

전기 집진기의 집진 효율 향상에 관한 연구

안국찬[†] · 김봉환* · 이광석**

진주산업대학교 기계설계공학과 · *양산대학 기계설비과 · **진주산업대학교 전자공학과
(2002. 7. 2. 접수 / 2002. 10. 1. 채택)

The Improvement of Collection Efficiency of Electrostatic Precipitator

Kook-Chan Ahn[†] · Bong-Hwan Kim* · Gwang-Seok Lee**

Department of Mechanical Design Engineering, Jinju National University

*Department of Air Conditioning, Refrigerating & Sanitary Systems, Yangsan College

**Department of Electronic Engineering, Jinju National University

(Received July 2, 2002 / Accepted October 1, 2002)

Abstract : This paper demonstrates the effects of dust electrical resistivity on electrostatic precipitability. The effects of gas temperature, velocity and humidity on the collection efficiency were considered by used of coal fly ashes from fluidized bed combustion boiler. The experiments for collection efficiency were carried out in the pilot plant. The ashes which have non-spherical geometry and high electrical resistivity were used. Electrical resistivity is an important property for the collection efficiency in the electrostatic precipitators. Fly ash resistivity as a function of temperature up 350°C and water concentration(up to 15%) has been experimentally investigated using the resistivity test equipment consisted of the movable electrode, dust cup, and furnace. As the resistivity of fly ash in the operating temperature(150°C) of an electrostatic precipitator was measured higher than $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$, flue gas conditioning in the electrostatic precipitator to reduce the resistivity of fly ash is required.

Key Words : dust resistivity, electrostatic precipitator, collection efficiency, fly ashes, water concentration

1. 서 론

산업과정에서 발생하는 분진의 제거를 위해서 적은 압력손실과 대용량, 높은 집진 효율 등의 장점 때문에 전기 집진기가 널리 사용된다. 전기 집진 과정에서 분진을 함유한 배출가스는 집진판과 방전극 사이를 통과하며, 이 때 분진 입자는 코로나 방전에 의해서 발생한 이온에 의해서 전기적으로 대전된다. 전하를 띠게된 분진은 정전기력에 의해서 집진판으로 이동하여 집진이 이루어진다¹⁾. 집진된 분진 입자가 배출될 때까지 집진판에 분진 층을 이루게 되면 분진 층의 전기 저항으로 인하여 전압강하가 발생하여 방전극과 집진극 사이의 전계의 상태에 영향을 준다. 분진 층의 전압강하가 크면 동일인가전압에서 운전되는 경우, 그 만큼의 유효전압(방전극과

집진극 사이의 공간 전압)이 작아져서 코로나 전류가 감소하고 집진 효율은 낮아진다²⁾.

일반적으로 분진 입자의 전기 비저항(electrical resistivity)이 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 이상이면 분진 층 내의 가스는 방전극의 코로나 방전 개시 전계 강도보다 훨씬 낮은 값에서 전리하기 시작하여 집진극에서 방전극으로 양이온이 방출되는 역전리(back corona) 현상이 일어난다. 이 상태에서는 양극간의 방전전류는 증가하지만 코로나 발생 개시전압이 낮아지고 양극으로부터의 이온에 의해 분진의 대전량이 증가되므로 집진 효율은 현저히 저하된다. 또한 역으로 분진의 전기 비저항이 너무 낮으면($10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 이하) 전계 내에서 대전된 분진 입자는 집진극에 도달하자마자 대전된 전하를 집진극으로 쉽게 방전하여 분진 입자가 집진극 표면에 퇴적될 수 있는 부착력(전기적 부착력)을 잃는다. 따라서 분진 입자는 다시 가스 흐름으로 유입되는 재비산 현상이 일어난다

[†]To whom correspondence should be addressed.
kcahn@jinju.ac.kr

다³⁾. 그러므로 높은 집진 효율을 얻기 위해서는 분진의 전기 비저항이 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 보다 높고 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ 보다 낮아야 한다. 만일 이 영역을 벗어날 경우에는 가스의 성분을 조절하여 분진의 전기 비저항을 제어한다. 본 연구에서는 분진의 물리적·화학적 성질이 분진의 전기 비저항에 미치는 영향을 고찰하고 고 비저항을 갖는 분진의 경우에 가스 성분의 조절을 통한 분진 비저항의 조정으로 집진 효율을 개선하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험장치

2.1.1. 분진 비저항 측정장치

분진 비저항의 정량적 값의 측정은 특별한 고전압 인가장치를 필요로 한다. Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에 사용된 분진 비저항 측정장치의 전체 구성도와 측정 셀을 나타낸다. 측정 셀은 측정할 분진을 컵에 담아서 고 전압을 가하면서 측정할 수 있도록 이동 가능한 전극으로 되어 있다. 이 장치는 JIS B 9915⁴⁾에 의해 제작되었으며 측정 셀은 주위온도가 350℃까지, 수분함량이 15 vol.% 까지 조절되는 가열로 내부에 위치해 있다. 분진층은 5mm 두께로 보통 고정되며 다음 식에 의해서 분진 비저항을 구한다.

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{l} \quad (1)$$

- 여기서, ρ : 분진의 비저항, $\Omega \cdot \text{cm}$
- V : 인가전압, V
- l : 분진층의 두께, cm
- S : 전극 면적, cm^2
- I : 전류, A

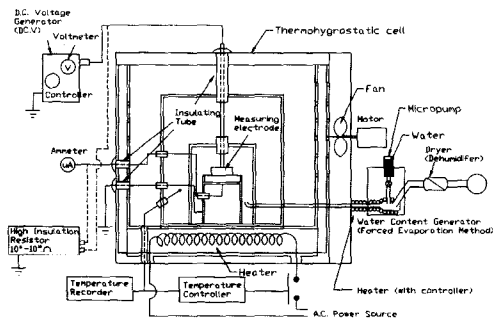


Fig. 1. Schematic diagram of dust resistivity measuring apparatus

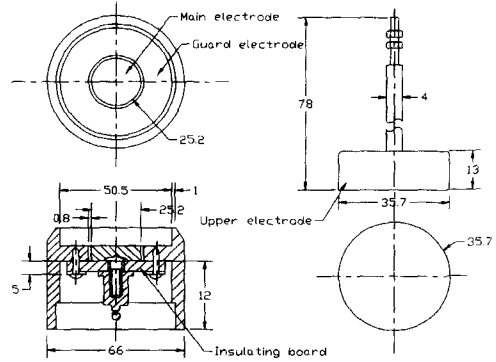


Fig. 2. Shape and dimensions of measuring electrodes (unit : mm)

Table 1. Test conditions of dust electric resistivity

항 목	측정 조건
온 도	100℃~350℃
가스 수분함량	0~15 vol.%
인가 전압	2 kV
분진 종류	유동층(Fluidized Bed) 석탄 연소에서 발생한 분진

분진 비저항의 측정조건은 Table 1과 같다.

2.1.2. 전기 집진 장치

분진의 비저항 특성 변화에 따른 전기 집진 효율을 평가하기 위해 파이롯 전기 집진기를 사용하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 실험설비로 길이 15m, 높이 4.3m의 2단 평행판 전기 집진기의 개략도이다. 전기 집진기의 자세한 사양은 Table 2에 나타나 있으며, 각 Field 당 집진판의 길이는 6.12m이고 높이는 1.33m이다. 가스 유동이 지나는 통로는 1개이며 집진판의 간격은 400mm이다. 전기 집진기의 전기적인 사양이 Table 3에 기술되어 있다.

2.2. 실험방법

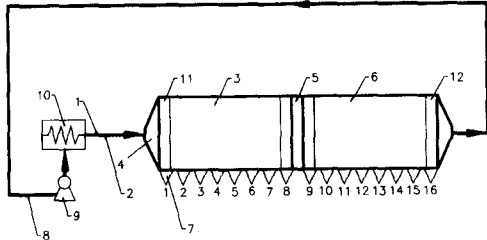
분진 비저항의 변화에 따른 집진 효율 특성을 규명하기 위해 Fig. 3과 같은 파이롯 전기 집진기를 사용하였다. 송풍기에 의해서 전기 집진기 내로 유입

Table 2. Electrostatic precipitator description

Type	Wire - Plate
Plate Height	1.33 m
Plate Length	6.12 m/field
Plate Spacing	400 mm
Number of Gas Passages	1
Number of Field	2
Number of Electric Sections	2
Nominal Flow Rate	15.96~79.8 m ³ /min
Total SCA	24.48~122.4

Table 3. Electrical specification of electrostatic precipitator

Secondary Voltage	105 KV
Secondary Current	200 mA
Electric Strength	5.25 KV/cm
Current Density	62.9 nA/cm ²
VarioPulse Frequency	83.8 ms



- 1. Ash Feeding System
- 2. Gas Conditioning System
- 3. 1st Field
- 4. Gas Distribution Wall
- 5. Transition Section
- 6. 2nd Field
- 7. Hopper
- 8. Opacimeter
- 9. Fan
- 10. Electric Heater
- 11., 12. Transformer-Rectifier

Fig. 3. Schematic diagram of pilot electrostatic precipitator

된 공기는 전기히터에 의해 계속적으로 가열이 되어 전기 집진기를 순환한다. 이 때의 유동 속도는 주파수 변환기(frequency inverter)로 송풍기의 회전수를 조절하여 설정한다. 전기 집진기를 지나는 가스의 온도는 피드백(feedback) 회로를 이용한 온도 조절기로 일정온도를 지속적으로 유지하도록 하였다. 유속과 온도가 설정된 후 자동분진투입장치로 일정 농도의 분진이 계속적으로 투입이 되고 일정 농도의 분진을 함유한 가열된 공기는 가스 분배판을 지나서 전기 집진기의 1st Field 과 2nd Field 의 코로나 영역을 지나면서 분진의 입자 대전과 집진이 동시에 이루어진다. 그리고 집진기의 출구 쪽의 분진 농도계(opacimeter)가 가스 속의 집진이 되지 않은 분진의 농도를 연속적으로 측정하여 집진 효율을 알 수 있다⁹⁾. 전기 집진기의 특성을 알아보기 위해서 전기 집진기 내부의 온도를 150℃까지, 평균 유속을 0.8~1.4 m/s, 그리고 투입 분진 농도를 0~30 g/Nm³ 사이의 조건에서 전류-전압 특성을 고찰하고 유동 가스의 속도와 온도 그리고 전압인가방식이 집진 효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 각 호퍼(hopper)와 집진판에서 집진된 분진의 양과 입도 분포분석을 통한 집진 특성에 대한 실험을 하였다. 입도 분포분석은 미국 Coulter 社의 LS130을 사용하였으며, 습식 원소분석법⁶⁾으로 분진의 원소분석을 하였다.

3. 결과 및 고찰

분진의 특성은 입경 크기분포, 농도, 형상 등을 나타내는 물리적인 특성, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃와 CaO 등의 화학적 특성, 그리고 분진의 비저항성을 나타내는 전기적 특성으로 크게 3가지로 분류할 수 있다. Fig. 4는 분진의 물리적인 특성을 알아보기 위하여 분진을 전자현미경(S.E.M.)으로 촬영한 사진(배율 1,000배)과 입경 분포를 나타낸 것으로 사용된 분진은 중국의 대동탄을 사용한 유동층 보일러에서 나온 것으로 1~300μm의 입도 분포를 가지며 질량평균 입도(MMD, Mass Mean Diameter)는 26μm이다. 분진의 형상은 불규칙하고 각이진 형태를 나타내며, 이러한 기하학적 형상은 같은 체적의 구형 형태의 분진에 비해 표면적이 큼으로 구형의 분진보다 대전량을 많이 갖게 되므로 전기집진에 유리하다. Fig. 5는 분진 입자의 입경의 크기에 따른 질량비를 나타낸 것으로 분진 입자의 입경의 크기가 전기집진 성능에 영향을 미치게 되는데 입경이 작을수록 대전량이 작으며 또한 가벼워서 재비산이 되기 쉬우므로 집진 성능이 떨어지게 된다⁷⁾. Table 4는 분진의 원소 조성을 나타내며 화학적 조성 중 K₂O, Na₂O, Fe₂O₃와 미연탄소는 분진의 비저항을 감소시키는 반면 SiO₂, Al₂O₃, CaO와 MgO는 증가시킨다.

Fig. 6은 가스의 온도와 수분함량의 변화에 따른 분진 비저항값을 나타낸다. 수분함량이 거의 없는 경우(H₂O=0%) 본 실험의 영역에서, 분진 비저항값이 역전리 현상이 쉽게 일어나는 10¹³Ω·cm 이상의 고 비저항인 것을 볼 수 있다. 수분함량이 증가하면

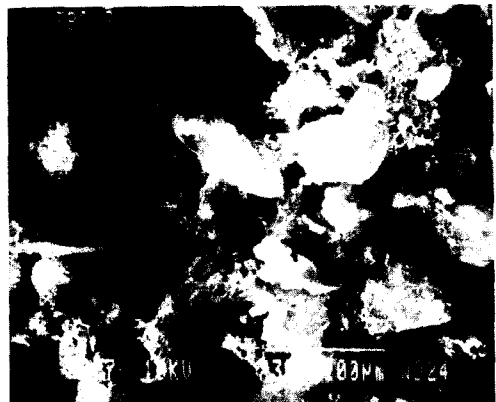
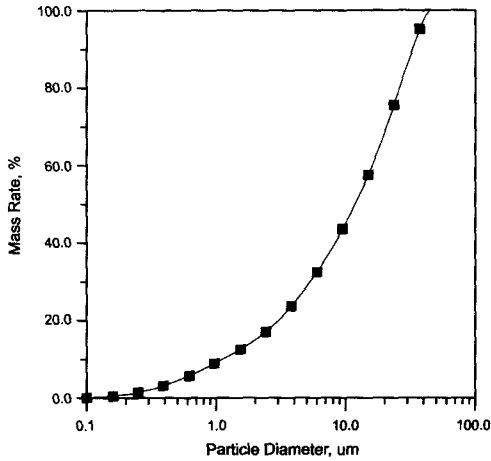


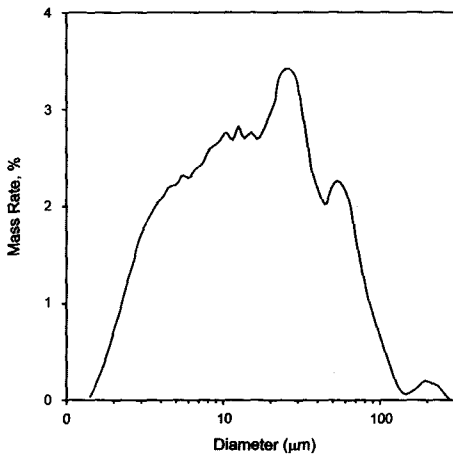
Fig. 4. Shape of fly ash from fluidized bed coal combustion

Table 4. Chemical composition of fly ash for test (dry base)

Species	WT%	Species	WT%
SiO ₂	36.98	V	-
Al ₂ O ₃	4.69	Ni	-
Fe ₂ O ₃	15.48	Pb	-
CaO	24.31	Cr	0.1
MgO	1.54	Cd	-
K ₂ O	0.84	C	8.73
Na ₂ O	0.67	S	3.39
TiO ₂	3.17		



(a) Cumulative



(b) Differential

Fig. 5. Size distribution of coal fly ash from fluidized bed coal combustion

Fig. 7에서 보는 바와 같이 분진의 비저항 값은 역전 리 현상이 일어나지 않는 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 까지 떨어짐을 확인하였으며, 따라서 수분함량이 분진의 비저항성을 결정하는 매우 중요한 인자임을 알 수 있다. Fig. 6에서 분진이 $150 \sim 200^\circ\text{C}$ 의 범위에서 비저항 값의 최고치를 나타내고 있음을 알 수 있다. 포물선 모양의 그래프에서 비저항 값의 최고치 온도를 중심으로 그 이하의 온도범위에서는 비저항 값은 주로 수분의 영향을 많이 받게 되고, 그 이상의 온도범위에서는 비저항 값이 온도가 높아짐에 의해 분진을 구성하고 있는 전자활동의 활성화에 기인하므로 주로 분진의 구성성분이 주요 변수가 된다⁸⁾. 자세히 살펴

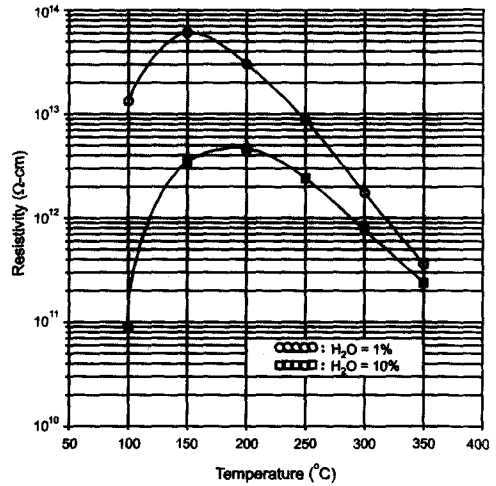


Fig. 6. Effects of temperature and humidity variation on dust resistivity

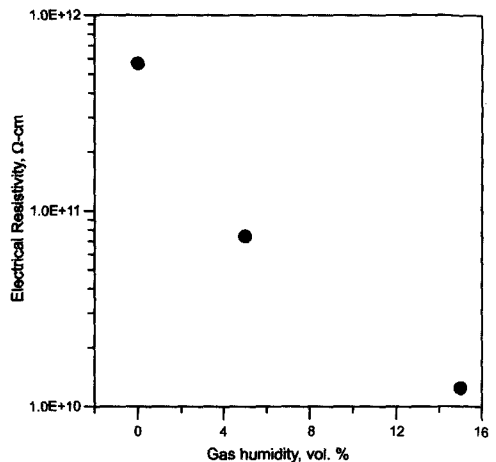


Fig. 7. Effects of humidity on dust resistivity

보면 온도의 영향은 일정한 온도이하에서 온도가 낮아질수록 가스의 상대습도가 높아져 입자표면에 수분의 응축으로 인해 전하의 전도도가 증가되어 전기적 비저항이 낮아지는 것이며 일정한 온도이상 이 되어도 비저항 값이 낮아짐을 알 수 있는데, 이는 고온에서 입자내의 분자가 활발히 운동함에 기 인한다. 대부분의 전기 집진기의 사용온도는 150℃ 정도이므로 국내 각종 석탄연소 분진의 비저항이 150℃에서 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 보다 큰 고 비저항 Fly ash로 서 전기집진시 역전리 현상으로 집진 효율이 저하 될 우려가 있다. 따라서 본 연구 결과로부터 고 비 저항 분진의 집진을 위해 가스 내에 수분을 공급하 여 집진 성능을 향상시킬 수 있다는 결론을 얻었다.

일반적으로 전기 집진기에서의 하전 특성은 코로 나가 발생하는 전압-전류 특성곡선을 통해서 알 수 있다. 전압-전류 특성곡선에 영향을 미치는 변수는 방전극의 구조, 집진판 간격, 크기 등의 기계적인 설계 조건과 가스 유동 속의 분진 농도, 가스 조성, 온도 및 압력, 집진판 위에 집진 된 분진층의 두께 등이 있다. 가스 유동 속의 입자상태도 전기적인 조 건에 영향을 주는 데 미세한 입자가 많고 분진 농도 가 높을수록 전류를 감소시킨다. Fig. 8은 가스 속 의 수분함량 변화에 따른 전압-전류 특성곡선을 나 타낸다. 가스 속에 수분함량이 0~5%인 경우에는 집진판에 분진층의 저항으로 인해서 일정 전압 이 상에서는 전압의 증가는 없고 전류만 급속히 증가 하는 것을 볼 수 있으며 이러한 조건에서 분진이 투 입되면 급격한 역전리 현상이 일어난다⁹⁾. 가스 속에 수분함량이 15% 이상인 경우에는 전압이 증가함에 따라 전류도 비례하여 완만하게 증가함을 나타내었 다. 따라서 가스 내 수분함량이 전압-전류 특성곡선 에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 수분 함량의 변화로 인해서 가스 물성치와 분진의 비저 항이 변하기 때문이다.

Fig. 9는 가스의 수분함량이 집진 효율에 미치는 영향을 나타낸다. 수분함량이 증가함에 따라 집진 효율이 개선된 것을 알 수 있는데 이는 수분함량이 증가함으로 극간의 전도성이 향상되어 분진의 비저 항이 감소한 결과이며 부수적으로 집진판에 쌓인 분진의 재비산이 감소한 결과이다^{10,11)}. 고 비저항 분진의 비저항의 제어대책으로서 연소가스 내에 적 정량의 수분을 공급하여 분진의 비저항 값을 낮추 며, 또한 분진의 응집성(cohesive property)을 변화시 켜서 집진을 용이하게 할 뿐만 아니라 재비산율

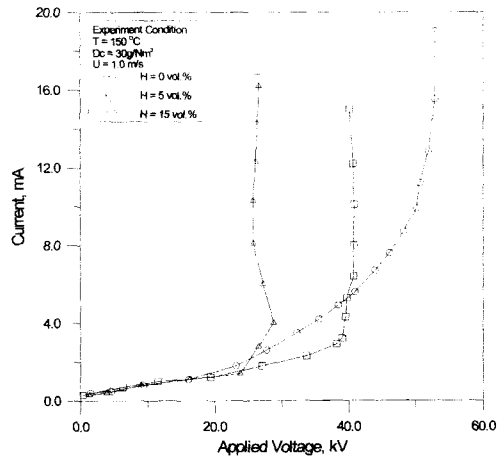


Fig. 8. Voltage-Current characteristic curves

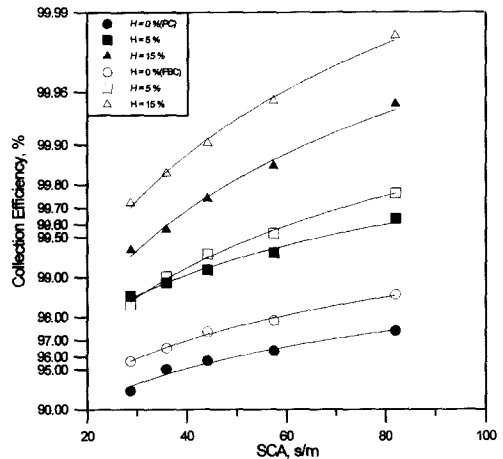


Fig. 9. Effects of gas humidity on collection efficiency (H=gas humidity)

감소시키고 공간 하전 이 개선된다. 따라서 전계 강도가 증가되고 역전리 현상을 방지함으로써 집진 성능이 향상되게 된다.

4. 결론

유동층 석탄 연소로에서 발생하는 분진의 비저항 성에 가장 크게 영향을 미치는 인자인 분진 내 수분 함량과 분위기 온도를 제어하면서 전기 집진 효율의 개선을 위한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분진의 온도가 150~200℃ 이하에서는 온도가 증가할수록 비저항 값은 증가하였으나, 이 온도가

상에서는 온도가 증가할수록 비저항 값은 감소하였으며 아울러 분진의 비저항 특성이 바뀌게 되는 임계 온도가 수분의 영향에 따라 점차 높아짐을 알 수 있었다.

2) 가스 수분함량이 증가함에 따라 분진 비저항이 감소하였으며 이로 인하여 전계 상태와 집진 효율이 개선되었다.

3) 국내 각종 석탄 연소 분진의 비저항 조절을 위한 가스 조절 매체(gas conditioning agents)로서 무화수(atomizing water)를 선택할 수 있었으며, 분진의 비저항의 감소뿐만 아니라 재비산을 감소시키고 공간하전을 개선시켜 전계 강도가 증가되어 역전리 현상을 방지할 수 있다.

감사의 글 : 본 연구는 한국과학재단 지정 진주 산업대학교 동물생명산업지역협력연구센터의 연구비 지원에 의한 것입니다.(과제번호 : R12-2002-053-02003-0)

참고문헌

- 1) White, H. J., "Chemical and Physical Particle Conductivity Factors in Electrostatic Precipitation", Chemical Engineering Progress, Vol. 52, No. 6, pp. 244-248, 1956.
- 2) Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., "Fundamentals of Air Pollution Engineering", Prentice Hall, 1988.
- 3) Sabert, O. J. and Nichols, G. B., "Electrostatic Precipitation", MARCEL DEKKER, INC., 1978.
- 4) Japanese Industrial Standard, "Measuring Methods for Dust Resistivity (with parallel electrodes)", JIS B 9915.
- 5) Bellagamba, B., Liberti, G., Riboldi, E., and Malagnini, G., "Engineering Aspects of a Pilot ESP Programme", Proc. of the 3rd Int. Conf. on Electrostatic Precipitation, 1987.
- 6) Korean Industrial Standards, "Chemical Analysis of Fire Brick", KS L 3120.
- 7) Lamb, A. N., "Variations in the Performance of Electrostatic Precipitators Collecting Fly Ash from Large Boilers", Proc. of the 2nd Int. Con. on Electrostatic Precipitation, 1984.
- 8) Bickelhaupt, R. E. and Sparks, L. E., "Fly Ash Resistivity Prediction Improvement with Emphasis on Sulfur Trioxide", Southern Research Inst., Birmingham, AL, PB86-178126, 1986.
- 9) Cooperman, G., "A New Current - Voltage Relation for Duct Precipitators Valid for Low and High Current Densities", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA - 17, No. 2, 1981.
- 10) Paulson, C. A. J. and Potter, E. C., "The Pilot Scale Approach to Assessing the Performance of Full - Scale Electrostatic Precipitators", 8th Australian Chem. Eng. Conf., Melbourne, Australia, August 24~27, pp. 75~79, 1980.
- 11) Potter, E. C., "Electrostatic Precipitation Technology : A Different Viewpoint", Air Pollution Control Association, Vol. 28, pp. 40~46, 1978.