폐내의 통기관(lung airway)과 가스교환부위에 침착하여 유해성을 나타낸다고 하였다.<sup>2)</sup>

석탄분진중에서 진폐증을 유발하는 것은 호흡성분진으로 입경분포에 따라 기도(respiratory tract)에 침착하는 부위는 서로 다르게 되어 진폐증 발생에 중요한 영향을 미칠 수 있다.<sup>2,3)</sup> 각 근로자의 건강상태와 작업량, 작업강도, 작업공정, 근무시간, 작업영역과 위치, 작업장내의 풍향과 풍속, 및 기상조건 등의 서로 다른 여러가지 요인에 의해 각 작업장별 석탄분진의 폭로정도와 입경분포는 다르게 된다. 또한 근로자의 진폐증 발생은 석탄분진의 폭로정도 뿐만 아니라 호흡성분진에 함유된 미량 중금속 성분에 따라 달라진다고 하였다.<sup>4,5)</sup>

그러나 아직까지 연탄제조공장의 호흡성분진 및 부유분진의 입경분포별 자료나 중금속 성분의 농도에 대한 보고는 거의 이루어지지 않았으며, 공기중에 부유하는 석탄분진중의 호흡성분진이 기여하는 정도에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 연탄제조공장의 여러 작업장에서 일하는 근로자의 진폐예방과 건강보호를 위한 공학적인 개선방향을 강구하는 자료를 제시코자 각 작업장별 석탄부유분진의 폭로정도와 입경별 농도 및 호흡성분진중의 중금속 농도에 대하여 조사하였다. 또한 각 작업장에서 측정된 석탄분진의 입경별 농도로 부터 호흡성분진의 기여도를 구하여 각 작업장별 진폐를 유발하는 분진의 잠재 유해도(potential hazard)를 추정하였다.

## II. 실험 및 분석방법

### 1. 시료채취장소 및 기간

시료채취는 광주시 서구 송암동에 위치한 대단위 연탄공장 단지내에 있는 1개의 석탄연료 제조업체에서 하였다. 시료채취장소는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 옥내 작업장별 근로자의 피폭분진을 조사하기 위하여 분쇄(pulverize shop), 저장

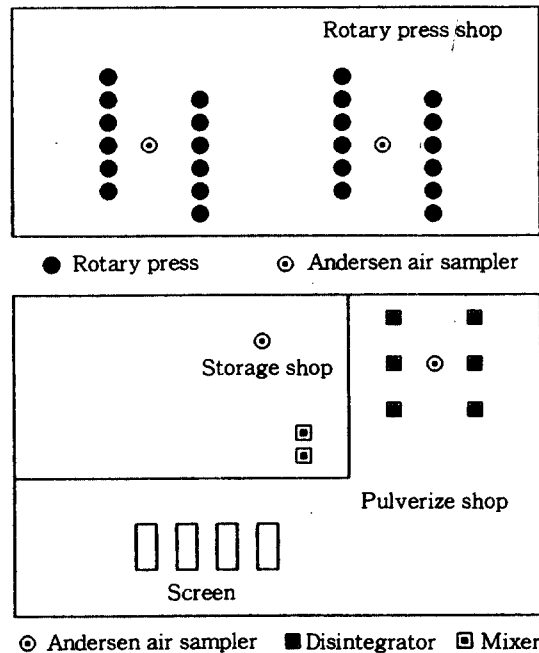


Fig. 1. Coal dust sampling station.

(storage shop), 그리고 성형(rotary press shop)의 3개 공정을 대상으로 하였다.

석탄의 제조공정은 원료탄 배합, 점결제 혼합, 분쇄, 가운혼합, 및 성형의 순으로 이루어진다. 즉 원료탄의 점결성, 회분 함유량 및 클린커 생성경향 등을 고려하여 원료인 무연탄(anthracite)을 배합한 후 점결제를 혼합하여 저탄장 hopper 투입구에서 conveyor belt를 통해 작업장 안으로 반입된다. 여기에서 석탄을 회전체에 의하여 1차 스크린 한 다음 체를 통과하지 못한 것만 분쇄기(disintegrator)에서 20~30mesh정도로 분쇄한다. 다음에 LPG가스 가열식으로 된 혼합기(mixer)에서 혼합한 후 수분 함유율을 10% 내외로 조정하기 위하여 살수후 저장실에 저장한다. 저장된 원료탄을 conveyor belt를 통해 상하운동을 하는 성형기계(press)에 운반하여  $80 \sim 100 \text{kg/cm}^2$  정도의 압력으로 성형하여 가정용 연탄을 생산한다.

시료채취기간은 1991년 7월부터 1991년 9월까지 매월 3회씩 실시하였으며, 시료 채취기간중 기상현황은 Table 1과 같다.

Table 1. Ambient air conditions during the sampling period(1991)

Date	Time (hour)	Temp. (°C)	R.H. (%)*	W.S. (m/s)**	Wind direction
		Ave. (Max. -Min.)	Ave.	Ave.	
7.24	10:00~16:30	27.4(18.4~29.2)	82	3.7	SE
7.25	10:30~17:00	26.2(20.2~28.0)	84	7.9	SW
7.26	10:15~16:30	29.0(20.5~31.2)	78	6.2	SWE
8.22	10:00~15:30	28.8(22.2~30.3)	80	2.8	SSE
8.23	09:30~16:00	27.5(24.2~29.2)	78	3.0	WNW
8.25	10:00~16:00	30.2(22.4~31.4)	77	2.9	SW
9.11	10:30~16:30	29.1(20.6~29.3)	73	3.1	SE
9.12	10:00~15:30	29.0(21.4~29.5)	80	6.2	SWE
9.13	10:30~17:00	26.5(21.2~27.4)	77	3.6	NE

\* Relative humidity(%)

\*\* Wind speed(m/s)

## 2. 실험방법

### 1) 호흡성분진 및 총부유분진의 측정

석탄분진의 폭로농도를 조사하기 위하여 personal air sampler(MSA사제, Model Flow-Lite Pro)를 각각 1대씩 근로자의 호흡영역에 부착하여 2l/min 유속으로 작업시간 동안에 연속적으로 포집한 후 Filter Holder의 양쪽 구멍을 마개로 봉하여 실험실로 운반하였다. 총부유분진의 포집에는 glass fiber filter(Gelman사제,  $\phi=37\text{mm}$ )가 장착된 3단 holder를 사용하였고, 호흡성 분진의 측정에는 직경이 37mm인 mixed cellulose ester membrane filter(Gelman사제, 0.45 $\mu\text{m}$  pore size)가 장착된 2단 holder를 직경이 10mm인 nylon cyclone에 부착하여 사용하였다.

총부유분진 및 호흡성분진의 농도는 여지를 포집전후에 50% 항습이 유지된 데시케이터에서 24시간 이상 건조시킨 후 0.01mg까지 판독이 가능한 직시천평(Presisa사제, Model 40-SM-200A)으로 칭량하여 포집전후의 여지의 무게 차이에 의하여 각각 구하였다.

### 2) 부유분진의 입경분포별 측정

옥내 작업장별 부유분진의 입경 분포를 파악하기 위하여 0~7단 포집용으로 membrane polytetra fluoro ethylene filter(MFS사제)와 back up 단으로 glass fiber filter(Toyo사제, QR100)가 장착된 andersen air sampler(日本高立利化사제, Model KA 200)를 사용하였다.

부유분진의 입경분포별 측정은 각 작업장마다 근로자의 작업에 방해를 주지 않도록 바닥으로부터 120~150cm의 높이에서 하였으며 28.3l/min(1 ft<sup>3</sup>/min)의 유속으로 근로자의 작업시간과 동일하게 하였다. 부유분진의 입경별 농도는 각 단별 여지를 포집전후에 50%항습이 유지된 데시케이터에서 24시간 이상 건조시킨 후 0.01mg까지 판독이 가능한 직시천평(Presisa사제, Model 40-SM-200A)으로 칭량하여 포집전후의 여지의 무게차이에 의하여 구하였다.

### 3) 호흡성분진중 금속성분의 농도측정

호흡성분진이 포집된 membrane filter를 NIO-SH법에<sup>7)</sup> 의해 전처리한후 원자흡광광도계(atomic absorption spectrophotometer, GBC 902)를 사용하여 우리나라의 석탄광에 많이 함유된 중금속 중 Cu, Pb 그리고 Fe 등을 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 호흡성분진 및 총부유분진의 농도

연탄제조공장의 각 작업장별 부유분진을 근로자의 호흡영역에서 personal air sampler로 포집하여 얻은 총부유분진 및 호흡성분진의 측정 결과를 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

작업장별 총부유분진의 기하평균농도는 분쇄실과 저장실이 각각 8.22mg/m<sup>3</sup>과 10.88mg/m<sup>3</sup>로서 허용농도(TLV)인 5mg/m<sup>3</sup>를 초과하였으나 기계실은 3.79mg/m<sup>3</sup>로서 허용농도 기준보다 낮았다.<sup>8)</sup>

호흡성분진의 기하평균농도는 분쇄실, 저장실 및 기계실이 각각 0.78mg/m<sup>3</sup>, 1.03mg/m<sup>3</sup> 및 0.55 mg/m<sup>3</sup>로서 3개 작업장이 모두 허용농도인 2mg/m<sup>3</sup>보다 낮은 농도를 나타내었다.

## 2. 부유분진의 입경분포별 농도

Table 4은 andersen air sampler에 의하여 석탄 부유분진의 입경별 농도를 측정 한 것이다. 이것은 1991년 7월부터 1991년 9월까지 월1회(3일/1회) 씩 3회에 걸쳐서 각 작업장별로 포집한 농도를 기하평균한 값이다.

측정기간중의 분진농도는 분쇄실, 저장실 및 기계실이 각각 6.2mg/m<sup>3</sup>, 9.6mg/m<sup>3</sup> 및 3.2mg/m<sup>3</sup> (평균 5.8mg/m<sup>3</sup>)를 나타내었다.

Fig. 2는 석탄부유분진의 각 작업장별 입경분포

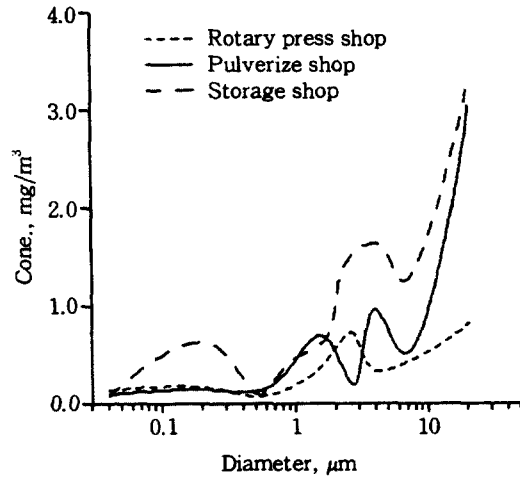


Fig. 2. Size distribution curve of airborne coal dust at each work site.

Table 2. Analytical results of total coal dust conc. at each work site

Work site	No. of sample	Total coal dust conc. (mg/m <sup>3</sup> )		
		GM*	Range	GSD**
Pulverize shop	9	8.22	2.64~19.18	1.48
Storage shop	8	10.88	2.33~33.01	1.45
Rotaty press shop	8	3.79	1.55~19.74	1.43

\* Geometric mean(mg/m<sup>3</sup>)

\*\* Geometric standard deviation(dimensionless)

Table 3. Analytical results of respirable coal dust conc. at each work site

Work site	No. of sample	Respirable coal dust conc. (mg/m <sup>3</sup> )		
		GM*	Range	GSD**
Pulverize shop	11	0.78	0.16~3.09	1.47
Storage shop	10	1.03	0.23~5.75	1.59
Rotaty press shop	9	0.55	0.17~0.95	1.27

\* Geometric mean(mg/m<sup>3</sup>)

\*\* Geometric standard deviation(dimensionless)

Table 4. Size distribution and concentration of coal dust

(Unit : mg/m<sup>3</sup>)

Stage No. size range work site	0 (30)~11	1 11~7.0	2 7.0~4.7	3 4.7~3.3	4 3.3~2.1	5 2.1~1.1	6 1.1~0.65	7 0.65~0.43	Backup 0.43~(0.08)	Total
Pulverize shop	3.049	0.574	0.963	0.193	0.695	0.349	0.141	0.143	0.101	6.208
Storage shop	3.366	1.308	1.643	1.528	0.625	0.410	0.096	0.590	0.072	9.638
Rotaty press shop	0.831	0.382	0.334	0.726	0.393	0.164	0.079	0.155	0.136	3.200
Average	2.043	1.037	0.951	0.598	0.485	0.286	0.102	0.235	0.100	5.837

를 나타낸 것으로 입경  $1\mu\text{m}$  이하의 미세입자층의 peak가 기계실이나 분쇄실에서보다 저장실에서 크게 나타나 저장실이 다른 두 작업장보다 입경  $1\mu\text{m}$  이하의 미세입자의 기여가 컸음을 보여주고 있다.

또한 각 작업장별 입경분포를 비교·평가하기 위하여 Fig. 3에 입경의 누적분포(cumulative distribution)를 나타내었다. Fig. 3에서와 같이 기계실과 저장실의 50% cutoff경(포집효율이 50%인 입경)은  $5.0\mu\text{m}$ 와  $6.8\mu\text{m}$ 부근인데 반하여 분쇄실의 50% cutoff경은  $13.0\mu\text{m}$ 로 기계실과 분쇄실보다 상당히 크게 나타났다. 즉 기계실과 저장실에 폭로되는 부유분진은 기관지 침착성분진(중앙값:  $10\pm 1.0\mu\text{m}$ , 기하표준편차:  $1.5(\pm 0.01)$ )의 입경범위에 포함되는 반면에 분쇄실에서 폭로되

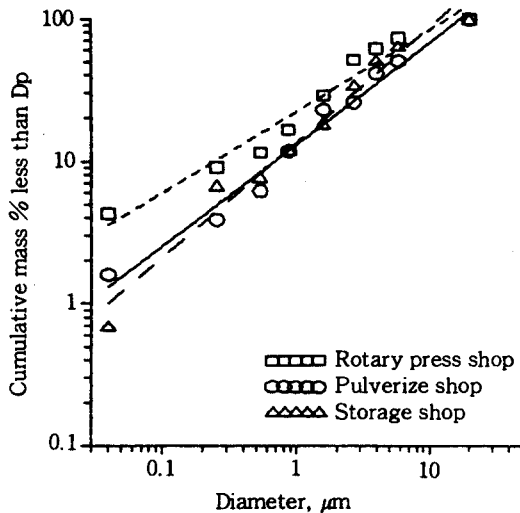


Fig. 3. Cumulative size distribution curve of airborne coal dust at each work site.

는 부유분진은 이보다 큰 입경범위를 가진다는 것을 알 수 있었다. 이것으로 부터 기계실과 저장실에서 발생하는 분진이 기관지 침착성 분진의 입경에 근접하므로써 폐포침착 가능성이 크므로 국소배기에 의한 분진발생의 억제가 가능한 것으로 판단된다.

### 3. 부유분진중 호흡성분진의 기여도

석탄부유분진의 입경별 농도로부터 호흡성분진의 기여도를 구하여 각 작업장별 진폐를 유발하는 분진의 잠재 유해도(potential hazard)를 추정하였다. Table 5는 Lodge(1986)의 방법을 사용하여 부유분진의 입경분포자료에서 부유분진중 호흡성분진이 기여하는 비율을 구한 것이다.<sup>9)</sup>

부유분진중 호흡성분진이 기여하는 정도는 분쇄실, 저장실 및 기계실이 각각 13.8%, 18.8% 및 26.2%로 기계실이 가장 높았다. 이것으로 부터 분쇄실, 저장실 그리고 기계실 순으로 진폐를 유발하는 분진의 잠재 유해도가 높을 것으로 추정된다.

### 4. 호흡성분진중의 중금속 농도

Table 6은 공기중의 호흡성분진이 포집된 membrane filter를 분석하여 얻은 중금속 농도를 나타낸 것이다. 각 작업장에서 분석한 Fe, Cu 및

Table 5. Respirable mass fraction of airborne coal dust at each work site

Work site	Respirable mass fraction (%)
Pulverize shop	13.8
Storage shop	18.8
Rotaty press shop	26.2

Table 6. Heavy metal conc. of respirable coal dust at each work site.

Work site	No. of sample	Pb	Cu	Fe
		GM*	GM*	GM*
Pulverize shop	11	0.0033	0.0084	0.0398
Storage shop	10	0.0038	0.0100	0.0172
Rotaty press shop	9	0.0049	0.0060	0.0391
Total	30	0.0039	0.0081	0.0280

\* Geometric mean( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

Pb의 기하평균농도 0.028mg/m<sup>3</sup>, 0.0081mg/m<sup>3</sup> 및 0.0039mg/m<sup>3</sup>로 Fe의 농도가 가장 높게 나타났으나 모두 허용기준(TLV: Pb=0.05mg/m<sup>3</sup>, Cu=1.0mg/m<sup>3</sup>, Fe=1.0mg/m<sup>3</sup>)을 초과하지 않았다.

#### IV. 결 론

연탄제조공장의 옥내 작업장에 따른 석탄부유분진의 폭로정도와 입경별 농도, 부유분진중 호흡성분진의 기여정도 및 호흡성분진중의 중금속농도에 대하여 1991년 7월24일부터 1991년 9월 13일 까지 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 총부유분진의 평균농도는 분쇄실, 저장실 및 기계실이 각각 8.22mg/m<sup>3</sup>, 10.88mg/m<sup>3</sup> 및 3.79mg/m<sup>3</sup>로서 저장실과 분쇄실이 허용농도를 초과하였다.

2. 호흡성분진의 평균농도는 분쇄실, 저장실 및 기계실이 각각 0.78mg/m<sup>3</sup>, 1.03mg/m<sup>3</sup> 및 0.55mg/m<sup>3</sup>로서 모두 허용기준보다 낮았다.

3. 분진의 50% cutoff경은 기계실과 저장실이 각각 5.0 $\mu$ m와 6.8 $\mu$ m로서 기관지 침착성 분진의 입경범위나 분쇄실의 50% cutoff경은 13.0 $\mu$ m로서 기관지 침착성분진의 입경보다 크게 나타났다.

4. 부유분진중 호흡성분진의 기여율은 기계실, 저장실 및 분쇄실이 각각 26.2%, 18.8% 및 13.8%로서 기계실이 가장 높았다. 이것으로 부터 분쇄실, 저장실 및 기계실의 순으로 진폐를 유발하는 분진의 잠재 유해도가 높을 것으로 추정된다.

5. 호흡성분진중 중금속의 농도는 Fe, Cu 및 Pb가 각각 0.028mg/m<sup>3</sup>, 0.0081mg/m<sup>3</sup> 및 0.0039mg/m<sup>3</sup>로서 모두 허용기준을 초과하지 않았다.

#### 참 고 문 헌

- 1) 대한광업진흥공사: 규폐 및 탄폐 예방에 관한 환경개선 기술연구, 1~2, 1989.
- 2) ACGIH: Threshold limit values and biological exposure indices for 1990~1991, Cincinnati, ACGIH, 45~46, 1990.
- 3) WHO: Evaluation of exposure to airborne particles on the work environment, Switzerland, WHO, 19~24, 1984.
- 4) Sweet Dvetal: The relationship of total dust, free silica, and trace metal concentrations to the occupational respiratory disease of bituminous coal miners, Am ind Hug Assoc., **35**, 479~488, 1974.
- 5) Rawat NS, Sinha JK, Sahoo B.: Atomic absorption spectrophotometric and X-ray studies of respirable dusts in indian coal miners, arch environ health, **37**, 32~35, 1982.
- 6) Masters. R. L.: Introduction to the scientific study of atmospheric pollution, B. M. McCormac(ed), D, Reidel dordrecht, holland, **101**, 1971.
- 7) Peter M. Eller, Ph. D. CHI Editor: NIOSH Manual of analytical methods third edition, 7300-1-3, 1984.
- 8) 노동부: 유해물질의 허용농도, 노동부고시 제 91-21호, 1991.
- 9) Lodge JP. Chan TL: Cascade impactor, sampling and date analysis, Akron, Am Ind Hyg Assoc., 39~61, 1986.