

연소장치를 이용한 소형 전기집진장치의 집진효율에 관한 연구

A Study on Collection Efficiency of Pilot Electrostatic Precipitator

한 재 균* · 최 금 찬**

*동아대학교 대학원 환경공학과

**동아대학교 환경공학과

(원고접수: 1993. 2. 18)

Jae-Kyun Han and Kum-Chan Choi

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Pusan, Korea

(Received 18 February 1993)

Abstract

Electrostatic Precipitator has been widely used to get high efficiency which is required for collection of fine particles. In order to provide collection efficiency and size distribution data for a pilot electrostatic precipitator, a pilot study has been conducted on fly ash from pulverized coal burning apparatus. The aims of this study are to investigate characteristics of electric charge, to measure collection efficiency varied with the applied voltage, to get an optimum current and current density.

Optimum current density was obtained to 0.7mA/cm² at the average electric field strength 2.33kV/cm in this experiment. Maximum particle collection efficiency was indicated 99.21% at the applied voltage 7kV. Finally, particle size distribution is also compared with photographic results. Both coarse and fine particles at the range of 0.5~2 μ m and 3~10 SEM μ m were clearly removed by increasing applied voltage.

1. 서 론

전기집진장치(Electrostatic Precipitator)는 미세 입자의 집진에 매우 유용하며 높은 집진효율의 장치로서 각광을 받고 있으나, 그 운전상의 관리나 유지에는 많은 어려움이 뒤따른다. 또한, 처리 대상의 배출원에 대한 정확한 정보가 부족함으로 그 적용이 제한되고 있으며 배출입자의 배출원에 대해서는 처리대상이 되는 입자의 전기저항성을 포함한 전기적 인 성질, 온도 등의 물리적 인자와 Conditioning Agents 와 같은 집진효율의 향상에 기여할 수 있는 인자들이 연구의 주된 대상이 되고 있다(S. Masuda, 1978).

전기집진기는 미세한 입자의 집진에 매우 효과적인 만큼 미세입자의 특성에 대해 사전 지식을 필요

로 하고 있다. 보통 미세입자는 호흡경로를 통하여 인체중에 유입되기 쉬우며, 호흡기에 대한 침착성의 정도는 유입된 입자의 크기에 매우 의존적이다. 최근에는 10 μ m 이하의 입자상물질(PM₁₀)에 대한 규제가 더욱 고조되고 있는 실정이다. 따라서, 대기오염 배출원에서는 배출허용농도만을 규제하는 것보다 배출입자의 유해성을 감안하여 미세입자에 대한 배출규제도 더욱 절실히 필요하다고 할 수 있다.

특히 연소시 발생하는 미세입자는 주로 유리탄소가 응결한 탄소성분이며, 검댕(Soot)은 0.005~0.2 μ m의 입경을 가지고 있다. 이들 검댕입자는 일단 대기중으로 배출되면 체류시간이 길고, 장기간에 걸쳐 폐나 기관지에 침착하여 건강에 미칠 수 있는 유해성은 크다고 할 수 있다.

화력발전소 등에서 사용되는 연료는 수입유연탄

으로 교체되어 왔으며, 수입탄 가운데 상당수가 회분중에 다량의 SiO_2 , Al_2O_3 가 함유되어 극히 높은 저항치를 나타내고 있어 집진효율 저하 및 운전상의 문제점의 발생 등 전기집진기의 집진효율향상에 저해요인으로 등장하게 되었다(Katz, 1980). 수입탄에 대한 전기집진기의 하전특성, 집진효율의 향상 방안 그리고 배출입자의 입경분포에 대한 연구 보고는 많지 않은 실정이며, 본 연구에서는 연소장치를 이용한 수입탄의 연소 후 배출입자의 발생과 하전특성 및 집진효율의 변화, 집진된 입자의 입경분포에 연구의 목표를 두었다.

2. 실험방법

2.1 실험장치의 구성

본 실험장치의 구성은 일정 미분탄이 주입될 수 있는 스크류식 미분탄공급부, 수입탄을 연소시켜 배출입자를 발생시키는 연소입자발생로(Dust genera-

tor), E. P.에 유입되는 가스의 흐름을 안정화시키기 위한 가스혼합챔버, 수직류 형태의 건식 전기집진기 및 송풍기로 구성되어 있으며, 전체공정도는 그림 1에 나타내었다. E. P.는 소형의 실린더형으로서 직경이 6.5cm이고, 길이는 85cm로 구성하였다.

미분탄공급은 Screw feeding방식으로 0.7~2.0g/min까지 조절하여 연소입자발생로에 정량공급하였다. 미분탄은 연탄제조시 혼합재료로 사용되는 수입탄을 구입하여 사용하였다. 이 수입탄은 80메쉬 체로 통과시켜 미분탄(Pulverized Coal)으로 제조한 후 연소실험을 위한 주입연료로서 사용하였다. 표 1은 수입탄에 대하여 ISO(International Standardization Organization)에 보고된 공업분석과 원소분석 자료이며 표 2는 회분분석 자료이다. 연소입자발생로에는 Screw feeding방식에 의해 상기의 미분탄이 정량주입되며, 로내부의 연소를 위한 열공급원 으로서는 발열체 저항이 $0.558\Omega/\text{m}$, $l=7.2\text{m}$ 인 용량 3KW의 Kantal선을 사용하여 제작하였다. 온도

Table 1. Results of Industrial Analysis and Ultimate Analysis for Coal.

Industrial Analysis(%)				Ultimate Analysis(%)—Dry Basis—				
Mois.	Ash	Volatile Fraction	Fixed Carbon	C	H	O	N	S
6.8	13.7	23.8	55.7	71.9	4.06	7.14	1.76	0.44

Table 2. Analysis Results of fly Ash.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	K_2O	Na_2O
50.5	33.56	3.19	4.89	1.29	2.16	0.56	0.18

AN : Andersen sampler E. P. : Electrostatic precipitator
 SF : Fuel Coal Feeder F : Rotameter
 DG : Dust generator D : Damper S : Sampler
 MC : Mixing chamber SP : Suction pump

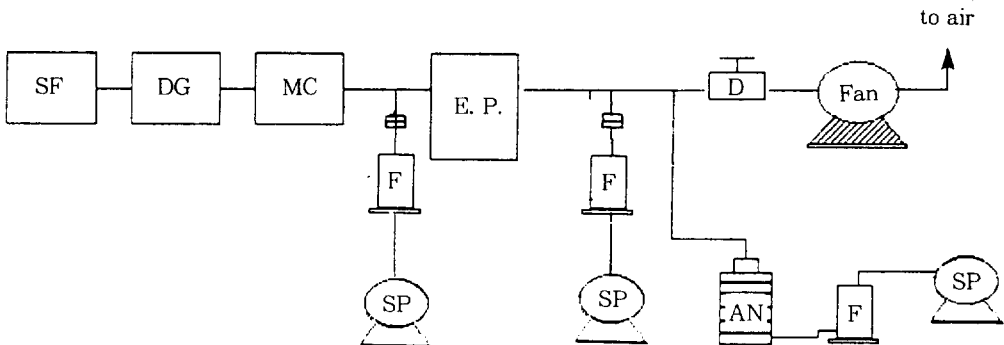


Fig. 1. Experimental apparatus for measuring collecting efficiency and size distribution.

조절은 0℃~1200℃ 범위에서 CA용 열전대를 이용하여 실험에 필요한 적정온도가 유지되도록 조절하였다. 그림 2는 본 실험에 사용된 1단식, 전식전기집진기를 나타낸 것으로 형태는 Wire-Cylinder Type이며, D. C 전압을 제어하는 방식은 고전압트랜스를 사용한 Single-Phase Rectification 을 사용하였다.

2.2 측정의 개요

본 실험의 배출입자의 발생농도, 집진효율, 입경분포, 고전압·전류 등을 측정하기 위하여 연소입자 발생로의 작동조건과 전기집진기 내의 실험운전조건 등을 정하고 실험중에는 최대한 같은 실험조건이 유지되도록 주의하였다.

1) 배출입자농도 측정

집진효율 측정에 앞서 전기집진기에 주입되는 배출입자의 부하량을 일정하게 하기 위하여 연소입자 발생로에서 발생하는 배출입자량을 연소온도 400℃, 500℃, 600℃와 미분탄주입량 2~6g/min으로 구분하여 측정하였다. 배출입자의 발생농도 측정에

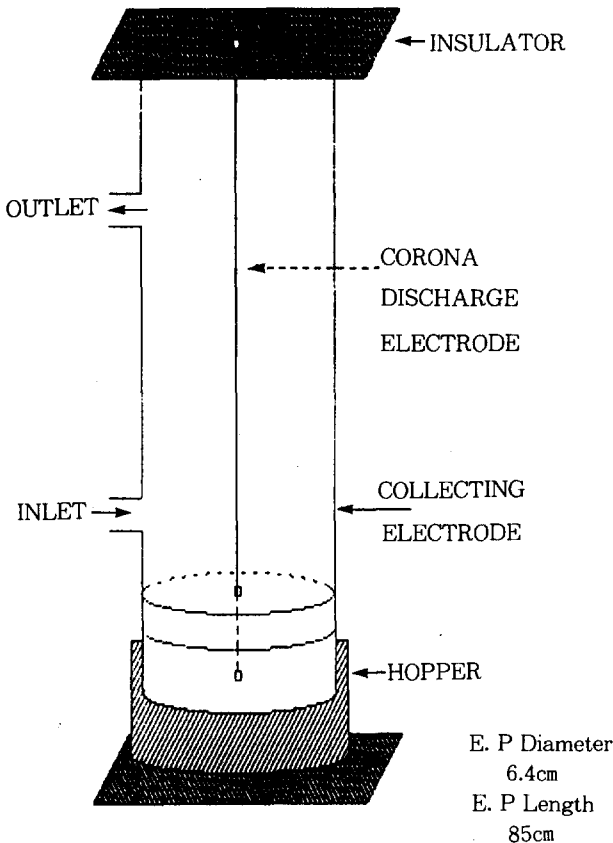


Fig. 2. Schematic diagram of pilot electrostatic precipitator

영향을 미칠 수 있는 연소공기량, 흡인량, 여지조건은 동일하게 하여 측정하였다.

2) 집진효율 측정

집진효율 측정은 한국공업규격(KS) 중 배기가스 중의 배출입자농도의 측정방법(KS M 2105)과 집진장치의 성능측정방법(KS B 6101)에 따랐으며, 여과지는 지름 32mm 유리섬유필터를 사용하였다. 필터홀더는 자체 제작하여 사용하였으며, 가스흐름을 일정하게 유지시키기 위하여 흡인지점 앞에 다공성 정류판을 설치하였고, 여과지는 측정 전후에 데시케이터에서 24시간 방냉하여 칭량하였다.

3) 입경분포 측정

연소입자발생로에서 발생한 배출입자의 부하전압에 따른 입경분포 특성을 측정하고자 Andersen Low-Volume Air Sampler(Kanomax사제, Model 3351)를 전기집진기의 출구부에 설치하고 흡인유량을 28.3ℓ/min으로 하여 배출입자를 채취하였다. 배출입자의 사진촬영을 위해 전기집진기의 출구부에서 샘플러를 통해 채취된 입자를 SEM사진 촬영용 분석시료로 하였다.

4) 전압·전류측정

전기집진기에 부하된 전압은 고전압 Probe(FLUKE사제)와 디지털식 멀티미터(FLUKE사제)를 사용하여 측정하였으며, 코로나 전류는 전류계(Light Star사제)를 사용하여 측정하였다(측정정도는 전압 0.001kV, 전류 0.2mA).

3. 결과 및 고찰

3.1 연소 후 배출입자의 발생

소형전기집진장치에 공급될 배출입자를 발생하기 위하여 연소입자발생로를 사용하여 정량공급에 따른 입자발생농도를 측정하였다. 그림 3은 연소실에 주입되는 미분탄의 공급량에 대한 배출입자의 발생농도를 온도변수로 하여 나타낸 것으로서 배출입자의 발생농도는 전체적으로 미분탄공급량이 증가함에 따라 높게 나타났다. 단, 미분탄량을 일정량이상으로 주입하였을 경우에는 공급량이 커져서 연소효율이 감소하므로 발생하는 배출입자는 낮아졌다. 본 실험에서는 주변분위기가온도가 500℃ 이상에서 연소가 일어남을 확인할 수 있었고(석탄의 일반적 발화온도는 400~500℃임), 온도상승에 따라 연소가 활발히 진행되므로 입자발생농도도 증가함을 알 수 있었다.

배출입자의 최대발생농도는 연소온도 600℃에서는 공급량 5g/min에서, 500℃와 400℃에서는 공급량 4g/min에서 각각 발생되었다. 단 400℃의 온도

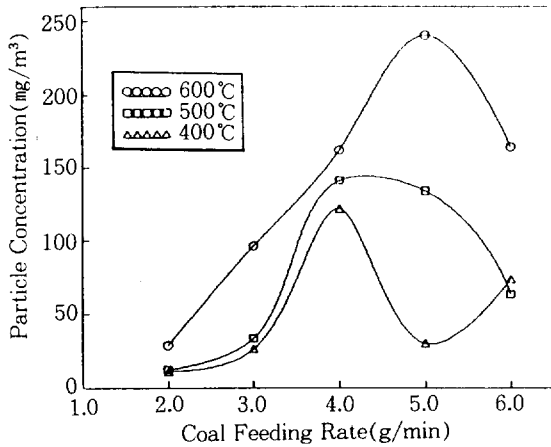


Fig. 3. Particle Concentration with Feeding Rate.

하에서 4g/min 이상 미분탄을 공급하였을 때 농도가 변동하는 경향을 보였는데 이것은 발화온도 이하에서 불완전 연소가 일어남을 확인하였고 입자의 발생도 안정되지 못한 때문으로 추측된다.

이상의 각각의 온도에서 배출입자의 발생실험을 실시한 결과를 살펴보면, 연소온도가 높고, 미분탄 공급량이 클수록 배출입자의 발생량은 증가하는 경향을 나타내었으며, 미분탄공급량이 적은 4g/min 전후에서 안정된 연소상태가 유지되었고 그 이상의 공급에서는 오히려 연소효율이 떨어져 농도는 변동하거나 감소하는 경향을 보였다.

3.2 전기집진기의 하전특성

일반적으로 전기집진에서 전압에 따른 전류의 값은 방전극의 모양, 비산재의 전기저항, 배가스의 온도, 집진극과 방전극에 부착된 입자층의 상태, 전기집진기내의 Fly Ash양에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다(Hao, He and Chao,1990). 그림 4에는 부하전압과 코로나 전류와의 특성(V-I특성)을 배출입자의 부하량의 변화에 따라 나타내었다. 부하전압은 1kV에서 7kV까지이며, 배출입자의 부하량은 0.5g/min에서 2.0g/min까지 4단계로 구분하여 측정된 결과이다. 그림 4에서 나타난 것처럼 본 실험의 전압-전류특성은 7kV로 증가시켰을 때까지 역코로나의 형성없이 전압증가에 따라 안정하게 전류가 증가하였으며, 전류치는 0.1mA에서 1.2mA까지 변화하였다. 미분탄주입량에 따른 전류-전압변동은 0.5mg/min로 공급하였을 때에 동일전압에서도 높은 전류치를 나타내었으며, 역으로 공급량이 2.0mg/min로 공급하였을 때에 낮은 전류치를 나타내었다. 부하전압은 4kV에서부터 급격히 증가하는 임계

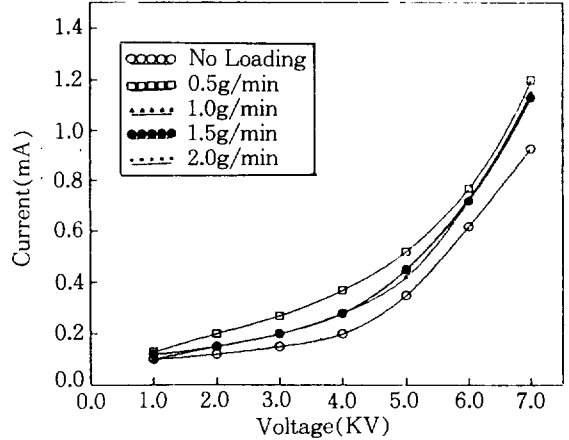


Fig. 4. Comparison of current with voltage.

점을 나타내었으며, 코로나 발생전압의 이론적인 계산결과 6.81kV로 나타났고, 실제 측정시에 이 전압 부근에서 목측에 의한 코로나의 발생을 관찰하였다. 그림 4의 결과에서 알 수 있듯이 동일전압하에서 주입미분탄량이 증가할수록 코로나 전류가 저하하는 경향이 나타났는데, 이는 공간에 분산된 Fly Ash의 증가로 인해 전기저항이 높아져 코로나 전류의 흐름이 방해를 받기 때문으로 보인다. Altman (1988)의 보고에 의하면 역코로나가 형성되었을 때 전압-전류곡선은 급격히 증가한다고 하였고, 반면 정상상태에서는 일반적으로 전압증가에 따라 전류도 비례적으로 증가한다고 하였다. 본 실험에서의 전압-전류곡선은 역코로나의 형성전까지 단계를 나타내며, 전압의 증가에 따라 역코로나의 형성없이 안정하게 전류가 증가하였고 집진효율도 증대됨을 보여주었다.

전압-전류밀도(V-J)특성을 연구한 Goard(1978)의 논문에서 지적된 바와 같이, 역전리 형성시 전류밀도는 급격히 증가하나 부수적으로 불평등전계를 파괴하므로 역전리에서는 집진효율이 감소한다고 보고하고 있다. 그러므로, 역전리가 일어나지 않는 최적의 전류밀도를 집진기에 유입되는 처리가스량에 따라 유지할 필요성이 있다. 그림 5는 전압과 전류밀도와의 특성을 배출입자의 부하량을 변화시킴으로써 최적부하 조건을 찾아내기 위하여 단계별의 전류밀도를 구하였다. 평균 전계강도(E)가 6kV/cm일 때 공업용 ESP에서의 전류밀도(J)는 0.2 mA/m² 정도로 보고하고 있으며(문재덕,1984), 본 실험의 하전특성에서는 E=2.33kV/cm일때 0.7mA/m²로 구해졌다. 또한 미분탄부하량이 증가함에 따라 전압-전류곡선은 감소하는 경향을 나타내었는데,

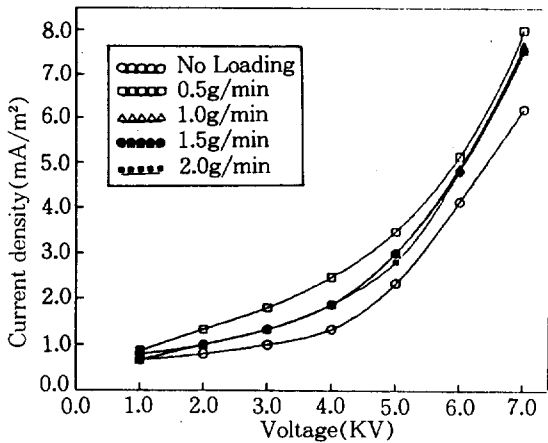


Fig. 5. Comparison of current density with voltage.

이것은 방전극에 부착한 배출입자에 의해 전기저항이 높아져 코로나 발생량이 저하되었기 때문이다.

3.3 집진효율 특성

가. 부하전압 변동에 따른 집진효율

그림 6은 온도 600°C, 총 미분탄주입량 8g/min의 조건하에서 부하전압의 변동에 따른 집진효율을 나타내었다. 그림 6에서 집진효율은 최대 부하전압 7kV까지 전압증가에 따라 87%에서 99%까지 계속 증가함을 알 수 있으며, 부하전압 2.5kV를 경계로 2.5kV 이하에서는 집진효율이 부하전압에 따라 급격히 증가하나 그 이상에서는 집진효율의 변화가 완만하게 증가함을 알 수 있다. 따라서, 부하전압

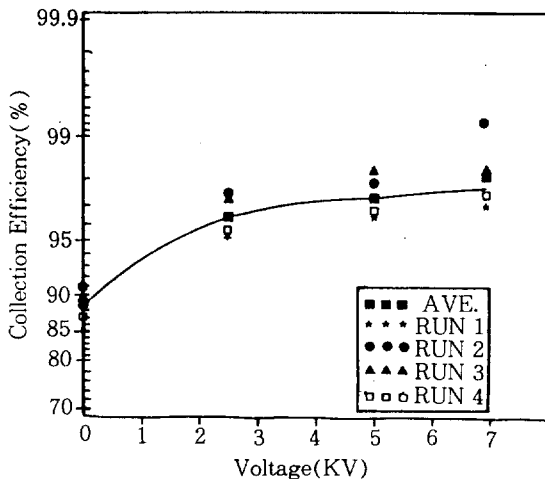


Fig. 6. Comparison of efficiency with charging voltage.

2.5kV 이하의 영역에서는 전압증가에 따라 하전 이온량이 급격히 증가하는 반면에 그 이상의 영역에서는 전압증가에 따라 하전 이온량이 완만하게 증가함을 알 수 있었다.

나. 전류와 전류밀도 변동에 따른 집진효율

그림 7은 연소온도 600°C, 총미분탄주입량 8g/min의 조건하에서 전류와 전류밀도변동에 따른 집진효율을 나타내는데, 전류의 세기가 증가함에 따라 집진효율이 계속 상승하고 있으며, 0.3mA를 경계로 집진효율은 완만하게 증가한다. 이것은 전압에 따른 효율특성과 같이 0.3mA 이하에서는 하전이온량의 부족으로 입자제거율이 낮은 것으로 판단된다. 전류밀도에 따른 집진효율을 보면 재비산이 많이 일어나는 fly ash 입자의 경우에, 본 실험에서는 $E = 2.33 \text{ kV/cm}$, 전류밀도 $J = 0.7 \text{ mA/m}^2$ 에서 재비산 없이 비산재를 평균 95% (93-99%)까지 처리할 수 있었다.

3.4 배출입자의 입경분포특성

배출입자의 집진효율은 입자의 입경분포에 따라 달라지며, 그 입자는 고유의 입경분포를 가진다. 이 입경분포에 따라 동일 전계영역에서 입자는 서로 다른 이동속도를 가지고 집진되며(Heinrich, 1961), 입경이 작은 입자의 경우에는 하전량이 적고 큰 입자에 비해 이동속도가 작아 미세입자의 제거효율은 저하된다. 본 실험에서는 미세입자의 제거효율을 평가하는 방법으로 부하전압의 변화에 따른 출구측의

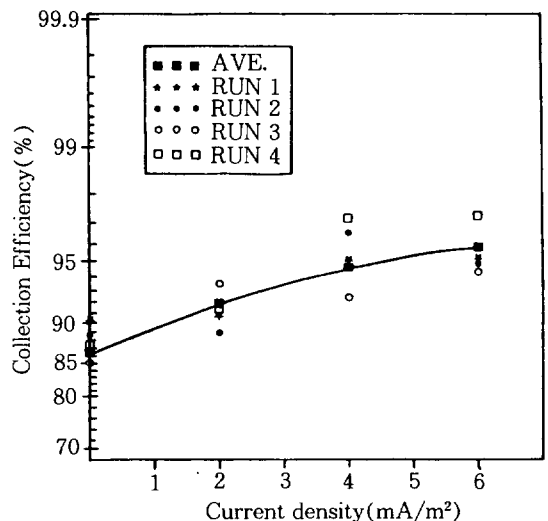


Fig. 7. Comparison of efficiency with current density.

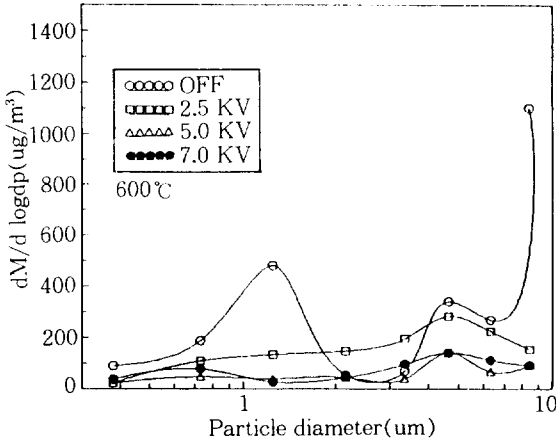


Fig. 8. Comparison of size distribution with charging voltage.

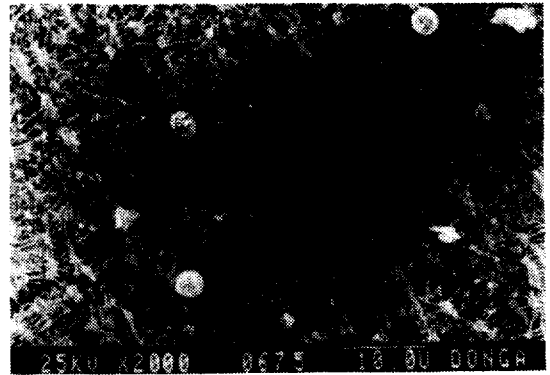
입경분포를 조사하기 위하여 Andersen Low-Vol-ume Air Sampler을 설치하여 측정하였다.

그림 8은 부하전압을 무부하, 2.5kV, 5.0kV, 7.5kV의 4단계로 나누어 부하전압에 따른 출구측의 배출입자의 입경분포를 표시한 것이다. 그림에서 나타난 것처럼 하전을 부하하지 않았을 때에는 1 μ m 부근의 미세입자와 5 μ m 이상의 조대입자가 많이 나타나, 이들 입자들이 전기집진기에서 제거되지 않았음을 알 수 있었다. 부하전압을 2.5kV, 5.0kV, 7.5kV로 증가시키에 따라 입자의 제거효율은 높아져 미세, 조대입자 모두 낮게 나타남을 보여주고 있다. 여기서, 1 μ m이하의 입자들은 연소과정을 통해 대부분이 생성된 것이고, 조대영역에서는 5 μ m 부근의 큰 입자가 나타나는데, 이들 조대입자들은 주로 잔류 ash의 존재로 알려져 있으며, 불완전 연소영역에서 생긴 탄소입자의 형태가 soot로서 발생한 것으로 생각된다(조정구,1990). 부하전압이 증가함에 따라 이들 1 μ m 이하와 5 μ m 부근의 입자들은 제거되기 시작하여 부하전압이 최대가 되는 7kV에서는 입자가 거의 완전히 제거되어 그림 6의 결과와 동일하게 집진효율이 최대가 됨을 뒷받침 해 주고 있다.

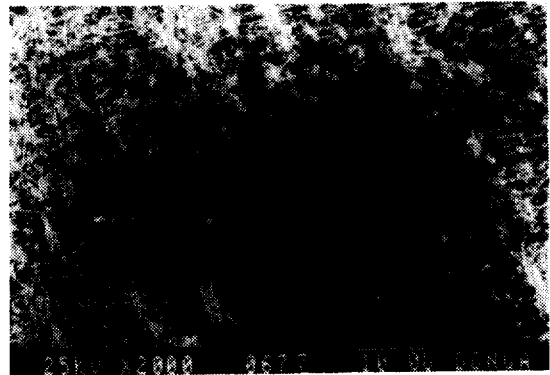
한편, 사진 1은 본실험에서 부하전압에 따른 입자의 성장 및 입경변화를 명확하게 식별하기 위해 SEM사진을 통하여 관찰한 것이며, 사진촬영과 동일하게 부하전압을 무부하, 2.5kV, 5.0kV로 구분하여 집진장치를 통과하는 연소입자를 Filter에 포집하여 촬영하였다. 사진에서 나타나듯이 무부하시에는 미세입자와 부정형의 조대입자(Coarse particles)가 많이 나타나고 있으나 하전전압을 2.5kV,



(a)



(b)



(c)

사진 1. Photography of efficiency with charging voltage.

(a) Charging off (b) 2.5kV (c) 5Kv

5.0kV로 증가시킬수록 여지 상에는 입자를 거의 찾아볼 수 없었으며, 이는 부하전압이 증가할수록 집진효율이 증가함을 의미한다.

4. 결 론

연소장치를 이용한 전기집진기의 집진효율 및 입경분포특성에 관한 연구에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 연소 후 배출입자의 발생량은 미분탄부하량과 연소온도가 증가함에 따라 증가하였으며, 연소온도에 따른 최적 미분탄부하량은 400℃와 500℃에서 4g/min, 600℃에서 5g/min으로 나타났다.

2) 전류와 전류밀도는 하전특성실험결과, 전압이 증가함에 따라, 그리고 미분탄부하량이 감소함에 따라 증가하였고, 부하전압 2.5kV 이상에서는 전류 및 전류밀도의 값이 급격히 증가하였다.

3) 배출입자의 집진효율은 부하전압이 증가함에 따라 증가하였으며, 87%에서 최대 99%까지 계속 증가되었다. 특히, 부하전압 2.5kV 이상에서는 평균 95%의 집진효율을 얻었다.

4) 전류, 전류밀도는 각각 0.9mA, 6mA/m²에서 최대의 집진효율을 나타내었으며, 최대부하전압 7kV에서 집진효율은 99.2%로 측정되었다.

5) 입경분포에 관한 실험에서, 부하전압이 높을수록 미세입자와 조대입자의 제거효율은 높았으며, 특히 부하전압 5.0kV에서 1 μ m 이상의 입자는 대부분이 제거됨이 SEM 사진촬영결과 확인되었다.

〈감 사〉

본 연구는 1992년도 동아대학교 환경문제연구소 학술연구비에 의해 연구된 것임.

참 고 문 헌

- 문재덕 (1984) 디-젤배진용 전기집진장치의 성능향상을 위한 강력 전치하전장치의 개발, 전기학회논문지, 33(6), 223.
- 조정구 (1990) Diesel 자동차 배출입자의 배출특성 및 성상에 관한 연구, 동아대학교산업대학원 공학석사 학위논문.
- Altman Ralph F. (1988) ESP Performance with Atmospheric Fluidized-Bed Combustion, J. Air Poll. Cont. Assoc., Vol. 38(11), 1455-1458.
- Goard, P. R. C. et al (1978) Operational Resistivity Measurements on Freshly Generated Fly-Ashes, CSIRO Electrostatic precipitation, August.
- Hao, J., K. He and H. Chao (1990) Calculation of Electric Field Strength Distributions for New Electrostatic Precipitator Discharge Electrode Designs, J. Air Waste Manage. Assoc., Vol. 40(11)1510-1513.
- Katz, J. (1980) Factors Affecting Resistivity in Electrostatic Precipitation, J. Air Poll. Cont. Assoc., Vol. 30(1), 195-201.
- Masuda, S. (1978) Effect of gas composition on sparking characteristics of back discharge, CSIRO Conference on Electrostatic Precipitation, Paper No. 5.