

전기 집진기에서의 Submicron 입자의 집진 특성에 관한 연구 — I. 전기적 특성

김 용 진[†], 황 태 근, 유 주 식*

한국기계연구원 열유체환경연구부, *안동대학교 기계교육과

A Study on the Collection Characteristics of Submicron Particles in an Electrostatic Precipitator – I. Electrical Characteristics

Yong-Jin Kim[†], Tae-Keun Hwang, Joo-Sik Yoo*

Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jangdong, Yusung, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Mechanical Engineering Education, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received January 9, 2001; revision received May 2, 2001)

ABSTRACT: This study conducts a laboratory measurement on a cylindrical electrostatic precipitator (ESP) with a 30 mm-diameter cylinder. Several kinds of test aerosols are generated with an atomizer and a diffusion dryer. The effects of applied voltage, flow state, gas velocity, and gas temperature on the electrical characteristics of the precipitator and onset of corona are experimentally investigated. The corona onset voltage is decreased, as diameter of discharge electrode wire becomes small or temperature of the precipitator increases. As the fluid velocity or particle load in the precipitator increases, the corona current is decreased.

Key words: Electrostatic precipitator(전기 집진기), Submicron particle(서브미크론 입자) Corona onset voltage(코로나 개시 전압), Electrical characteristics(전기적 특성)

기 호 설 명

I : 전류 [mA]
 T_g : 가스의 온도 [°C]
 U_g : 가스의 속도 [m/s]
 V : 전압 [kV]

그 리 스 문 자

ϕ : 방전극의 지름 [mm]

1. 서 론

산업화와 공업화에 따라 대기 오염 물질 가운데 입자상 물질인 분진의 발생량은 더욱더 증가하고 있으며, 산업 공정의 여러 요소에서 부작용에 따른 많은 심각한 문제를 일으키고 있다.⁽¹⁻³⁾ 특히 최근에는 첨단 반도체 제조 공정, 정밀 기계 가공 및 제약, 병원 등을 비롯한 각종 첨단 정밀 생산 공정에서 발생하는 서브미크론(submicron) 분진들은 큰 입자들과 다른 기계적, 전기적 성질 때문에 또 다른 부작용과 문제들을 일으키고 있다.^(4,5) 이에 따라 직경 1미크론 이하의 서브미크론 크기의 입자상 및 분자상의 가스 오염 물질의 제어에 많은 관심과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 점차 심각해지는 대기 오염의 문제에서도 오염의 주종을 이루는 입자상의 분진은

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7475; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: yjkim@kimm.re.kr

산업체의 기름 및 석탄 연소 보일러, 자동차, 제철/제강/시멘트 플랜트 및 소각로 등으로부터 배출되는데, 집진 기술에서는 이제까지 집진 장치에서 제거가 어려웠던 중금속과 미세 입자들의 제어에 관한 연구가 또한 관심의 대상이 되고 있다.

예를 들어 석탄 연소 화력 발전소에서 배출되는 오염 물질들은, 직경 $1\ \mu\text{m}$ 이하 입자들의 배출량은 무게 비로는 1% 이하이지만 입자수의 비율에서는 99%를 차지하고 있다. 이들 미세 입자들은 매우 높은 중금속 함유량을 지니고 있기 때문에 호흡할 때에 심각한 문제를 일으킨다. 그리고 이러한 입자들은 대기 중에 부유하고 있다가 비에 의하여 세정되어 수질 오염까지도 유발시킨다. 따라서, 최근의 대기 공기 정화법에 의하면 오염 분진의 중량 규제로부터 직경 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 PM10에서 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 PM2.5 등으로 미세 입자들을 대상으로 점차적으로 규제가 심화되고 있다.

미세 입자 제어에는 많은 방법이 사용되지만 그 중 전기 집진기는 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 분진 제거 효율이 99% 이상이며, 다른 집진기에 비하여 압력 손실과 동력 손실이 상대적으로 적다는 경제적인 이점 때문에 각종 산업 분야에서 공해 방지 및 기타 목적으로 널리 활용되고 있다. 특히 처리 가스량이 많고 온도가 높아도 그 가동에 전혀 영향을 받지 않으므로 고온 배기 가스를 배출하는 시멘트 소성로, 제철의 염기성 산성로, 펄프의 흑액 회수 시설, 제련소 용광로, 소각로 및 열 공급 시설의 분진 제거에 많이 사용되고 있다.^(6,7)

본 연구에서는 이러한 미세 입자상 물질에 대한 계측과 제어에 응용되고 있는 전기 집진 장치의 핵심 요소들과 기하학적인 차원 및 유체 유동 등의 설계 인자를 잘 제어할 수 있는 실린더형 전기 집진 장치를 설계, 제작하여 전기적 특성과 집진 효율 등을 조사하였다.

먼저 방전극의 직경, 가스 유속, 집진기 내부 온도 등 전기 집진기의 주된 영향 인자들에 대한 전기적 특성을 조사한다(I. 전기적 특성).

그리고 다음에는 여러 가지의 변수들에 대한 집진기의 집진 효율을 조사한다. 주로 입자의 크기가 $20\ \text{nm}$ 에서 $600\ \text{nm}$ 인 미세 입자들에 대한 집진 효율을 측정하였으며, 음극과 양극의 코로나 방전에 의한 전기 및 집진 효율의 효과를 관찰하였다(II. 집진 효율 특성).

이러한 실험 데이터들은 서브미크론 입자를 고효율로 집진하는 전기집진기의 개발뿐만 아니라, 초정밀 분야에서 한층 중요시되고 있는 전기장 및 온도장에서의 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 미소입자의 거동 예측 및 해석 모델의 개발에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 이론적 배경

전기 집진 기술은 배출 기체 중에 함유된 분진 및 연무(mist) 등의 입자상 물질들을 코로나 방전에 의해 하전시켜, 전계에 의해서 집진극 표면으로 이동 포집하는 기술로써 발전소, 시멘트 소성로, 유리 용해로, 제철 제강로, 소각 시설 등 주로 다량의 분진이 배출되는 곳에서 오염 물질을 제거하는 데 효율적으로 사용되고 있다. 집진 현상이 정전기력에 의해 일어나기 때문에 기계적인 집진 기술에 비해 분진의 입자 크기가 $10\ \mu\text{m}$ 이하인 작은 입자의 포집에 더 효과적이다.

코로나 방전은 방전극에 인가되는 고전압의 극성에 따라 양 코로나 방전과 음 코로나 방전으로 구분된다. 양 코로나 방전은 방전선의 전체 길이에 따라 균일하게 발생하는 발광 방전이며, 음 코로나 방전은 방전선의 길이에 따라 불규칙적으로 소시지 형상의 스트리머를 발생시킨다. 코로나 방전에 의해서 발생된 자유 전자가 가스 분자에 흡착되어 음이온을 형성하고 형성된 음이온이 분진 입자와 충돌하여 입자가 하전된다. 이온과 입자의 충돌에 의한 하전은 확산 대전과 전기장 대전으로 구분된다. 확산 대전에서는 입자가 단극 이온과 혼합되었을 때 이온과 입자의 브라운 운동에 의한 충돌 과정을 통하여 입자가 하전된다. 전기장 대전은 전기장에 의하여 전기장 내를 일정한 방향으로 정연하게 이동하는 이온과 입자의 충돌에 의한 일어난다. 분진의 직경이 $0.5\ \mu\text{m}$ 이상인 경우에는 전기장 대전이 지배적이고 $0.2\ \mu\text{m}$ 이하인 경우는 확산 대전이 주요 대전 기구가 된다. $0.2\ \mu\text{m}$ 보다 크고 $0.5\ \mu\text{m}$ 보다 작은 영역에서는 두 가지 대전이 동시에 일어난다. 전기장 대전의 원리는 코로나 방전 시에 전력선을 따라 이동하는 이온들과 함진 가스를 따라 이동하는 분진 사이의 충돌에 의해 이온이 분진에 부착되어 대전되는 원리이다. 미세 입자의 영역에서 주로 일어나는 확산 대전은 이온의 자유 열 운동으

로 인해 이온과 분진들이 충돌하고 이로 인해 분진의 표면에 머무는 이온들에 의해 분진이 대전되며, 이론적으로 전기장의 존재 유무에 무관하게 대전이 일어난다. 입자가 대전되면 대전된 입자는 전장 내에서 집진극을 향해서 이동하여 포집된다.^(6,7)

전기 집진기에서 분리된 분진의 하전과 이들의 이동에 필요한 힘의 원동력은 전기장이다. 이와 같은 전기장은 두 개의 전극간에 작용하는 전압 및 그 공간 내에 존재하는 하전 분진과 이온의 영향을 받아 이루어지는 공간 전하로 인하여 형성된다. 전류의 흐름이 없다면 가해진 전압과 기하학적인 요인에 의해서 전계가 형성된다. 전압이 코로나 임계 전압(corona threshold voltage)을 넘어서면 전극간 공간에 이온이 존재하기 때문에 전계 강도가 변화한다. 가스 이온은 전자보다 속도가 매우 느리기 때문에 상대적으로 속도가 느린 가스일수록 극간 공간에 머무는 시간이 길어서 공간 전하로서의 역할을 하게 된다. 이들 이온들은 공간 내 전하 밀도를 농축시키기 때문에 결과적으로 공간 전하의 역할을 하게 된다. 이때 집진극 가까이 있는 음 전하는 전계에 의한 힘을 받을 뿐만 아니라 공간 전하에 의한 척력을

받아 가속되기 때문에 집진극 쪽의 전계 강도를 높이는 효과를 가져온다. 한편, 방전극 가까이 있는 전하는 공간 전하에 의하여 방전극 쪽으로 척력을 받기 때문에 이 점의 전계 강도가 감소된 것과 같은 효과가 나타난다. 공간 전하의 크기는 현존하는 전하 운반체(charge carrier)의 수와 이들의 이동 속도(mobility)에 좌우된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서는 직경 10 nm에서 600 nm의 서브미크론 에어로졸에 대한 거동을 살펴보기 위하여 직경 30 mm, 길이 200 mm의 실린더형 전기 집진기를 사용하여 집진기의 전기적 특성과 집진 특성을 조사한다. 실험 장치의 전체 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 시스템의 좌측에 compressor air, filtered air supply system, atomizer(TSI, Model 3076) 및 diffusion dryer로 구성된 입자 발생 시스템이 설치되었으며 유로는 좌측에서 우측으로 형성되었다. 적정 온도를 유지할 수 있도록 가열기를 설치하였으며 집진기 내부가 안정된

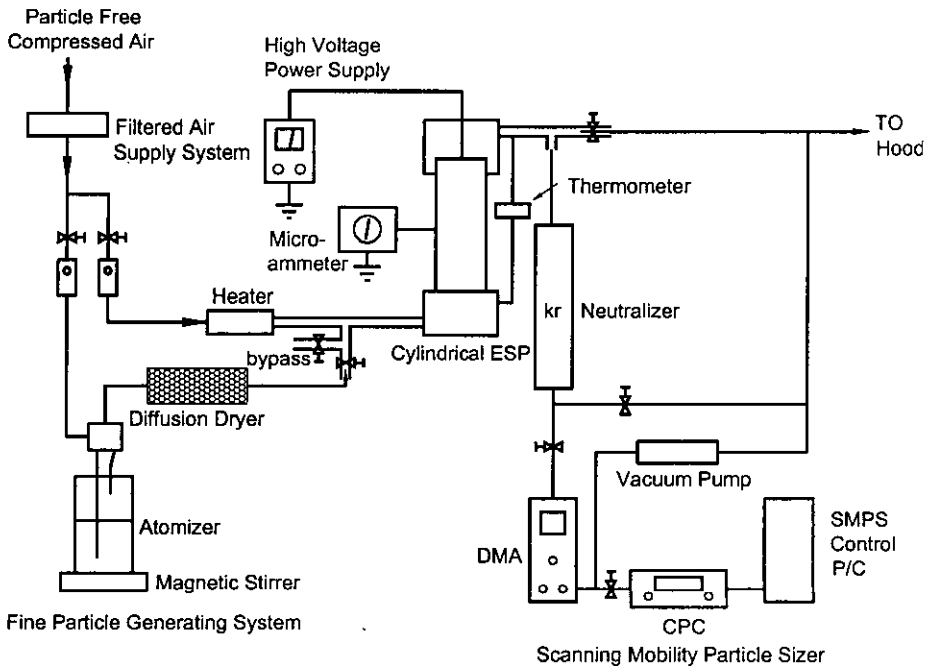


Fig. 1 Schematic of experimental system.

상태를 유지할 수 있도록 항상 온도를 감시하였다. 중앙의 실린더형 ESP 상부에 고전압을 공급할 수 있도록 제작하였고 이를 계측하여 전압-전류 데이터를 얻었다. 입자 계측 시스템은 Neutralizer(TSI, Model 3012), 절단 직경(cut-off diameter) $0.576 \mu\text{m}$ 의 임팩터, 정전 입자 분급기(differential mobility analyzer-DMA ; TSI, Model 3071), 응축핵 계수기(condensation nuclear counter-CNC ; TSI, Model 3022) 등으로 구성된다.^(8,9)

3.2 미세 입자 발생 장치

본 실험에서는 미세 입자에 대한 데이터의 신뢰성 향상을 위하여 고농도의 단일 성분의 입자를 인공적으로 발생시켜 실험을 수행하였다. 초미세 입자를 발생시키는 방법으로는, 기체 상태에서부터 화학 반응 또는 핵 생성 반응을 이용하여 발생시키는 기상 화학 석출법(chemical vapor deposition, CVD)과 기상 물리적 석출법(physical vapor deposition, PVD) 등이 있다. CVD법은, TiO_2 등의 금속 산화물 입자 등을 간단히 발생시킬 수 있다. PVD법에는 NaCl, ZnCl_2 등의 시료를 가열하여 증발시켜, 발생된 증기를 냉각, 응축 시킴으로써 고체의 미세 입자를 생성시키는 방법이 있다. 본 실험에서는 constant output atomizer(TSI, Model 3076)를 이용하여 용액과 압축 공기 노즐을 이용한 방법을 사용하여 입자를 발생시켰으며, 크기와 농도는 용액의 농도와 노즐 공기압 및 유량 등을 조절하여 제어하였다.

3.3 고전압 공급 및 코로나 전류 측정 장치

본 실험에서는 하전과 집진이 동시 영역에서 일어나는 1단식 실린더형 전기 집진 방식에 대하여 실험하였다. 본 실험에서 사용된 실린더형 전기 집진기는 중심 축에 여러 가지 크기의 방전선을 장착할 수 있도록 설계, 제작되었으며, 방전극에는 음과 양의 직류 고전압 하전 장치를 연결하여 코로나 방전과 및 전장을 인가시킨다. 본 실험에서 사용한 고전압 공급 장치는 0 kV에서 50 kV까지의 음, 양극의 직류 전압과 10 mA 이내의 전류를 연속적으로 조절할 수 있는 것이다. 본 실험에서의 방전극에 인가되는 고전압은 1000 : 1

의 고전압 probe를 이용하여 전압을 강하시킨 후, digital multimeter를 이용하여 계측하며, 이때 발생하는 코로나 전류는 전기 집진기의 접지 벽면인 실린더로 흐르게 되는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 전기 집진기 벽면과 접지극 사이에 전류계(micro-ammeter)를 설치하여 극간에 흐르는 코로나 전류값을 계측한다.

3.4 실험 방법

실험용 분진으로는 NaCl 입자를 사용한다. 입자를 발생시키기 위하여 0.15% 수용액을 만들어 atomizer를 사용하여 미소 액적으로 분무시킨다. 그리고 diffusion dryer를 통과시키면 수분은 실리카겔에 흡수되고 고체 입자가 생성된다. 이때의 분무용 유량은 1.2~2.2 L이다. Atomizer에서 균일한 입자를 발생시키기 위하여 교반기를 450 rpm으로 작동시키고 25°C 로 유지시킨다. 전기 집진기 내에서 충분한 온도를 유지할 수 있도록 heater와 슬라이다스를 설치하여 이를 자유롭게 제어할 수 있도록 하였고, 이때 집진기 내부가 안정된 상태를 유지할 수 있도록 K-Type 열전대를 사용하여 온도를 항상 감시하였다. SMPS를 주위 온도 $17\sim 20^\circ\text{C}$ 의 조건에서 약 10분간 예열시켰다. SMPS의 작동 순서는, 먼저 SMPS를 예열시킨 다음 CPC의 펌프를 켜고 DMA를 켜고 유량계를 사용하여 집진기 내부 유속을 맞춘다. 그리고 atomizer를 작동시킨 다음 atomizer 유량과 주 유량을 합하여 내부 유속에 맞는 유량으로 맞춘다. 이렇게 하여 집진기의 내부 유속이 설정되면 SMPS 외부 진공 펌프를 작동시키고 DMA에 부착된 임팩터의 차압이 10.1 mmAq 가 되게 DMA의 유입 유량을 맞춘다. DMA의 유입 유량이 맞추어지면 DMA의 excess 유량을 4.0 L로 설정하고 CPC로 유입되는 monodisperse 유량을 0.4 L로 맞추므로써 실험을 위한 하드웨어의 준비는 모두 완료된다.

4. 전기 특성 실험 결과 및 논의

전기 집진기의 전기적 특성을 조사하기 위하여 여러 가지의 변수들에 대한 전압-전류(V-I) 곡선을 Figs. 2~5에 나타내었다.

먼저, 방전극의 직경 및 극성에 따른 전기적

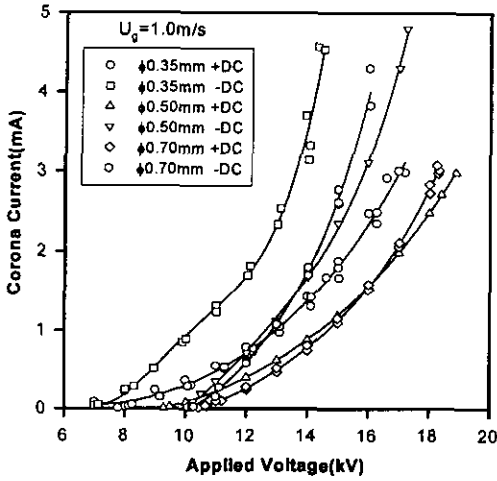


Fig. 2 Corona current as a function of applied voltage for the variation of the diameter of discharge electrode wire ($\phi=0.35$ mm, 0.50 mm, and 0.70 mm) with an air load, $U_g=1.0$ m/s, and $T_g=120^\circ\text{C}$.

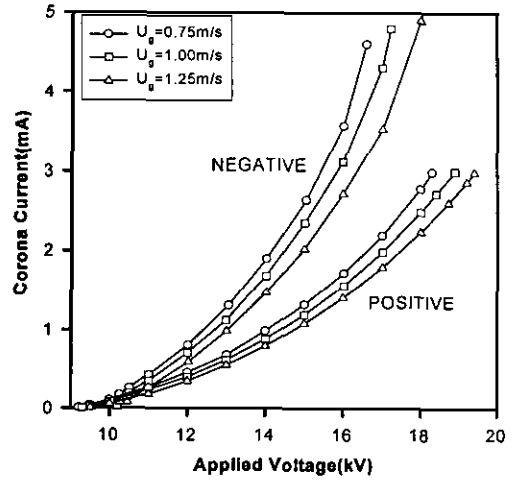


Fig. 4 Corona current as a function of applied voltage for several gas velocities ($U_g=0.75$ m/s, 1.00 m/s, and 1.25 m/s) with an air load, $\phi=0.5$ mm, and $T_g=120^\circ\text{C}$.

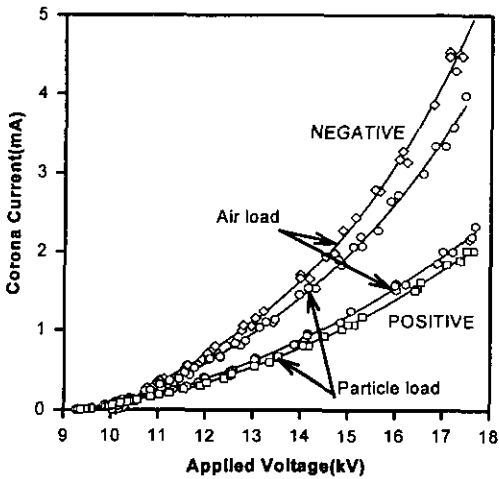


Fig. 3 Corona current as a function of applied voltage for an air load and a particle load with $\phi=0.5$ mm, $U_g=1.0$ m/s, and $T_g=120^\circ\text{C}$.

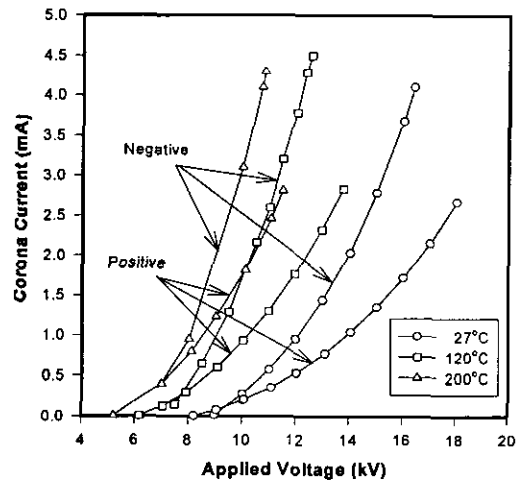


Fig. 5 Corona current as a function of applied voltage when the temperature of gas is 27°C , 120°C , and 200°C with an air load, $\phi=0.5$ mm, and $U_g=1.0$ m/s.

특성을 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2는 입자가 없는 공기만의 유동에서, 집진기 내부 유속이 1.0 m/s인 경우의 방전선의 직경 변화에 따른 V-I 곡선을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 방전극의 직경이 0.35 mm인 경우에 코로나 개시 전

압이 제일 낮으며, 같은 인가 전압에서의 코로나 전류도 높게 나타난다. 그리고 직경 0.5 mm와 0.7 mm의 경우에는 코로나 전류의 차이가 다소 적은 것을 알 수 있으며, 전압이 증가할수록 V-I 곡선의 기울기, 즉 코로나 전류량이 급격하

게 증가되는 것을 볼 수 있다. 이에 대한 이유로는, 극간의 전압이 코로나 개시 전압을 넘어서면 코로나 방전에서 발생하는 이온의 증가로 인하여 이에 상당하는 전류가 증가되는데, 동시에 전압의 증가로 인하여 전장의 세기도 증가되며, 이는 발생한 이온들의 벽면 이동력을 증가시켜 단위 시간당의 이온 전달량인 전류량이 증배되는 효과에 기인한 것으로 사료된다. 그리고 동일한 직경의 방전극에서 코로나 개시 전압은 양 코로나가 음 코로나보다 빨리 발생되지만 음 코로나의 경우 코로나 전류는 코로나 개시 전압을 넘어서면 급격하게 증가되는 것을 알 수 있다. 이에 대한 이유로는, 먼저 음 코로나의 경우에는 음이온과 자유 전자가 동시에 집진극으로 이동되는 데 반하여, 양 코로나의 경우에는 양이온만이 집진극 쪽으로 이동하기 때문에 코로나 개시 이후의 동일 인가 전압에서는 상대적으로 음 코로나 전류가 증배되는 효과를 가져온다고 설명될 수 있다.⁶⁾

Fig. 3은 가스상 유동(air load)과 입자가 부가된 유동(particle load)에 대한 전기 집진기의 V-I 곡선을 나타내고 있다. 이 또한 앞의 Fig. 2에서와 마찬가지로 동일한 집진기의 상태에서는 음의 코로나의 경우가 전반적으로 높은 전류를 가지고, 코로나 개시점에서는 음 코로나의 경우가 양 코로나에 비하여 다소 높은 점에서 시작된다. 이상으로부터 알 수 있는 것은 전기 집진기에서 음 코로나는 발생하기는 어려우나, 일단 발생이 된 후에는 높은 전류 및 하전 특성을 가질 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 3에서 같은 극성의 코로나 상태에서 입자가 공급되게 되면 공기만의 상태에 비하여 전류가 낮아지게 되는 것을 볼 수 있는데, 이는 입자의 하전에 의한 청소(scavenging) 효과로 인해 코로나 이온이 감소되는 결과로 나타난다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 4에는 음과 양의 코로나 방전 시 전기 집진기 내부 유속의 변화에 따른 V-I 곡선을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유속이 빠를수록 코로나 전류가 낮아지는 것을 볼 수 있는데, 이는 유속이 빠른 경우 강한 유속에 의하여 이온이 집진기 외부로 흘러가는 현상 또는 코로나 방전극 주위에서의 방전을 방해하는 영향 등으로 설명되어질 수 있다. 그리고 음 코로나는 양 코로나보다 상대적으로 많은 전자와 이온 때문에

Table 1 Values of the corona onset and sparkover voltages when the temperature of the precipitator=26°C, 120°C, and 200°C

		Temperature (°C)		
		26	120	200
Corona onset	Voltage (kV)	9.0	7.1	6.7
	Current (mA)	0.001	0.001	0.001
Sparkover	Voltage (kV)	16.4	12.55	10.8
	Current (mA)	4.1	4.29	4.3

전류 밀도가 높게 나타난다.

끝으로 전기 집진기의 온도 변화에 따른 전압-전류의 특성을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 양극 모두 고온으로 갈수록 그 기울기가 상당히 커지는 것을 보여주고 있다. 이는 온도가 올라가면 기체 밀도가 감소하며 전자와 분자가 매우 활발하게 운동하기 때문에 일어나는 현상이다. 특히, 음 코로나의 경우에는 음이온 외에 전자가 집진기 벽면인 접지극을 향하여 운동하게 되는데, 온도가 낮은 경우에는 기체 분자간의 거리가 조밀하여 이동 전자들이 분자와의 충돌로 인한 이온화로 안정되는 공간전하 분포를 가지지만, 상대적으로 온도가 높아지면 기체 분자간의 거리가 증가되어 전자들은 분자와의 충돌에 의한 이온화가 감소되고 벽면으로의 급속한 운동에 의하여 전류의 증가가 급격하게 되며, sparkover 발생 전압도 낮아진다. 이상으로부터, 온도가 높으면 코로나 개시 전압은 낮아지지만 상대적으로 sparkover 개시 전압이 모두 낮아진다는 것을 알 수 있다. Table. 1에는 코로나 개시 전압과 sparkover 전압을 온도 변화에 따라 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 26°C일 때의 코로나 개시 전압은 9.0 kV이지만, 120°C일 때에는 7.1 kV, 200°C인 경우에는 6.7 kV로써 각각 1.9 kV와 2.7 kV가 하락한 것을 알 수 있다.

5. 결 론

실린더형 전기 집진기를 제작하여 집진기의 주된 영향 인자들(방전극의 크기, 가스 유속, 집진기 내부 온도 등)에 대한 전기적 특성을 실험적으로 조사하였다. 방전극의 직경이 작을수록 코

로나 개시 전압은 낮아지며, 같은 인가 전압에서의 코로나 전류 밀도는 높아진다. 방전극의 직경이 같을 경우에는 음 코로나가 양 코로나보다 더 많은 코로나 전류를 발생시킨다. 전기 집진기 내부의 유속이 빠를수록 또는 입자의 부하가 증가할수록 코로나 전류는 감소한다. 그리고 온도가 높을수록 코로나 개시 전압은 낮아지며 spark가 빨리 발생한다.

참고문헌

1. Seinfeld, J. H., 1975, Air pollution: Physical and chemical fundamentals, McGraw Hill Inc., USA.
2. Handbook of dust precipitator, 1994, Daekang Press, Korea.
3. David, C. C. and Alley, F. C., 1994, Air pollution control: A design approach, Waveland Press Inc., USA.
4. Yoo, K. H., Lee, J. S. and Oh, M. D., 1997, Charging and collection of submicron particles in two-stage parallel-plate electrostatic precipitators, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 23, No. 7, pp. 308-323.
5. Bae, K. N., 1999, Particle control in a GIGA semiconductor cleanroom, *Air cleaning technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 28-39.
6. Oglesby, S. Jr. and Nichols, G. B., 1978, *Electrostatic precipitation*, Marcel Dekker Inc., New York.
7. White, H. J., 1963, *Industrial electrostatic precipitation*, Addison-Wesley Redding Mass.
8. Winklmayr, W., Reischl, G. P. and Linder, A. O., 1991, A new electromobility spectrometer for the measurement of aerosol size distribution in the size range from 1 to 1,000 nm, *J. Aerosol Science*, Vol. 22, pp. 289-296.
9. Kousaka, Y., Okuyama, K. and Adachi, M., 1985, Determination of particle size distribution of ultra fine aerosols using a differential mobility analyzer, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 4, pp. 209-225.