

전기 집진기에서의 Submicron 입자의 집진 특성에 관한 연구 - II. 집진 효율 특성

김 용 진[†], 여 석 준^{*}, 유 주 식^{**}

한국기계연구원 열유체환경연구부, ^{*}부경대학교 환경공학과, ^{**}안동대학교 기계교육과

A Study on the Collection Characteristics of Submicron Particles in an Electrostatic Precipitator - II. Collection Efficiency Characteristics

Yong-Jin Kim[†], Seok-Joon Yoa^{*}, Joo-Sik Yoo^{**}

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

^{*}Department of Environmental Engineering, Bukyoung National University, Pusan 608-737, 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 investigates particle collection characteristics of a cylindrical electrostatic precipitator. Experimental work has been made for the submicron particles. The effects of polarity of discharge electrode wire, particle diameter, gas velocity, gas temperature, and specific corona power on the particle collection efficiency are investigated. The efficiency of negative corona is higher than that of positive corona. As the particle diameter increases, the efficiency is decreased when the diameter is in the range of 0.02~0.6 micron, but is increased for the nanometer particles with diameter smaller than 0.02 micron. The efficiency is increased with increase of specific corona power. As the gas temperature increases, overall collection efficiency is increased for a negative corona, but is decreased for a positive corona.

Key words: Electrostatic precipitator(전기 집진기), Corona(코로나), Submicron particle(서브미크론 입자), Collection efficiency(집진 효율), Specific corona power(비코로나 전력)

기 호 설 명

- C : Cunningham 보정 계수
- C_i : 전기 집진기 상류 입경별 분진 농도
- C_o : 전기 집진기 하류 입경별 분진 농도
- D_p : 입자의 지름 [μm]
- E_o : 입자가 대전된 곳의 전계 강도 [V/m]
- E_p : 입자가 포집된 곳의 전계 강도 [V/m]

- K : 상수 ($= 3\epsilon/(\epsilon + 2)$)
- P : 소비전력 [Watt]
- Q : 유량 [m^3/min]
- SCP : 비코로나 전력 [$\text{Watt}/\text{m}^3/\text{min}$]
- T_g : 가스의 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
- U_g : 가스의 속도 [m/s]

그리스 문자

- ϵ : 입자의 절연 상수(dielectric constant)
- ϵ_o : 자유 공간의 유전율(permittivity)
- η : 입경별 집진 효율

[†] Corresponding author

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

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

- η_T : 총괄 집진 효율
 μ : 점성 계수 [kg/m·s]
 ω : 입자의 이동 속도 [m/s]

1. 서 론

“Part I. 전기적 특성”에 이어서 여기에서는 전기집진기에서의 여러 가지 변수들(방전극의 극성, 입자의 지름, 유속, 온도 등)이 집진 효율에 미치는 영향을 조사한다. 전체적인 실험 장치와 방법은 Part I에서 기술하였으며, 집진 효율에 대한 방법 및 조건으로, 먼저, 본 집진 효율 특성을 실험하는 데에 사용된 방전극의 지름은 0.5 mm로 고정하였으며, 본 실험에서의 온도 범위는 상온과 120°C 및 200°C로 하였다. 이는 일반적인 상온에서 작동하는 공기 청정기용 전기 집진기와 화력 발전소 배기 가스 처리용 전기 집진기의 작동 온도 120°C 및 소각로를 포함하는 고온용 전기 집진기의 온도 범위인 200°C를 대표하는 온도 영역으로 볼 수 있다.

전기 집진기의 집진 효율을 측정하기 위하여는 먼저 다분산(polydisperse) 입자 발생 장치인 atomizer를 작동시키면 입자의 양이 서서히 증가하여 약 10분 정도가 지나면 입자가 균일하게 발생되어 정상 상태로 배출되어진다. 본 실험에서 사용된 NaCl 입자의 전형적인 입경 분포를 Fig. 1에 나타내었으며, 그림에서 보는 바와 같이 입자의 최대 농도점은 40 nm이며 입경은 15 nm에서

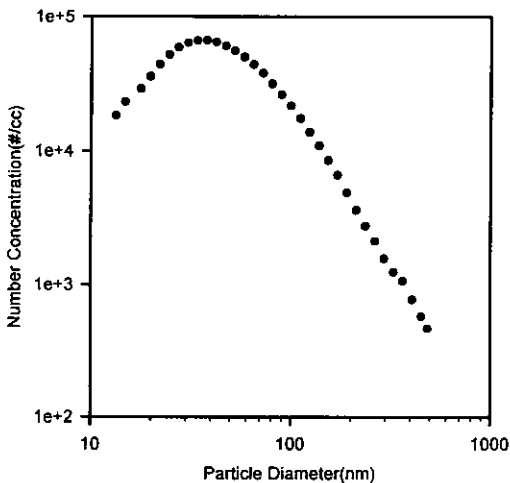


Fig. 1 Distribution of NaCl particle.

500 nm의 분포를 가진다.

이상으로부터 전기장에 의한 집진 효율을 측정하기 위하여 전기 집진기 후단에 설치된 Kr⁸⁵ neutralizer 후단에서 샘플링을 한다. DMA에 유입되는 유량은 4.4 L이며 이 중 monodisperse 유량은 0.4 L로써 CPC로 유입된다. 이렇게 유입된 유량은 1회에 1분 30초간 계측된다. 그리고 다음과 같은 실험 단계를 거쳐 입경별 집진 효율을 측정한다. (1) 하전시키기 전의 분진 농도를 10회 (15분간) 측정한다. (2) +DC를 저전압부터 고전압으로 상승시키면서 분진 농도를 5회씩 계측한 후 인가 전압을 해제하여 다시 분진 농도를 10회 측정한다. (3) -DC 하전을 저전압에서부터 고전압 순으로 상승시키면서 분진 농도를 5회씩 계측한 후 첫 1, 2회의 데이터는 neutralizer와 유로에 체류된 입자가 계측됨으로 인하여 제거하고 3회부터 5회까지의 데이터를 평균하여 다음의 식으로부터 주어진 입경에 대하여 입경별 집진 효율을 계산한다.

$$\eta = (1 - C_o/C_i) \times 100 \quad (1)$$

여기에서, C_i 는 전기 집진기 상류 유입부 입자 농도로 하전 전의 주어진 입경에 대한 분진 농도이며, C_o 는 전기 집진기의 하전 후의 후단 하류부에서의 입경별 분진 농도이다. 한 종류의 입자와 하나의 유속에 대한 실험이 완료되면 전기 집진기를 분해하여 집진기 내벽을 브러시로 깨끗이 털어 내고 아세톤으로 세척한 후에 새로운 실험을 수행한다.

2. 집진 효율에 관계된 기본적인 요소들에 대한 개념

2.1 전압과 전류

전기 집진기의 전압-전류 특성은 방전극의 형상과 극간 거리와 같은 기하학적인 구조와 흡진 가스의 종류, 온도, 밀도 및 유속 등의 유동 특성에 따라 다르게 나타난다(I. 전기적 특성). 코로나 방전에 의해서 발생한 자유 전자가 가스 분자에 흡착되어 음이온을 형성하는데, 음이온 형성의 난이도는 가스의 종류에 따라 다르다. 전자 친화성이 없는 수소, 질소, 알콜 등은 자유 전자가 충

들하여도 음이온 가스가 형성되지 않는 반면, 산업공정에서 배출되는 배기 가스에서 흔히 나타나는 산소와 아황산가스는 전자 친화성이 매우 커서 쉽게 음이온으로 된다. 일반적으로 처리 가스의 전자 친화성이 높고, 이동도가 작을 때 전기 집진기의 가동 특성이 좋아진다. 그러나 배기 가스의 성분을 변화시키기는 매우 어려우므로 전극 간격 또는 전압을 변화시켜 효율을 조절하는 것이 좋다. 인가 전압 방식에 따라 양 코로나와 음 코로나가 발생되며, 양 코로나에 비하여 음 코로나 방전 시에 오존의 생성이 더욱 활발하게 일어나기 때문에 공조용 정전 포집 장치에는 양 코로나 방전을, 일반 산업용 정전 포집 장치에서는 음 코로나 방전을 주로 이용한다.⁽¹⁻²⁾

2.2 입자의 이동 속도

입자가 대전되면 대전된 입자는 집진극을 향해서 이동해 간다. 이때의 속도를 이동 속도(migration velocity)라 하며 분진의 입경, 가스의 성분, 집진기 내부의 전기장 분포 등의 여러 가지 변수에 의하여 좌우될 수 있으므로, 정확한 분진의 이동 속도를 예측하기란 매우 어려운 일이다. 일반적으로 입자가 포화 하전(saturation charge)되었을 때, 이동 속도는 다음 식으로 표현된다.⁽²⁻⁴⁾

$$\omega = \frac{CD_p \epsilon_0 KE_0 E_p}{3\mu} \quad (2)$$

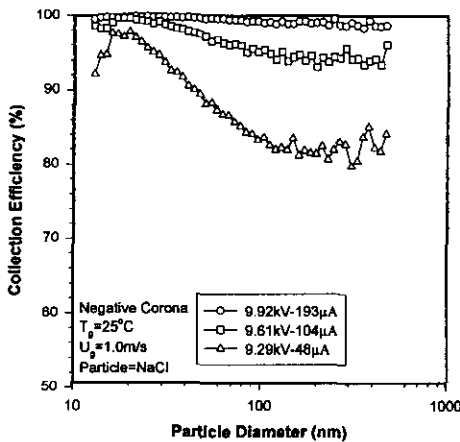


Fig. 2 Collection efficiency of negative corona as a function of particle diameter for several applied voltages.

위 식으로부터 이동 속도는 전압에 의한 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 전기 집진기에서 최대 효율을 얻기 위해서는 최대 전계 강도를 얻을 수 있도록 설계해야 한다. 또한 이동 속도는 입자가 커질수록 증대된다. 그러나 온도가 올라가면 점성이 증가하므로 이동 속도는 감소하게 된다.

2.3 온도와 압력

온도와 압력은 가스의 밀도와 전자의 진행 상황을 변화시킨다. 가스의 밀도가 감소하거나, 온도가 증가할 경우, 혹은 전계 강도가 증가할 경우에 이온화된 분진의 이동 속도는 증가한다. 온도가 증가할 경우, 방전극의 온도 상승에 따른 열전자 방출이 증가된다. 그리고 가스의 밀도가 감소하면 전자의 이동 속도가 빨라지므로 전류가 증가하게 된다. 따라서 온도 증가와 밀도 감소에 의해 코로나가 발생하게 되는 코로나 개시 전압과 공간 절연의 파괴가 일어나는 sparkover 전압이 낮아지는 결과가 나타난다. 이와 같은 현상은 온도가 높은 경우에 더욱 현저하게 나타난다.

3. 결과 및 논의

3.1 방전극의 극성에 따른 집진 효율

먼저 음극과 양극의 코로나 방전 시의 집진 효

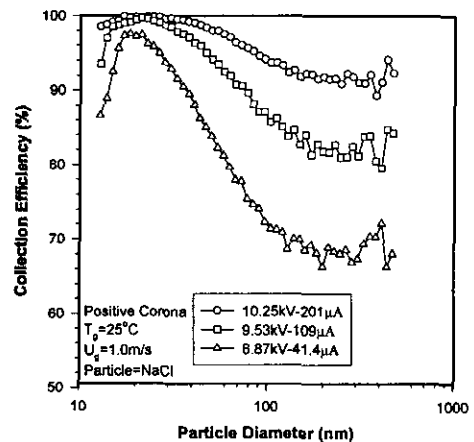


Fig. 3 Collection efficiency of positive corona as a function of particle diameter for several applied voltages.

율을 Fig. 2와 Fig. 3에 도시하였다. 방전극의 극성에 상관없이 인가 전압이 증가하면 집진 효율은 높아진다. 그리고 동일한 인가 전압에서는 음 코로나의 집진 효율이 더 높게 나타난다. 입자의 지름이 증가할수록 집진 효율이 감소되는데 감소되는 비율은 양 코로나의 경우가 더 크다. 일반적으로 입자의 전기 집진 효율은 입자의 하전에 의한 전기력과 유체 저항력에 의하여 결정되는 이동도(mobility)에 의하여 결정되는데, 통상 입경의 증가에 따라 감소하다가 증가하게 된다.^(3,4) 여기서 입경 $0.02 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 의 본 실험의 미세 입자 영역에서는 전반적으로 입자의 직경이 증가하면 집진 효율은 감소하는데, 이는 입경이 커지면 입자가 전기력에 의하여 이동하여 집진되는 속도에 비해 상대적으로 유체 항력(drag)이 크게 작용하여 입자의 포집이 잘 되지 않고 결국 집진율이 떨어지게 되는 것이다. 그러나 그림에서 보면 $D_p = 0.02 \mu\text{m}$ 이하의 아주 작은 입자에 있어서는 입자의 지름이 감소할수록 집진 효율도 함께 감소한다. 즉, 입자의 크기가 매우 작아지면 부분 하전(partial charging) 현상^(6,7)과 같이 일부 입자의 하전량이 영(zero)으로 되어 오히려 집진 효율이 떨어진다고 볼 수 있지만, 정량적인 규명을 위하여는 입자의 하전과 브라운 운동 등의 복합적인 현상에 관한 연구가 요구되어진다.

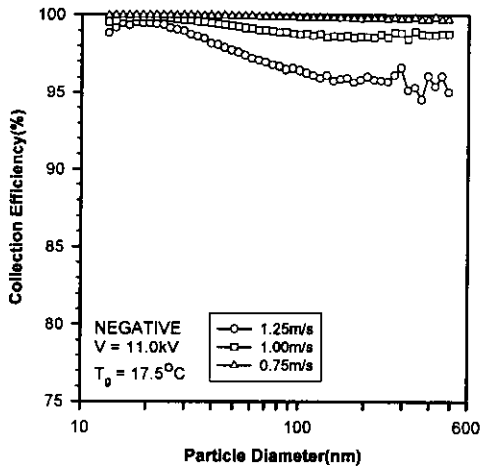


Fig. 4 Collection efficiency of negative corona as a function of particle diameter for several gas velocities ($U_c = 0.75 \text{ m/s}, 1.00 \text{ m/s}, 1.25 \text{ m/s}$).

3.2 유속 변화에 따른 집진 효율

전기 집진기 내부의 유속 변화에 따른 집진 효율의 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4는 음 코로나에 대한 결과이며, Fig. 5는 양 코로나에 대한 결과이다. 두 그림은 모두 집진기 내부의 유속이 빠를수록 집진 효율이 감소되는 것을 보여주고 있다. 이러한 현상은 양 코로나의 경우에 있어서 더욱더 두드러지게 나타난다. 그리고 입경이 클수록 감소율이 증대되며, 입경 40 nm 이하의 초미세 입경 영역에서는 거의 변화가 없다는 것을 볼 수 있다. 음 코로나의 경우에 있어서는 이와 같은 경향이 뚜렷하게 나타난다. 양 코로나의 경우에는, 유속이 낮을 때에는 입경에 따른 집진율의 변화가 크지 않지만 유속이 증대되면 입경이 커질 때 집진율이 크게 떨어진다.

앞의 3.1절에서 설명한 바와 같이, 본 실험의 영역인 입경 $0.6 \mu\text{m}$ 이하의 미세 입자의 범위에서, 입자가 커지면 입자가 유속 방향에 대하여 가지는 저항력(drag)과 관성력이 큰 힘으로 작용한다. 유속이 빠르면 유동 방향에 대해 입자가 가지는 관성력은 더욱 증가하고 이동 속도에 대한 항력 또한 커지므로 집진 효율은 감소하게 된다.

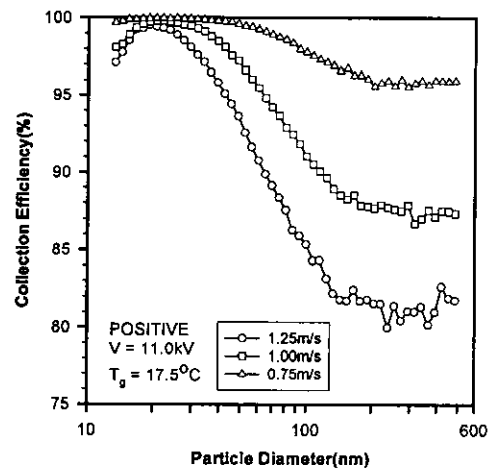


Fig. 5 Collection efficiency of positive corona as a function of particle diameter for several gas velocities ($U_c = 0.75 \text{ m/s}, 1.00 \text{ m/s}, 1.25 \text{ m/s}$).

3.3 온도 변화에 따른 집진 효율 특성

온도 변화에 따른 집진 효율의 변화를 알아보기 위하여 실험 온도를 120°C 및 200°C로 설정하고 음 코로나와 양 코로나 방전 시의 집진 효율을 SMPS로 측정된 결과를 Figs. 6~9에 나타내었다. 전압-전류 특성 곡선에서 관찰한 바와 같이 동일 인가 전압에서는 코로나 전류의 현격한 차이로 인하여 인가 전압에 따른 집진 효율을 비

교하기가 어렵고 음 코로나인 경우에는 200 μA 이상에서는 거의 100% 가까운 집진 효율을 보이므로 그 이하에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 각각의 온도에 대하여 코로나 전류가 200 μA , 100 μA 및 40 μA 가 되는 인가 전압을 설정하여 집진 효율을 구하여 비교하였다.

Figs. 6~9는 모두 온도에 상관없이 음 코로나의 집진 효율이 양 코로나의 것보다 높다는 것을 보여주고 있다. 그리고 음 코로나의 경우에는,

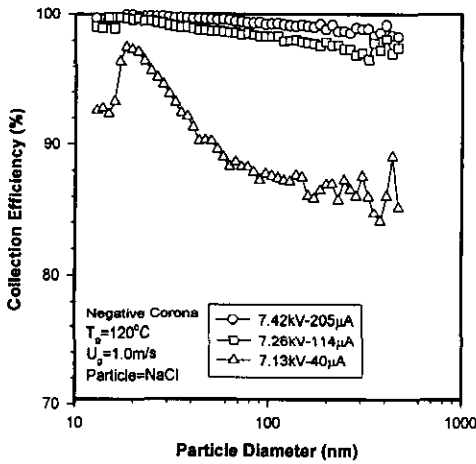


Fig. 6 Collection efficiency of negative corona as a function of particle diameter at $T_g = 120^\circ\text{C}$.

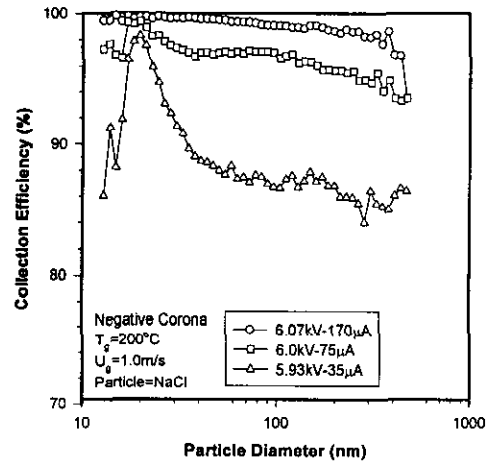


Fig. 8 Collection efficiency of negative corona as a function of particle diameter at $T_g = 200^\circ\text{C}$.

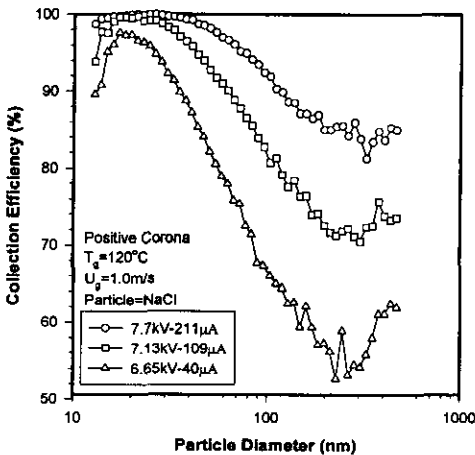


Fig. 7 Collection efficiency of positive corona as a function of particle diameter at $T_g = 120^\circ\text{C}$.

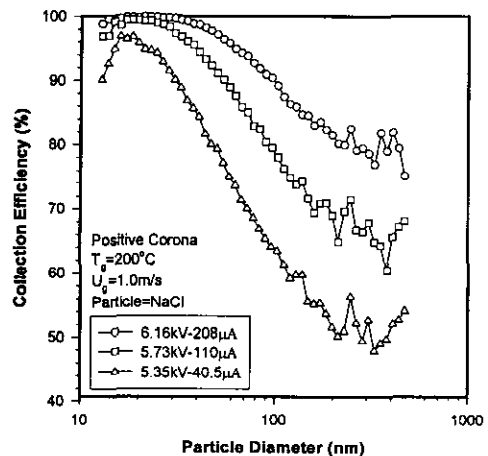


Fig. 9 Collection efficiency of positive corona as a function of particle diameter at $T_g = 200^\circ\text{C}$.

100 μA 이상에서는 거의 100%에 가까운 집진 효율을 나타낸다.

온도가 상승하면 음 코로나에서의 전류 변화가 양 코로나의 것보다 크다(Part I). 즉, 코로나 방전극의 온도 상승에 따른 열전자 방출이 증가되고 양이온의 충돌에 의하여 전자 방출이 증가하므로 동일한 전장에 대한 코로나 전류가 상승하게 된다. 음 코로나 방전의 경우에는 전극 사이의 공간에 존재하는 음이온이 안정된 공간 전하를 형성하는데 가스 밀도가 감소하면 전자의 이동도가 빨라지고 빠른 이동도에 의하여 높은 전류 밀도를 가지게 된다. 입자의 집진 효율은 입자의 횡단 속도에 따르고 횡단 속도는 전기적인 이동도에 의해 결정된다. 구형 입자의 이동도는 입경 0.2 μm 에서 1.0 μm 사이에서 최저의 값을 가지고 1.0 μm 보다 입경이 커지거나 0.2 μm 보다 입경이 작아지면 입경에 따른 집진 효율은 입자 이동 속도의 증가와 함께 증가한다. Figs. 2~9의 모든 결과들은 $D_p > 20 \text{ nm}$ 의 영역에서 이러한 경향을 잘 나타내고 있다. 그러나 미세 입자 영역($D_p < 20 \text{ nm}$)에서는 온도가 변화하여도(Figs. 2~9: $T_g = 17.5^\circ\text{C}, 25^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}, 200^\circ\text{C}$) 입자의 크기가 작아지면 집진 효율이 감소한다.

음 코로나에 있어서는 온도가 높을수록 집진 효율이 증가한다. 일반적으로는 온도가 상승하면 공기 밀도가 줄어들고 전류가 감소하며 가스의

점도가 매우 커지므로 입자가 가지는 이동 속도가 줄어들어 결국 집진 효율이 감소하게 된다. 그러나 음 코로나에서는 이온 이동도가 매우 커서 본 연구에서 측정된 온도 범위 내에서는 이와 같은 현상은 보이지 않고 있다. 온도가 500°C 이상으로 상승하면 밀도가 매우 작아지므로 전류는 떨어질 것으로 예상된다. 그런데 온도가 높으면 sparkover 전압이 상대적으로 빨리 발생하므로 전력 소모가 많아질 수 있고 다른 주변 기기들에게 심각한 피해를 일으킬 수 있다.

3.4 비코로나 전력에 따른 집진 효율 특성

실험 영역 전체의 집진 효율 경향을 알아보기 위하여 전기 집진기의 집진 효율을 좌우하는 인가 전압과 그에 따른 코로나 전류, 그리고 그때의 유속을 내포하는 변수인 비코로나 전력(Specific Corona Power, SCP)에 대한 집진 효율을 비교하여 Figs. 10~15에 나타내었다. 비코로나 전력은 집진기의 성능을 검토하는 데에 사용되는 중요한 변수 중의 하나로써 집진기에 인가되는 전압과 그 때의 코로나 전류로 나타나는 전력(P)을 유량(Q)으로 나눈 값으로 나타내며, 전기 집진기의 성능 평가를 위해 사용된다.⁽⁸⁾

$$SCP = P/Q \text{ [Watt/m}^3\text{/min]} \quad (3)$$

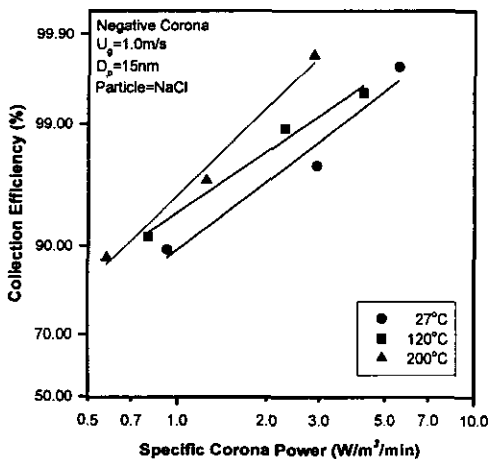


Fig. 10 Collection efficiency of negative corona as a function of specific corona power for a particle with $D_p = 15 \text{ nm}$.

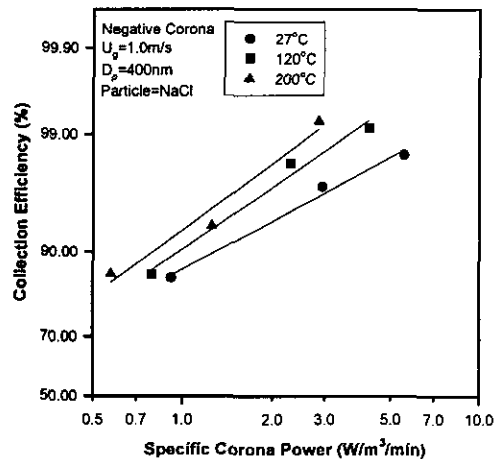


Fig. 11 Collection efficiency of negative corona as a function of specific corona power for a particle with $D_p = 400 \text{ nm}$.

입경 15 nm와 400 nm의 입자에 있어서의 비코로나 전력에 따른 집진 효율을 측정하여 Figs. 10~13에 도시하였다.

먼저 Fig. 10과 Fig. 11은 각각 15 nm와 400 nm의 입자에 대하여 음 코로나에서의 온도 변화에 따른 비코로나 전력에 대한 집진 효율을 나타낸 것으로, 동일 비코로나 전력에 대하여 전반적으로 온도가 상승하면 집진 효율이 증가한다는 것을 보여주고 있다. 온도가 증가하면 기체의 점성이 증가하여 입자의 항력의 증가로 집진 효율이 감소할 것처럼 보이지만, 음 코로나에서의 하전 매체인 전자나 음이온의 활발한 운동으로 인해 상대적으로 높은 하전 효과를 가져와 집진 효율이 증가되는 것으로 사료된다.

그러나 동일 소비 전력에 대하여 음 코로나에 비하여 상대적으로 낮은 코로나 전류값을 갖는 양 코로나의 경우에는(Part I의 Fig. 5 참조), 유체의 저항이 작은 입경 15 nm의 초미세 입자에 대해서는 온도 증가와 함께 집진 효율이 여전히 증가하지만(Fig. 12), 입경 400 nm의 입자에 대해서는 집진 효율이 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 13). 이에 대한 이유로 생각할 수 있는 것으로, 상대적으로 큰 입자의 경우 온도가 증가할수록 입자에 대한 유체의 항력이 하전량에 대한 전기력의 효과보다 지배적으로 작용하여 이동 속도를 저하시켜 집진 효율이 감소되는 것이다. 즉, 동일 조건에서 절대적인 하전량이 낮은 양 코

로나 경우에는 전기력이 작게 작용하는데, 이 때 입자가 큰 경우, 온도의 증가에 따른 유체 저항의 증가를 극복할 수 없게 된다. 이와 같은 현상은 입자가 커질수록 더 강하게 일어나므로 큰 입자인 경우에는 집진 효율이 저하되는 것으로 생각된다.

3.5 총괄 집진 효율

집진 효율을 무게에 의하여 표현하는 것은 매우 중요한 일이다. 왜냐하면 분진의 전체 범위에 걸쳐 어느 정도의 무게가 제거되느냐를 나타내기 때문이다. 하나의 특정한 입자 크기의 분진에 대한 집진기의 효율을 입경별 집진 효율이라 하며, 총괄 집진 효율은 전체 입경의 분진 중량에 대하여 나타낸다. 즉, 총괄 집진 효율은 때때로 특정 입경에 대한 집진 효율보다 전체 집진 효율에 대하여 나타낼 때 이용된다. 총괄 집진 효율에 대한 식은 아래와 같다.

$$\eta_T = \frac{\text{입구측 질량농도} - \text{출구측 질량농도}}{\text{입구측 질량농도}} \quad (4)$$

음 코로나와 양 코로나에서의 온도 변화에 대한 총괄 집진 효율을 측정하여 Fig. 14와 Fig. 15에 나타내었다. 전체적으로 볼 때 총괄 집진 효율은 비코로나 전력의 증가에 따라 선형적으로

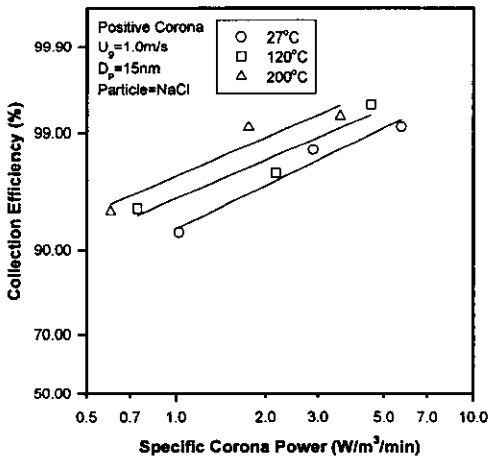


Fig. 12 Collection efficiency of positive corona as a function of specific corona power for a particle with $D_p = 15$ nm.

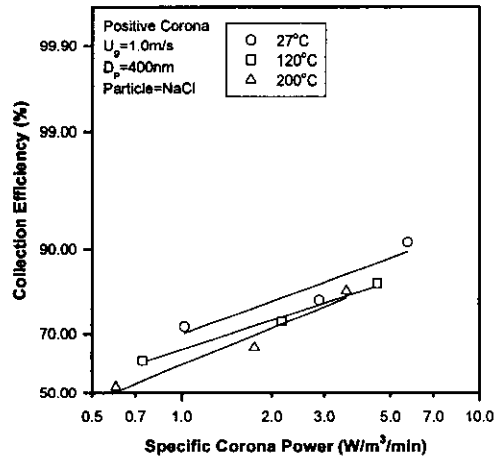


Fig. 13 Collection efficiency of positive corona as a function of specific corona power for a particle with $D_p = 400$ nm.

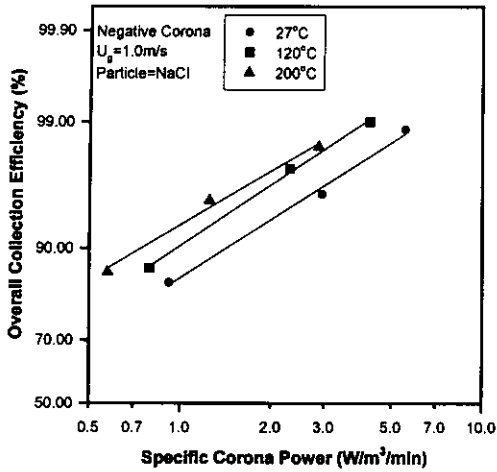


Fig. 14 Overall collection efficiency of negative corona as a function of specific corona power for several gas temperatures ($T_g=27^\circ\text{C}$, 120°C , and 200°C).

증가한다. 음 코로나의 경우, 온도가 증가하면 집진 효율이 증가한다. 그러나 양 코로나에서는 온도가 증가할수록 오히려 감소하는 경향을 보인다.

4. 결 론

실린더형 전기 집진기를 제작하여 집진기에서의 여러 가지 요소들(방전극의 극성, 입자의 지름, 유속, 온도)에 대한 집진 효율 특성을 실험적으로 조사하였다. 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

(1) 입자의 지름이 $0.02\ \mu\text{m}$ 에서 $0.6\ \mu\text{m}$ 인 영역의 입자에서는 입경이 증가하면 집진 효율이 감소된다. 그러나 입경 $0.02\ \mu\text{m}$ 이하인 초미세 입자 영역에서는 입경의 증가와 함께 집진 효율도 함께 증가한다.

(2) 집진 효율은 소비 전력의 증가와 함께 증가한다. 음 코로나에서는 입자의 크기에 관계없이 온도가 높을수록 집진 효율이 높아진다. 그러나 양 코로나의 경우에는 작은 입자에 대해서는 같은 경향을 보이지만 입경이 매우 커지면 온도가 높을수록 오히려 집진 효율이 낮아진다.

(3) 음 코로나의 총괄 집진 효율은 양 코로나의 것보다 높다. 음 코로나에서는 온도 상승과 함께 집진 효율이 높아진다. 그러나 양 코로나에

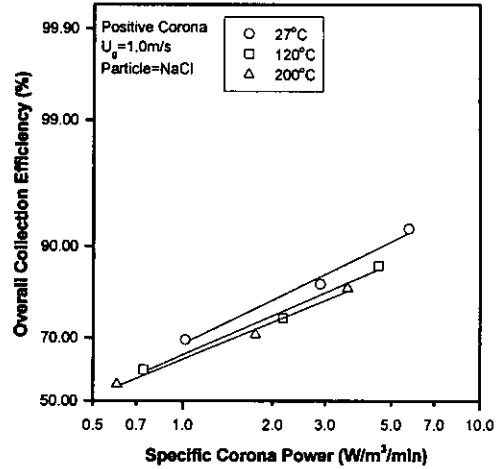


Fig. 15 Overall collection efficiency of positive corona as a function of specific corona power for several gas temperatures ($T_g=27^\circ\text{C}$, 120°C , and 200°C).

서는 온도가 높아지면 집진 효율은 낮아진다.

참고문헌

1. Kim, I. S., Lee, J. O., Kim, Y. J. and Choi, H. O., 1993, Experimental study on the discharge electrode of a two-stage electrostatic air cleaner, Korean J. of air conditioning and refrigeration engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 27-34.
2. Oglesby, S. Jr. and Nichols, G. B., 1978, Electrostatic precipitation, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 57-79.
3. White, H. J., 1963, Industrial electrostatic precipitation, Addison-Wesley Redding Mass.
4. Henry, R. F., Podolski, W. F. and Saxena, S. C., 1985, A Review of electrically augmented gas cleaning devices for particulate removal, IEEE Trans. ind. appl., IA-21(4), pp. 939-949.
5. Hwang, J. and Daily, J. W., 1992, A study of particle charging for electric field enhanced deposition, Aerosol Science and Technology, Vol. 16, pp. 113-125.
6. 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.

7. Zhuang, Y., Kim, Y. J., Lee, T. G. and Pratih, B., 2000, Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators, *J. Electrosta-*

tics, Vol. 48, No. 3, pp. 245-260.

8. Kim, Y. J., Jeong, S. H., Hong, W. S., Ha, B. K., Cho, S. S. and Ham, B. H., 1998, Effect of the plate spacing and discharge electrode shape on the efficiency of wide plate spacing electrostatic precipitator, *Proceeding of 7th International Conf. of ESP*, pp. 590-595.