

# 실내 분진의 비저항 특성에 따른 전기집진 효율에 대한 연구

정 성 일, 최 영 민, 안 영 철<sup>†</sup>, 이 재 근<sup>\*\*</sup>, 이 의 준<sup>\*\*\*</sup>, 강 은 철<sup>\*\*\*</sup>

부산대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>부산대학교 기계기술연구소, <sup>\*\*</sup>부산대학교 기계공학부, <sup>\*\*\*</sup>한국에너지기술연구소

## A Study on the Electrostatic Precipitation as a Function of Resistivity using various Indoor Dusts.

Seong-Ir Cheong, Young-Min Choi, Young-Chull Ahn<sup>†</sup>, Jea-Keun Lee<sup>\*\*</sup>, Eun-Chull Kang<sup>\*\*\*</sup>, Euy-Joon Lee<sup>\*\*\*</sup>

**ABSTRACT:** Electrical resistivity is an important property for the collection efficiency in the electrostatic precipitator. In this paper, electrical resistivities of tobacco dusts, yellow sand dusts and pine pollens are measured using a high voltage conductivity cell based on JIS B 9915. The resistivities of three kinds of indoor dusts are about  $1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$  in the normal range and dust collection efficiency using an electrostatic precipitator at the face velocity of 1.0 m/s shows over 99% for the three kinds of indoor dusts.

**Key words:** Indoor dust(실내분진), Resistivity(비저항), Electrostatic precipitator(전기집진기)

### 기 호 설 명

- $A_R$  : 이동전극의 단면적 [ $\text{cm}^2$ ]
- $A_p$  : 전기집진기 집진 면적 [ $\text{m}^2$ ]
- $D$  : 입자의 직경 [ $\mu\text{m}$ ]
- $E$  : 전기장 강도 [ $\text{V}/\text{cm}$ ]
- $I_R$  : 비저항 측정시의 전류 [ $\text{A}$ ]
- $J$  : 전하 밀도 [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]
- $R$  : 저항 [ $\Omega$ ]
- $L$  : 분진층의 두께 [ $\text{cm}$ ]
- $V_R$  : 비저항 측정시의 인가전압 [ $\text{V}$ ]
- $I_p$  : 코로나 전류 [ $\text{mA}$ ]
- $V_c$  : 전기집진기 방전부 인가전압 [ $\text{kV}$ ]
- $V_p$  : 전기집진기 집진부 인가전압 [ $\text{kV}$ ]

$\rho$  : 비저항 [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]

### 1. 서 론

에너지 절약의 필요성에 따라 실내 건물의 밀폐성이 더욱 강화되고 또한 인간의 주된 활동 범위가 실내로 집중되면서 실내 공기의 청정화와 쾌적한 환경조성에 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 실내 공기의 오염 물질을 효율적으로 제거해야 할 필요성이 부각되고 있다.

현재 일반 공조용으로 사용되고 있는 공기 청정 방식으로는 여과필터방식과 전기집진방식이 있다. 여과필터의 경우 설치가 간단하고 집진효율이 비교적 높지만 높은 압력손실에 의해 운전 및 유지비용의 증가, 소음, 진동 등의 문제가 발생할 수 있다. 이에 반해 전기집진식의 경우 낮은 압력손실 등 운전 및 유지비용 등 여러 관점에서 유리한 조건을 가지고 있다. 그러나 전기집진방식을 사용할 경우 분진의 특성에 따라 집진 성능이 크게 달라지므로 실내에 분포하는 주된

### 그리스 문자

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2492; fax: +82-51-582-6368

E-mail address: ycahn@pusan.ac.kr

분진의 특성에 대한 분석을 바탕으로 집진기를 설계해야 운전효율을 최적화 할 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 실내의 주된 오염원으로 볼 수 있는 황사, 담배입자, 송화 가루 분진에 대해 입경과 비저항(Resistivity)을 분석하였으며 이를 바탕으로 전기집진기의 특성을 분석하고자 하였다.

## 2. 실내분진의 특성과 집진 특성의 관계

전기집진 방식에 있어 입자 크기에 따라 입자의 대전 메커니즘이 달라지는데, 0.1  $\mu\text{m}$  이하 입자의 경우 주로 확산하전에 의해 대전되며, 1  $\mu\text{m}$  이상의 경우 전계하전에 의해 대전된다. 0.1~1  $\mu\text{m}$  범위 입자의 경우는 전계하전과 확산하전이 동시에 작용하지만 하전량에서 위의 두 경우보다 미비하여 전기집진방식의 집진기에서 가장 분진의 포집 효율이 낮은 영역이다<sup>(1)</sup>.

비저항의 경우, 전기집진기와 같이 입자의 전기적 성질을 이용한 집진장치에서 입자가 대전될 때, 분진이 갖는 전기적 저항성을 나타낸다. 즉 집진된 분진층 두께 1 cm, 단위면적 1  $\text{cm}^2$  내에 집진분진이 갖는 전기저항을 말하며, 단위는  $\Omega \cdot \text{cm}$ 로 표시된다. 비저항의 의미를 파악해 볼 때, 저항(Resistance)은 전류(Current), 전압(Voltage)과 같은 외부적 조건에 따라 가변되지만, 비저항은 재료 자체의 특성으로써 물질이 갖는 전도성을 나타내는 고유의 전기적 성질이다. 전기적 하전과 전기장에 의해 집진이 이루어지는 전기집진기에서는 비저항이 포집 효율에 크게 영향을 미치는 주요 변수이다<sup>(2)</sup>.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실내분진의 입도 및 형상 분석

실내 분진의 입도 분석은 습식 광산란 입도 분포 장치인 Malven사의 Mastersizer를 이용하여 측정하였다. 입자의 분산을 위해서 임펠러와 초음파를 작동시킨 상태에서 입도 분포를 측정하였으며 실내 분진의 형상을 분석하기 위하여 전자현미경(SEM) 분석을 실시하였다.

### 3.2 비저항 측정

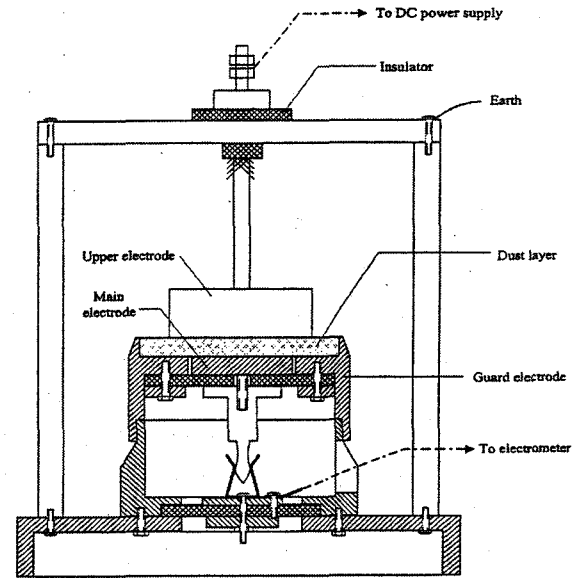


Fig. 1 Schematic diagram of the high voltage conductivity cell for measuring electrical resistivity of dust (JIS B 9915).

Fig. 1은 비저항 측정장치의 개략도로서, 본 연구에서는 JIS B 9915<sup>(3)</sup> 규격에 의해 제작된 비저항 측정기를 이용하여 전기적 비저항성을 측정하였다. 분진을 Dust Cup안에 넣고 상부 표면을 평평하게 한 후, 분진층(Dust Layer) 표면 위에 천천히 이동전극(Movable Electrode)을 얹는다. 그 후 전원공급기(Power Supply)로부터 천천히 전압을 인가시키면서, 전류계(Electrometer)에서 측정되는 전류를 기록하고 이때 인가된 전압과 측정된 전류값을 이용하여, 옴의 법칙과 비저항 계산공식으로부터 비저항을 계산하였다.

$$E = V_R / L \quad (1)$$

$$\rho = E / J \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 분진의 비저항( $\Omega \cdot \text{cm}$ )이고, E는 상부 이동 전극과 하부 접지전극 사이의 전기장 강도(V/cm)를 나타낸다. J는 전류밀도( $\text{A}/\text{cm}^2$ )로서 이동 전극의 단위 면적당 통과된 전류의 비로서 정의된다.

### 3.3 전기집진기 사양 및 포집 효율 측정

Table 1 Specifications of the 2 stage electrostatic precipitator used in this study.

Parameter		Specification
Corona Pre-charger (1st Stage)	Discharge Wire	Material : Stainless Steel(SUS304) Size : $\Phi 0.2 \times 800 \text{ mm} \times 14 \text{ ea}$ Applied Voltages( $V_c$ ) : 0 ~ 12 kV
	Grounded Plate	Material : Aluminum Size : 60 mm $\times$ 800 mm $\times$ 15ea Plate-to-plate Spacing : 45 mm
Dust Collector (2nd stage)	High Voltage Plate	Material : Aluminum Size : 600 mm $\times$ 800 mm $\times$ 15ea Plate-to-plate spacing : 42 mm Applied Voltage between Plates( $V_p$ ) : 6 kV
	Grounded Plate	Material : Aluminum Size : 600 mm $\times$ 800mm $\times$ 14ea Plate-to-plate Spacing : 42 mm

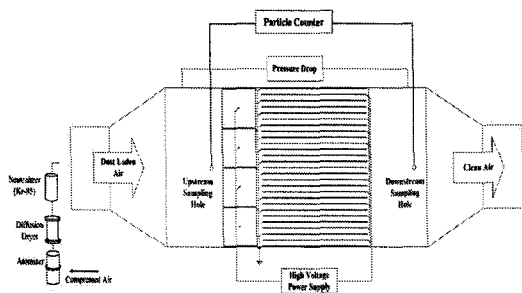


Fig. 2 Schematic diagram of the test system for measuring the removal efficiency of the 2 stage electrostatic precipitator.

전기집진기는 사용전압과 구조적인 차이에 따라 저전압 2단 전기집진기와 고전압 1단 전기집진기로 분류된다. 저전압 2단 전기집진기는 공기조화용 공기 청정기로 개발된 것으로 주로 미세분진을 제거하는데 사용되는 고효율 집진 방식이다<sup>(4)</sup>. 본 연구에서는 2단식 전기 집진기를 사용하여 다양한 실내 분진에 대한 포집 효율을 측정하였다.

Table 1은 실험에 사용한 전기 집진기의 주요 사양이다. 일반 공조용 전기집진기를 기준으로 처리 유량을 30 m<sup>3</sup>/min 전기집진기를 설계 및 제작하였다. 방전극은 0.2 mm 직경의 스테리스 와이어를 사용하였으며, 집진부 집진 면적은 13.44 m<sup>2</sup>이다.

집진 설비의 포집 효율 측정법에는 중량법, 비색법, 계수법이 있는데 중량법의 경우 전처리 필터와 같이 낮은 포집 효율(95% 이하)에서 사용되며, 비색법의 경우 중성능 필터(95~99%)의 포집 효율 측정에 사용된다. 계수법의 경우 극히 높은 효율(99% 이상)에서 주로 사용되는 방법으로 본 실험에서는 계수법에 의해 실험을 수행하였다<sup>(5)</sup>.

Fig. 2는 실험에 사용한 집진 성능평가 장치의 개략도이다. 집진 성능평가 장치는 입자 발생부, 집진부, 성능평가부로 크게 나누어 볼 수 있는데 입자 발생부는 Atomizer를 이용하여 입자를 발생시키고 Diffusion Dryer를 거치면서 수분을 증발시키고 Neutralizer를 이용하여 입자들이 띠고 있는 인위적인 전하를 제거하는 장치로 구성되어 있다. 담배입자의 경우는 Atomizer를 사용하지 않고 직접 담배연기를 발생시켜 집진기 내부로 유입되도록 하였다. 집진부는 2단식 전기집진기에 해당되며 성능 평가부는 입자 카운터(HIAC/ROYCO, FE-80; Aerosizer, API)를 이용하여 전기집진기의 상류측과 하류측의 입자 농도를 측정하여 포집 효율을 측정하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 실내 분진의 입경 및 형상 분석

분진의 입경 분포는 전기집진기 뿐만 아니라 다양한 집진 시스템에 있어 중요한 인자이다. 본 연구에서는 담배입자를 비롯하여 봄철에 집중적으로 발생하는 대표적인 실내 분진으로 황사와 송화 가루의 입도를 분석하였으며 전자현미경 분석을 통해 입자의 형상적 특성을 분석하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 황사와 송화 가루의 입도 분포를 나타내고 있다. 황사 분진의 경우 0.1 ~ 100  $\mu\text{m}$ 에 이르는 넓은 범위의 입경 분포를 보이고 있으며 질량 중위경(MMD, Mass Median Diameter)은 7.56  $\mu\text{m}$ 이다. 송화 가루의 경우 20 ~ 100  $\mu\text{m}$ 범위에 집중적으로 분포하고 있으며 질량 중위경이 50.00  $\mu\text{m}$ 이다. 전기 집진기에서 집진이 가장 어려운 영역은 전계하전과 확산하전이 동시에 작용하는 0.1 ~ 1  $\mu\text{m}$ 범위이다. 송화 가루의 경우 전기집진기에 의해 포집이 용이한 20 ~ 100  $\mu\text{m}$  범위에 분포하고 있는 반면 황사 분진의 경우

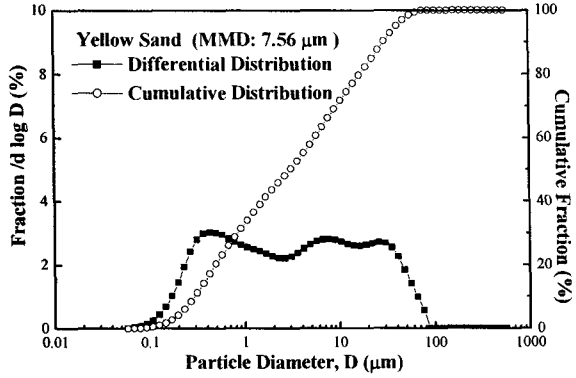


Fig. 3 Dust size distribution of the yellow sand dust.

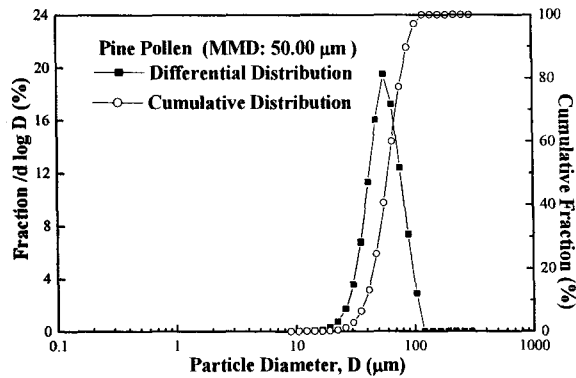


Fig. 4 Dust size distribution of the pine pollen.

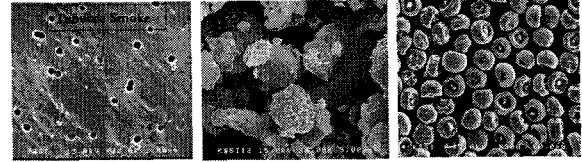
0.1 ~ 1 μm범위에도 일부 분진이 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 본 연구에서 사용한 황사, 송화 가루 및 담배 분진의 SEM 분석 사진이다. Miller와 Nazaroff<sup>(6)</sup>에 따르면 담배 분진의 경우 극히 미세한 입자들로 이루어져 있으며 입자의 밀도는 1.2 g/cm<sup>3</sup>이며, 입자 직경 범위는 0.01 ~ 4.0 μm, 입자의 질량중위경은 0.22 μm라고 제시하고 있다.

Fig. 5에 의하면 담배입자의 입경범위는 상기의 범위에 포함되는 모습을 볼 수 있다. 황사의 경우 다양한 형상과 입경 분포를 보이고 있으며 송화 가루의 경우 비교적 균일한 형상을 나타내고 있다.

#### 4.2 실내 분진의 비저항

비저항에 따라 분진의 전기적인 특성이 변하게



(a) Tobacco dust (b) Yellow sand dust (c) Pine pollen  
Fig. 5 SEM images of tobacco, yellow sand and pine pollen dusts.

Table 2 Resistivity of Indoor dusts

Dusts	Resistivity (×10 <sup>7</sup> ohm·cm)	Resistivity regime
Yellow Sand Dust	1.0 ~ 2.5	Normal
Tobacco Dust	0.90	Normal
Pine Pollen	2.0	Normal

되는데, 비저항이 10<sup>4</sup> ~ 10<sup>10</sup> Ω·cm인 영역에서는 인가전압에 대해서 코로나 전류가 거의 일정하고 분진의 이동 속도(Migration Velocity)도 커서 포집 효율도 높게 나타난다. 그러나 비저항이 10<sup>4</sup> Ω·cm이하의 경우 분진이 집진판에 포집된 후 급격히 전하를 잃고 재비산하여 포집 효율이 급격히 떨어지게 되며 또한 비저항이 10<sup>10</sup> Ω·cm이상의 영역에서는 하전전류가 급격히 감소하고 분진의 이동속도 또한 급격히 작아져 포집 효율도 낮게 나타나며 집진판에 부착된 분진층에 방전 전하가 축적되어 역전리 현상이 발생하기도 한다. 그러므로 분진의 전기적 특성에 따라 높은 포집 효율을 보이는 비저항 범위인 10<sup>4</sup> ~ 10<sup>10</sup> Ω·cm영역을 정상 비저항영역(Normal Resistivity Regime)이라 하고 10<sup>4</sup> Ω·cm보다 낮은 영역을 저비저항영역(Low Resistivity Regime) 그리고 10<sup>10</sup> Ω·cm 이상인 영역을 고비저항 영역(High Resistivity Regime)으로 분류한다<sup>(2)</sup>.

Table 2는 황사와 담배 분진의 비저항 측정 결과를 나타내고 있다. 측정 대기 조건은 일반적인 실내 조건으로 온도 23℃, 상대 습도 43%를 기준으로 설정하였다. 본 실험에서 황사와 송화 가루는 직접 분진을 채취하여 실험에 사용하였으며 담배입자의 경우는 비저항을 측정할 만큼 분진을 포집하기가 불가능하기 때문에 완전 연소된

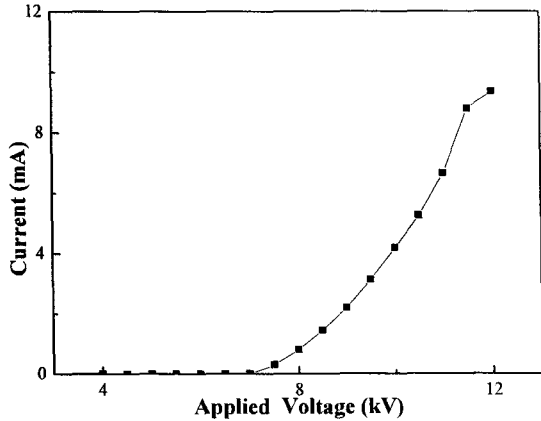


Fig. 6 Current-voltage characteristics of the experimental electrostatic precipitator.

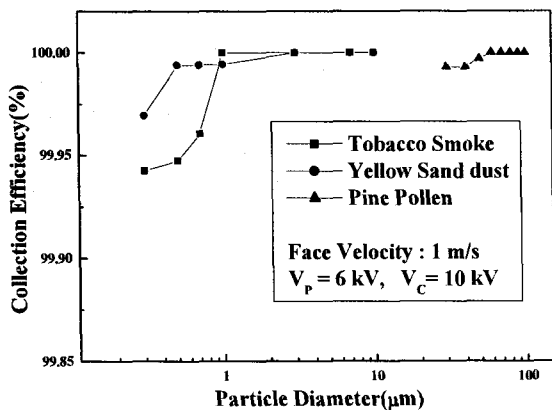


Fig. 7 Collection efficiencies of tobacco smoke, yellow sand dust and pine pollen for the 2stage electrostatic precipitator as a function of particle diameter.

담뱃재의 비저항을 측정하여 담배입자의 비저항을 유추하였다. 전기집진기의 집진에 있어 가장 중요한 요소인 비저항이 황사, 송화 가루 및 담배 입자 모두  $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$  전후로 정상 비저항영역을 나타내었으며 실내 분진의 집진에 있어 전기집진방식이 유효한 수단임을 알 수 있다.

#### 4.3 실내 분진의 포집 효율 평가

실내 분진의 전기 집진 특성을 Fig. 2의 장치를 이용하여 분석하였다. 우선 집진기의 특성을 분석하기 위하여 코로나 전압-전류 관계를 측정

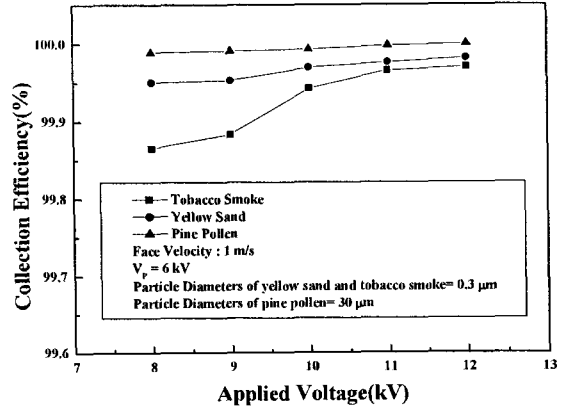


Fig. 8 Collection efficiencies of tobacco smoke, yellow sand dust and pine pollen for the 2 stage electrostatic precipitator as a function of applied voltage.

하였고, 실내 분진의 포집 특성을 평가하기 위해 입경 및 인가전압에 따른 포집 효율을 측정하였다.

전압-전류 특성은 전기집진기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 특성으로 낮은 전압에서 높은 코로나 전류가 발생할 때 전기집진기의 집진 성능 및 에너지 소비 측면에서 유리하다. 이는 높은 전하 밀도에서 분진의 대전이 보다 쉽게 이루어지기 때문이다. 일반적으로 집진 효율과 코로나 방전의 안정성을 고려하여 최대 전류의 2/3 정도에서 운전하게 된다<sup>(7)</sup>.

Fig. 6은 본 실험에 사용된 전기집진기의 전압-전류 특성을 나타내고 있다. 코로나 개시는 약 7 kV에서 발생하고 있으며, 일반적으로 알려진 단위 집진면적당 코로나 전류 비율( $I_p/A_p$ )은  $50 \sim 750 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 인데 본 연구에서 사용한 전기집진기의 경우 10 kV를 기준으로 코로나 전류 비율이  $312 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 으로 적절한 설계가 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 황사, 담배 분진 및 송화 가루의 입경별 집진 효율을 나타내고 있다. 황사 및 담배 분진의 경우  $0.3 \sim 10 \mu\text{m}$  범위에서 측정이 이루어졌는데 모든 범위에서 99.9%이상의 높은 효율을 보이고 있다. 송화 가루는  $20 \sim 100 \mu\text{m}$  범위에서 측정하였으며 황사 및 담배 분진 보다 높은 집진 효율을 보이고 있다. 황사, 담배 분진 및 송화 가루가 이렇게 높은 효율을 보이는 것은 각각의

비저항성이 정상 영역에 있으며 전기 집진기의 코로나 방전특성이 우수하기 때문으로 판단된다. 그러나 입경이 1  $\mu\text{m}$ 이하의 경우 효율이 감소하는 특성을 보이는데 이는 확산대전과 전계대전의 중간적 영역으로서 입자의 하전이 잘 이루어지지 않기 때문이다. 그러나 실제 실험결과 99%이상의 높은 집진효율을 유지함으로써 실내 분진의 집진에 전기 집진기를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 8은 인가전압에 따른 실내 분진의 집진 효율을 나타내고 있다. 황사 및 담배 분진은 0.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 기준으로 하였으며 송화 가루의 경우 30  $\mu\text{m}$  입자를 기준으로 인가전압에 따른 집진효율을 측정하였다. 코로나 개시 전압이 7 kV인 것을 고려했을 때 8 kV의 낮은 인가전압에서도 99%이상의 높은 집진효율을 보이고 있다.

## 5 결론

본 연구에서는 주된 실내 오염 물질인 황사, 담배입자, 송화 가루에 대하여 입경과 비저항 특성을 분석하였으며 일반적인 공조용 2단식 전기 집진기를 이용하여 집진 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 황사, 송화 가루 및 담배입자를 분석한 결과 황사는 0.1~100  $\mu\text{m}$ , 송화 가루는 20~100  $\mu\text{m}$ 으로 전기집진장치를 이용한 포집이 용이한 크기를 가지고 있었으며 담배 입자는 연소에 의해 발생하는 0.1~1  $\mu\text{m}$ 의 입자가 대부분으로서 집진이 용이하지 않은 크기 범위에 분포하고 있다.

(2) 황사, 담배 및 송화 가루 분진에 대해 JIS B 9915 규격에 의해 비저항을 측정하였다. 각각의 분진은 상온에서 0.9~2.5  $\times 10^7 \Omega\cdot\text{cm}$  범위가므로 정상 영역 비저항 값이다. 따라서 일반적인 실내 조건에서 운전되는 전기집진기에 의해 포집이 용이한 특성을 가지고 있음을 파악하였다.

(3) 2단식 전기집진기를 설계 및 제작하여 각각의 분진에 대한 포집특성을 분석하였으며, 황사 및 담배 입자의 경우 입경 0.3~10  $\mu\text{m}$ 범위, 송화 가루의 경우 20~100  $\mu\text{m}$  범위에서 인가전압 8

kV이상의 모든 영역에서 99%이상의 높은 효율을 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Hinds, W. C., 1982, Aerosol Technology, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc..
2. White, H. J., 1963, Industrial Electrostatic Precipitation, Addison-Wesley, Inc..
3. Japanese Standards Association, 1989, Measuring Methods for Dust Resistivity(with Parallel Electrodes) JIS B 9915, Japanese Industrial Standard.
4. Beachler, S. D., and Jahnke, L. A., APTI Course 4/3 Control of Particulate Emissions Student Manual.
5. ASHRAE., 1992, ANSI/ASHRAE Standard 52.1-1992, Gravimetric and Dust-Spot Procedures for Testing Air-Cleaning Devices Used in General Ventilation for Removing Particulate Matter, American Society of Heating, Refrigerating, Air-conditioning Engineers, Inc..
6. Miller, S. L. and Nazaroff, W. W., 2001, "Environmental tobacco smoke particles in multizone indoor environments," Atmospheric Environment, Vol. 35, pp. 2053-2067.
7. McDonald, J. R. and Dean, A. H., 1982, Electrostatic Precipitator Manual, Noyes Data Corporation.
8. Lee, J. E., Hyun, O. C., Lee, J. K. and Park, S. D., 2001, "High resistivity Characteristics of the Sinter Dust Generated from the Steel Plant," KSME International Journal, Vol. 15, NO. 5, pp. 630-638.