

## 전기집진기의 10 nm 급 초미세 나노입자의 하전 및 집진 특성

한방우\* · 김학준\* · 김용진\*† · 송동근\* · 홍원석\* · 신완호\*

\* 한국기계연구원 그린환경기계연구본부

### Characteristics of Charging and Collection of 10-nm-Class Ultrafine Nanoparticles in an Electrostatic Precipitator

Bangwoo Han\*, Hak-Joon Kim\*, Yong-Jin Kim\*†, Dong-Keun Song\*, Won-Seok Hong\* and Wan-Ho Shin\*

\* Environment Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received June 16, 2011 ; Revised August 5, 2011 ; Accepted August 8, 2011)

**Key Words** : Nanoparticle(나노입자), Electrostatic Precipitation(전기집진), Charging Ratio(하전율)

**초록**: 전기집진에서의 10 nm 급 초미세 나노입자의 하전 및 집진 특성을 파악하였고, 나노입자의 확산효과와 비교해 보았다. 나노입자의 하전율과 확산손실 효과의 지배력에 따라 전기집진기에서의 나노입자 집진효율이 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 10nm 급 영역에서는 입자 크기가 작아질수록 지속적으로 집진효율이 감소하였다. 10 nm 이하의 영역에서는 나노입자의 부분적 하전효과가 전기집진기 내의 확산손실 효과보다 지배적인 것을 알 수 있었다. 10 nm 이하의 나노입자에 대하여 집진효율 실험 결과가 단극 확산 하전 이론을 적용한 입자하전율 계산 결과와도 잘 일치하였다.

**Abstract**: The charging of 10-nm-class nanoparticles in an electrostatic precipitator (ESP) according to particle charging ratio has been investigated and compared to the diffusion effect of the nanoparticles. The competition between the charging probability and the diffusion loss effect determines the collection efficiency of nanoparticles in the ESP. The collection efficiency of nanoparticles decreased continuously with decreasing particle diameter. This indicates that the partial charging effect of 10-nm-class nanoparticles is more dominant than their diffusion loss effect in the ESP for nanoparticles in the particle size range of less than 10 nm. The charging ratios based on unipolar diffusion charging calculations were in good agreement with the experimental collection efficiencies for nanoparticles less than 10 nm in diameter.

### 1. 서론

초미세 나노입자의 집진은 인체위해성이 높은 극미소 오염물질 제어와 관련하여 매우 중요해지고 있다. 특히, 100 nm 이하의 초미세입자 및 50 nm 이하의 나노입자는 공기 중 체류 시간이 길어 호흡기로의 유입이 용이하므로 인체 유해성의 측면에서 보다 관심의 대상이 되고 있다. 최근 들어, 대기 중 입자상 오염물질은 PM10 (10 μm 이하의 입자상물질을 중량으로 규제) 에서 이러한 초미세 입자의 인체위해성이 부각되면서 PM2.5 (2.5 μm 이

하로 규제)로 강화되고 있으며, 유럽 등의 선진국에서는 PM1.0 (1.0 μm 이하로 규제)에 대한 규제 강화되는 추세이다. 전기집진기는 화력발전소나 소각장 등의 산업현장에서 입자상 오염물질을 처리하는 장치로 100 여년 전부터 사용되어왔고 많은 연구자들에 의해 마이크로급 및 서브마이크로급의 미세입자의 집진특성 연구가 진행되어왔다.<sup>(1-4)</sup> 100 nm 와 1000 nm 사이의 서브마이크로 입자 크기 범위에서는 크기가 커질수록 입자 하전량 증가와 항력증가에 따른 모빌리티 감소 영향에 따라 U자 모양의 집진효율을 나타내나 100 nm 이하에서는 초미세입자의 하전이 어려워 집진효율이 입경이 작아질수록 다시 감소하는 경향을 보인다고 알려져 있다. 하지만 10 nm 급의 초미세 나노입자의 전기집진 하전특성에 대한 연구는 아직 미

† Corresponding Author, [yjkim@kimm.re.kr](mailto:yjkim@kimm.re.kr)  
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

비한 상태이다. 입경이 작아질수록 이온과의 충돌 확률 감소에 따라 하전될 가능성이 낮아지고 전기 집진기에서의 집진효율은 감소할 것으로 예상되나 나노입자에서 입경이 작을수록 입자에 작용하는 확산력이 급격히 증가하므로 전기집진기에서 확산에 의한 입자 침착이 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 이 두 가지 반대되는 하전특성과 확산특성의 영향력 경쟁에 의해 10 nm 급 나노입자의 하전 및 집진 특성이 결정될 수 있다. 본 연구에서는 전기집진기에서의 나노입자의 하전과 확산에 따른 특성을 파악하였고 실험적으로 나타난 나노입자의 집진 및 하전특성을 단극 이온의 확산하전을 고려한 수치결과와 비교해 보았다.

### 2. 실험 장치

Fig. 1 은 10 nm 급 나노입자의 전기집진 실험장치 구성도를 보여주고 있다. 장치는 크게 에어로졸 나노입자 발생 반응로, 나노입자 분급 시스템, 전기집진기 그리고 나노입자 계수측정기로 구성되어 있다. NaCl 나노입자는 증발 응축법(evaporation condensation)을 이용하여 NaCl 고체를 500-550°C의 고온의 반응로에서 증발시킨 뒤 약 5°C 정도의 냉각투브를 통과시켜 3-30 nm 정도의 크기로 제조하였다. 발생한 입자는 Kr-85 입자중화기에 의해 중화된 뒤 Nano-DMA(differential mobility analyzer, Model 3085, TSI Inc., St. Paul, MN)를 통과하여 원하는 크기의 입자만을 분급시키고 분급된 일정 크기의 입자는 다시 Am-241 입자중화기를 통과하여 하전된 입자를 중화시킨 뒤 20 kV의 고전압을 인가시킨 Plate Condenser를 통과시켜 하전된 입자를 제거하고 하전되지 않은 일정크기의 입자만을 생성시켰다. 이렇게 생성시킨 균일 크기의 하전되지 않은 입자를 30 l/min의 깨끗한 공기와 함께 원통형 전기집진기로 유입시켰다. 전기집진기에는 고전압 인가장치(최대전압/전류 20 kV/ 5 mA)를 이용하여 직류전압 0-10 kV를 인가하였다.

원통형 전기집진기는 내경 30 mm, 길이가 200 mm의 크기로 제작하였고 내부방전극은 0.5 mm의 텅스텐선을 이용하였다. 전기집진기의 입구 및 출구에서 응축핵 계수기(condensation particle counter, Model 3025, TSI Inc., St. Paul, MN)를 이용하여 입자 수농도를 측정하였다.

전기집진기의 입자 크기에 따른 집진효율을 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$\eta = (1 - n_o/n_i) \times 100 \tag{1}$$

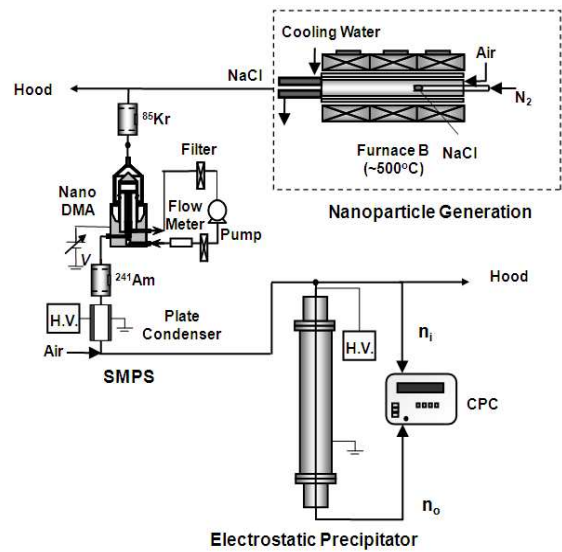


Fig. 1 Schematic setup for the experiments in this study

여기서,  $n_i$  와  $n_o$  는 각각 입구 및 출구에서의 입자농도를 나타낸다.

확산손실에 의한 전기집진기 내부의 집진효율은 전압을 인가하지 않은 상태에서 전기집진기 입구 및 출구에서의 농도분포를 비교하여 측정할 수 있고, 하전에 의한 집진효율은 확산효과를 배제하기 위해 전기집진기 출구에서 전압을 인가한 것과 인가하지 않은 것을 비교하여 측정할 수 있다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 이론적 고찰

에어로졸 입자의 하전은 기체상 이온과의 충돌을 통해 이루어지는데 크게 확산하전(diffusion charging)과 전계하전(field charging)으로 나눌 수 있다. 전계하전은 외부의 전기장에 의해 이온이 가속되어 상대적으로 정체되어 있는 입자에 충돌하여 하전되는 것을 말하고 확산하전은 이온과 입자가 불규칙한 브라운운동에 의해 충돌하면서 하전되는 것을 의미한다. 특히 400 nm 이하의 미세 입자의 경우 외부에서 아무리 강한 전기장을 인가하더라도 주로 확산하전이 지배적인 역할을 한다.<sup>(5)</sup> 따라서 전기집진기에서의 나노입자의 하전 또한 주로 확산하전으로 이루어진다고 볼 수 있다.

단극이온에 의한 에어로졸 입자의 확산하전은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

$$\frac{dn_o}{dt} = -\beta_o^s n_o N_i^s \tag{2}$$

여기서  $n$  은 입자의 농도,  $N_i$  는 이온의 농도 그리고  $\beta$  는 이온과 입자의 결합 확률(combination probability)을 나타낸다. 하첨자 0 는 전기적 중화 상태를 의미하고 상첨자  $s$  는 이온의 극성을 나타낸다. 즉, 식 (2)는 미하전 입자의 시간에 따른 농도 변화를 나타내고 있다.

만약 초기 입자가 전부 미하전 상태라면 식 (2)는 다음과 같은 해석해를 갖는다.<sup>(6)</sup>

$$\frac{n_0}{n_T} = \exp(-\beta_0^s N_i^s t) \quad (3)$$

여기서  $n_T$ 는 총 입자농도를 의미한다.  $\beta$ 의 값으로는 Fuchs 가 제시한 입자하전 이론을 사용하였다.<sup>(8)</sup> 그 이유는 Fuchs 이론을 이용한 계산이 50 nm 이하의 나노입자 확산하전과 관련된 실험적 결과들과 잘 일치하기 때문이다.<sup>(8,9)</sup> Fuchs 이론에 의한  $\beta_p$ 는 다음과 같다.

$$\beta_p = \frac{\pi C_i \xi \sigma^2 \exp\{-\phi(\sigma)/kT\}}{1 + \exp\{-\phi(\sigma)/kT\} \frac{C_i \xi \sigma^2}{4D_i a} \int_0^{a/\sigma} \exp\{\phi(r)/kT\} d(a/r)} \quad (4)$$

여기서

$$\phi(r) = \frac{pe^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 1} \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{a^3}{r^2(r^2 - a^2)} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{a^3}{\lambda_i^2} \left\{ \frac{1}{5} \left(1 + \frac{\lambda_i}{a}\right)^5 - \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\lambda_i^2}{a^2}\right) \left(1 + \frac{\lambda_i}{a}\right)^3 + \frac{2}{15} \left(1 + \frac{\lambda_i^2}{a^2}\right)^2 \right\} \quad (6)$$

하첨자  $p$  는 기본하전개수와 극성을 의미한다.  $C_i$  와  $D_i$  는 각각 이온의 속도와 확산계수를 나타낸다.  $\xi$  는 이온과 입자의 접착확률(sticking probability)를 의미하고 여기에서는 1 로 가정하였다.  $k$ ,  $T$  및  $a$  는 각각 볼츠만상수, 절대온도 및 입자의 반경을 나타낸다.  $\Phi$  는 이온과 입자에 의한 정전포텐셜을 나타내고  $r$  은 이온과 입자 사이의 거리를 나타낸다.  $\epsilon_0$  와  $\epsilon_1$  은 각각 진공 유전율(vacuum permittivity)와 입자의 유전상수를 의미한다.  $\sigma$  는 한계구 반경(limit sphere)으로 이온의 평균자유거리의 함수이다.  $\beta_p$  는  $C_i$ ,  $D_i$  및  $\lambda_i$  등의 이온의 성질(property)에 따라 영향을 많이 받는다.  $\lambda_i$

는 이온의 평균자유거리(mean free path)를 의미한다.  $C_i$ ,  $D_i$  및  $\lambda_i$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$C_i = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_i}} \quad (7)$$

$$D_i = \frac{kTZ_i}{e} \quad (8)$$

$$\lambda_i = \frac{16\sqrt{2}}{3\pi} \frac{D_i}{C_i} \left( \frac{M}{M + m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

따라서,  $\beta_p$  를 계산하기 위해서는 최소한 이온의 질량  $m_i$  와 전기이동도  $Z_p$  를 알아야 한다. 본 연구에서는 기존의 연구를 참조하여 질량과 전기이동도를 양이온의 경우 130 amu 와  $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$ , 음이온의 경우 100 amu 와  $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Vs}$  값을 사용하였다.<sup>(6,7)</sup>

Fig. 2 는 양극의 전기집진기를 사용하였을 때 식 (4)-(9)를 이용하여  $\beta_p$  를 계산하고 식 (3)을 이용하여  $N_i t = 1.5 \times 10^{13}$ ,  $3 \times 10^{13}$  및  $4.5 \times 10^{13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}$  일 때의 입자 크기에 따른 입자 하전율  $(1 - n_0/n_T) \times 100$  값을 나타낸 것이다. 입경이 작아질수록 입자의 하전 비율이 급격히 작아지는 것을 확인할 수 있다.

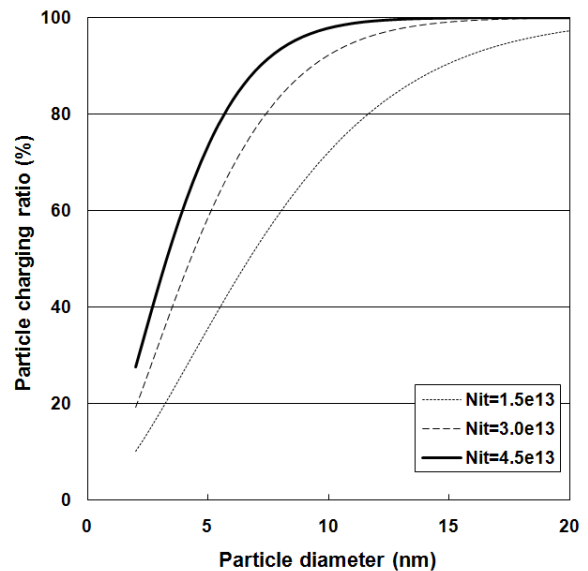


Fig. 2 Theoretical calculation for particle charging ratio at different  $N_i t$  (ion number concentration product charging time)

여기에서 입자 하전율은 전기집진기 내부의 확산에 의한 손실을 무시하고 충분한 전기장이 형성될 때 집진효율을 의미하기도 한다. 10 nm 이하의 나노입자는 전기이동도( $Z_p \sim 2.08 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{Vs}$ )가 매우 크기 때문에 전기집진기 내부(체류시간  $t \sim 0.3 \text{ s}$ , 전기장 세기  $E \sim 1 \times 10^5 \text{ V/m}$ )에서 체류하는 동안 전기집진기의 반경 15 mm 이상을 이동할 수 있기 때문에 하전된 나노입자는 전부 전기집진기 내벽에 집진되기 때문이다. 그렇지만 10 nm 이상의 입자의 경우나 낮은 전기장이 인가된 경우에는 항력이 크고 모빌리티가 상대적으로 작기 때문에 하전된 입자가 전부 집진기에 포집된다고 볼 수 없으므로 입자 하전율을 직접적으로 집진효율에 적용시킬 수 없다. 일례로 20 nm 이상의 입자는 전기이동도가  $0.53 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{Vs}$  이하가 되어 체류시간 동안 전기집진기 반경거리인 15 mm 를 이동하기가 어려워진다.

3.2 실험 결과

Fig. 3 은 본 연구에서 전기집진기 시험에 사용한 NaCl 시험입자의 크기분포를 보여주고 있다. 수송가스의 유량 및 반응온도를 조절하여 10 nm 급의 시험입자를 발생시키도록 제어하였다.

발생된 NaCl 입자는 평균입경 7.0 nm, 기하표준편차 1.27, 총입자개수는  $4.66 \times 10^6 \text{ 개/cm}^3$  이었다.

Fig. 4 는 유속 0.5 m/s 에서 7.6-8.0 kV 의 고전압을 인가했을 때 입자 크기에 따른 집진효율 변화를 나타내고 있다. 모든 크기영역에서 인가전압을 증가시킬수록 집진효율이 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 2 의 이론적인 해석 결과에서 나타낸 것과 같이 10 nm 이하 영역에서 입경이 작아질수록 집진효율이 지속적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 10 nm 이상에서 집진효율이 다소 감소하는 영향을 보였는데 이는 전기이동도가 작은 하전된 일부 입자가 체류시간 동안 집진기 내벽으로 충분히 이동되지 못해 포집되지 못하는 것으로 보인다.

이와 같이 입경이 작아질수록 집진효율이 지속적으로 감소하는 이유는 나노입자의 표면적이 작을수록 이온의 확산 충돌에 의한 나노입자와 불을 확률을 나타내는 나노입자의 하전율이 급격하게 감소하여 나노입자의 평균하전수가 1 이하로 작아지기 때문이다. 한편, 입경이 작아질수록 나노입자의 확산 손실에 의한 집진은 증가하게 되는데 그럼에도 불구하고 집진효율이 지속적으로 감소하는 것은 10 nm 이하의 범위에서 입자의 하전량 감소

가 입자의 확산손실 효과보다 훨씬 지배적인 것을 확인할 수 있다. 표 1 은 이론적 계산을 수행하기 위한 내부 전기장 세기 및 이온농도값을 나타내고 있다.

이온의 개수  $N_i$  와 전기집진기 내부 전기장세기  $E$  는 다음 식을 사용하여 구하였다.<sup>(2)</sup>

Table 1 Data for the theoretical calculation

V (kV)	I (μA)	E (V/m)	$N_i$ ( $\text{m}^{-3}$ )	$N_i t$ ( $\text{m}^{-3}\text{s}$ )		
				0.5 m/s	0.75 m/s	1.0 m/s
7.6	6	1.24e5	2.17e13	1.3e13	0.9e13	0.65e13
7.8	19	1.27e5	6.51e13	3.9e13	2.6e13	1.9e13
8.0	34	1.31e5	1.17e14	7.0e13	4.7e13	3.5e13

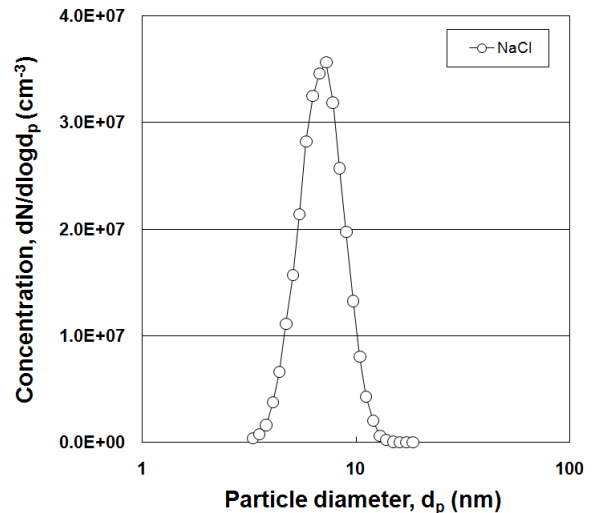


Fig. 3 Size distribution of the generated NaCl nanoparticles

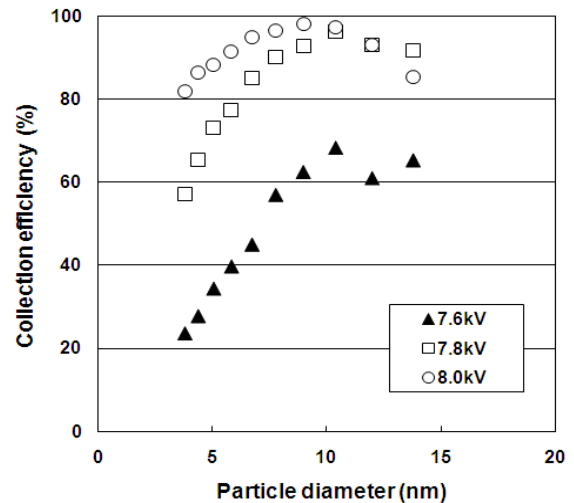


Fig. 4 Collection efficiency of nanoparticles at different applied voltages at the face velocity of 0.5 m/s

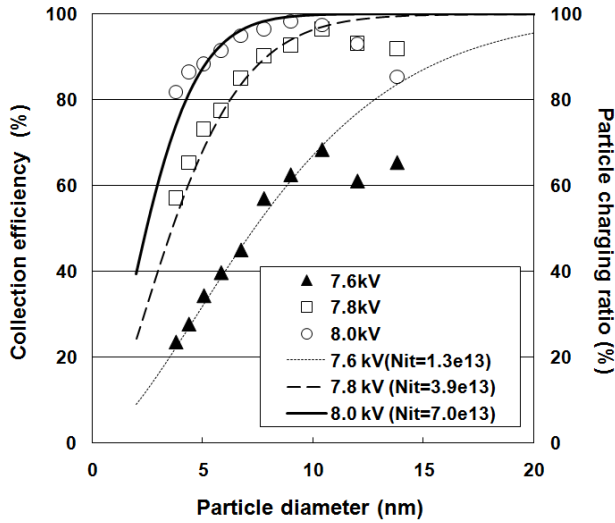


Fig. 5 Comparison of theoretical calculations to the experimental collection efficiencies in the ESP at the face velocity of 0.5 m/s

$$N_i = I / (eZ_iEA) \quad (10)$$

$$E = V / (R_2 \ln(R_2/R_1)) \quad (11)$$

여기에서  $A$  는 전기집진기 집진부 면적,  $R_1$  은 코로나 방전부 반경,  $R_2$  는 전기집진부 집진부까지의 반경을 의미한다.

Fig. 5 는 Table 1 에서와 같이 유속 0.5 m/s 에서  $N_{it}$  값이  $1.3 \times 10^{13}$ ,  $3.9 \times 10^{13}$  및  $7.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}\text{s}$  일 때의 식 (2)-식 (9)를 이용하여 계산된 이론적인 입자 하전율 결과를 Fig. 4 의 인가전압이 7.6, 7.8 및 8.0 kV 일 때의 집진효율 실험값과 비교한 것을 보여 주고 있다. 비교적 이론적 결과가 실험값의 경향을 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다. 10 nm 이상에서 집진효율 실험값이 입자 하전율 이론값보다 다소 낮게 나타난 이유는 앞에서 언급한 것과 같이 일부 하전된 입자가 전기이동도가 작아 충분한 체류시간을 갖지 못해 전기집진기에 포집되지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 6 은 유속 0.75 m/s 일 때의 인가전압별 입경에 따른 집진효율 실험값과  $N_{it}$  값이 Table 1 에서와 같이  $0.9 \times 10^{13}$ ,  $2.6 \times 10^{13}$  및  $4.7 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}\text{s}$  일 때의 이론적 입자하전율의 결과를 비교한 것이다. 10 nm 이하의 입자의 경우 7.8, 8.0 kV 의 충분한 전기장이 인가되었을 때 하전된 입자가 모두 집진기에 포집됨에 따라 집진효율 실험값이 이론적 하전율 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 10 nm 이상의 입자나 전기장의 크기가 약한 7.6

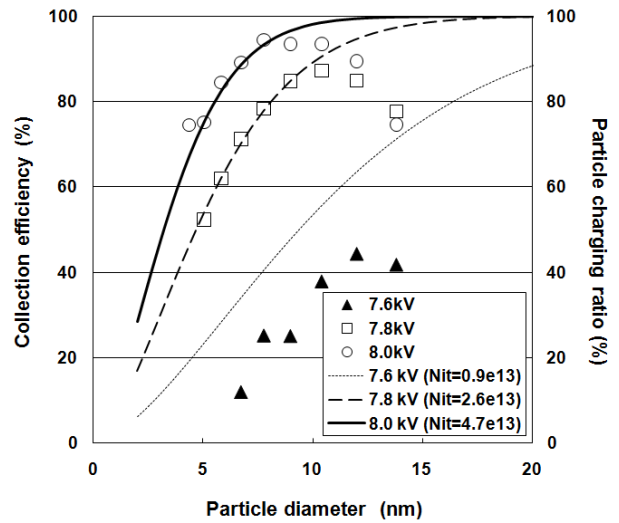


Fig. 6 Collection efficiency of nanoparticles for different applied voltages at the face velocity of 0.75 m/s

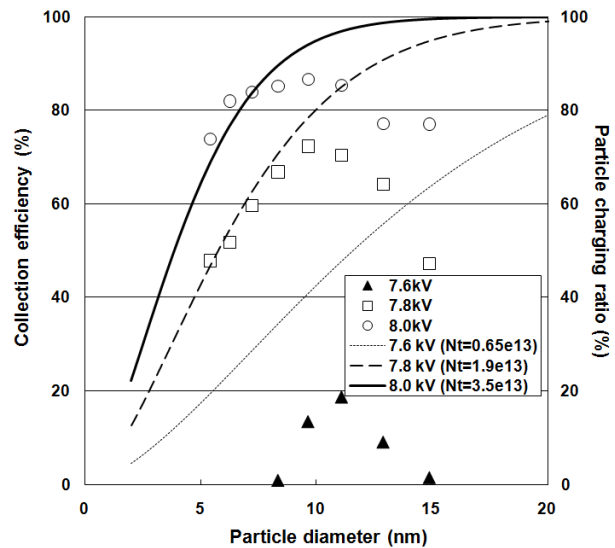
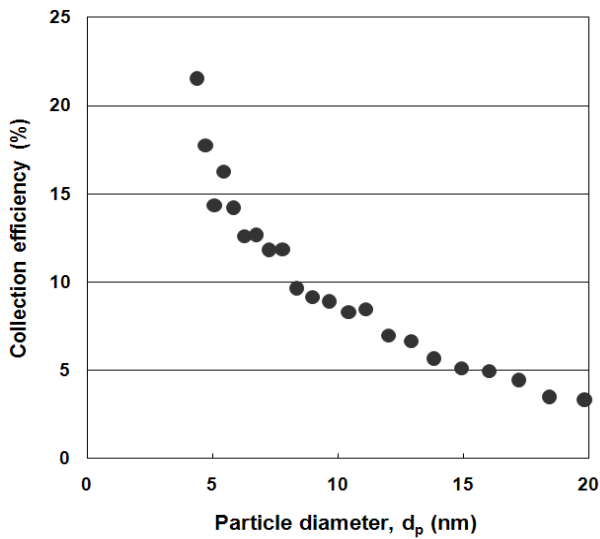


Fig. 7 Collection efficiency of nanoparticles for different applied voltages at the face velocity of 1.0 m/s

kV 인가조건의 경우에는 하전된 입자 일부가 집진기에 포집되지 못함에 따라 이론값보다 실험값이 낮은 특성을 나타내었다.

Fig. 7 은 유속 1.0 m/s 일 때의 인가전압별 집진효율 실험값과  $N_{it}$  값이 유속 0.5 m/s 의 1/2 인  $0.65 \times 10^{13}$ ,  $1.9 \times 10^{13}$  및  $3.5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}\text{s}$  일 때의 이론값을 비교한 결과이다. Fig. 6 과 마찬가지로 입자가 매우 작거나 충분한 전기장이 인가된 조건에서는 이론적인 입자의 하전율이 집진효율과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.



**Fig. 8** Collection efficiency based on diffusion loss of nanoparticles without an applied voltage to the ESP

Fig. 8 은 전기집진기의 전기장을 인가하지 않았을 때의 전기집진기 전·후단에서의 입자농도 비교를 통해 확산에 의한 입자손실을 나타낸 것이다. 입자 크기가 작아질수록 확산 효과가 두드러지므로 확산에 의한 입자 손실 효과가 우수해지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 것과 같이 입경이 작아질 때 확산에 의한 입자 손실 효과 보다 입자의 미하전 비율 증가에 따른 집진 성능 저하가 집진효율을 결정하는데 더 지배적임을 알 수 있다.

따라서, 10 nm 급 나노입자의 경우 확산하전(diffusion charging)에 의한 입자하전 이론을 전기집진기의 하전 및 집진 특성을 해석하는데 유용하게 적용할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 10 nm 급 초미세 나노입자의 전기집진기에서의 정전하전 및 집진 특성을 파악하였다. 나노입자는 입경이 작을수록 미하전 입자의 비율이 증가하므로 전기집진기의 집진효율이 감소하는 경향을 보였다. 즉, 크기가 작아질수록 확산에 의한 집진효과는 증가하였으나 그 효과가 미하전을 증가에 의한 집진 성능 저하에 비해 상대적으로 작아서 전체적으로 집진효율이 감소하였다. 또한, 10 nm 급 나노입자에 대하여 전기집진기의 입자하전율이 단극이온에 의한 입자의 확산하전(diffusion charging)으로 설명한 이론적 결과와 잘

일치함을 알 수 있었다. 따라서, 10 nm 급의 초미세 나노입자의 경우 확산하전에 의한 입자 하전 이론이 전기집진기의 하전특성을 해석하는데 유용하고, 확산에 의한 입자손실효과보다는 입자 하전율이 나노입자의 전기집진기의 집진성능을 좌우하는 지배성분임을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국기계연구원 주요사업(NK163C)의 지원으로 수행되었고, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Zhuang, Y., Kim, Y. J., Lee, T. G. and Biswas, P., 2000, "Experimental and Theoretical Studies of Ultra-fine Particle Behavior in Electrostatic Precipitators," *J. Electrostat.*, Vol. 48, pp. 245~260.
- (2) Kim, H. J., Han, B., Yeo, S. J. and Kim, Y. J., 2010, "Characteristics of an Electrostatic Precipitator for Submicron Particles Using Non-Metallic Electrodes and Collection Plates," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 41, pp. 987~997.
- (3) Kim, H. J., Han, B., Oh, W.S., Hwang, G.D., Kim, Y. J. and Hong, J.H., 2010, "Operational Characteristics of a Dry Electrostatic Precipitator for Removal of Particles from Oxy Fuel Combustion," *Transaction of the KSME B*, Vol. 34, pp. 27~34.
- (4) Kim, H. J., Han, B., Hong, W.S., Shin, W.H., Song, D.K., Jung, S.H., Kim, Y.J., Oh, W.S., Hwang, K.D. and Yoo, S.Y., 2010, "Evaluation of Fine-Particle Removal Performance of Novel ESP with Highly Durable Chargers and Collectors," *Transaction of the KSME B*, Vol. 34, pp. 423~428.
- (5) Reist, P. C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, 2nd ed., McGraw-Hill Inc., New York. pp. 185~189.
- (6) Adach, M., Kousaka, Y. and Okuyama, K., 1985, "Unipolar and Bipolar Diffusion Charging of Ultrafine Aerosol Particles," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 16, pp. 109~123.
- (7) Han, B., Kim, H. J., Kim, Y. J. and Sioutas, C., 2008, "Unipolar Charging of Fine and Ultra-Fine Particles Using Carbon Fiber Ionizers," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 42, pp. 793~800.
- (8) Fuchs, N. A., 1963, "On the Stationary Charge Distribution on Aerosol Particles in a Bipolar Ionic Atmosphere," *Geofis. Pura Appl.* Vol. 56, pp. 185~193.
- (9) Shimada, M., Han, B., Okuyama, K. and Otani, Y., 2002, "Bipolar Charging of Aerosol Nanoparticles by a Soft X-ray Photoionizer," *J. Chem. Eng. Jpn.* Vol. 35, pp. 786~793