

## 2단 평행판 전기집진기의 서브마이크론 입자 포집특성 실험 Experiment on Collection Characteristics of Submicron Particles in Two-Stage Parallel-Plate Electrostatic Precipitators

오 명 도\*, 유 경 훈\*  
M. D. Oh, K. H. Yoo

**Key words :** Charging(하전), Collection(포집), NaCl Aerosol(NaCl에어로졸), Clean Wind-Tunnel(청정풍동), Sampling and Transport System(샘플링 및 전달시스템), Electrical Mobility Detection Technique(전기적 유동을 검출방법)

### Abstract

Experimental data are reported for charging and collection of NaCl aerosols in the 0.03- to 0.2 $\mu$ m-geometric-mean-diameter range in 2-stage parallel-plate electrostatic precipitators. The NaCl aerosols are generated with geometric standard deviation of about 1.74 and particle generation rate of about 10<sup>9</sup> particles/sec by the constant output atomizer and injected into the air flow in the clean wind-tunnel. The 2-stage parallel-plate electrostatic precipitator installed in the test section of the wind-tunnel is operated with a positive corona discharge. The NaCl aerosols in the channel flow are sampled and transported to the aerosol particle number concentration measurement system by using the isoaxial sampling and transport system constructed based on the Okazaki and Willeke design. The aerosol particle number concentration measurement system measures the size distribution of submicrometer aerosols by an electrical mobility detection technique. It is confirmed from comparing the measured collection efficiencies in this study and the predicted ones by our previous theoretical analysis that the predicted collection efficiencies agree well with the experimental ones. It is also found from the comparison that below about 0.02 $\mu$ m all particles are not charged and the uncharged particles are not collected, and consequently 2-stage parallel-plate electrostatic precipitators are not suitable for that particle size range.

### 기 호 설 명

$(C_m)_i$  : i입자크기채널에 대한 전기적 효과의 비작동시의 시험부 출구면에서의 에어로졸 입자수농도(particles/m<sup>3</sup>)  
 $(C)_i$  : i입자크기채널에 대한 전기적 효과의 작동시의 시험부 출구면에서의 에어로졸 입자수농도(particles/m<sup>3</sup>)

$$(C_m)_i : = \sum_i (C_m)_i$$

$$(C)_i : = \sum_i (C)_i$$

$i$  : 측정입자크기 채널

$Kn$  : Knudsen수(= $\lambda/r_p$ )

$r_p$  : 입자의 변경(m)

$Re$  : 집진셀내의 유동 Reynolds수(= $2\rho UW_d/\mu$ )

$U$  : 평균공기속도(m/s)

\* 생산기술연구원 기계·소재개발센터

- $V_1$  : 하전부 인가전압(kV)
- $V_2$  : 집진부 인가전압(kV)
- $W_2$  : 집진셀의 고전압판과 접지판간의 거리(m)
- $\lambda$  : 양의 공기이온의 평균자유행로(=0.0145  $\mu$ m)
- $\eta$  : 집진효율
- $\mu$  : 공기의 점성계수(kg/m-s)
- $\rho$  : 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

### 1. 서 론

중공업 분야의 산업발전에 따라 대부분의 금속, 기계 조립공장에서의 용접작업 및 각종 가공작업이 매년 확대되고 있으며, 이와 더불어 발생되고 있는 다양한 성분과 형태를 가진 흠(fume), 미스트(mist) 등과 같은 오염입자들을 대기로 확산되기 전에 정화시키기 위해서는 발생지점에서 바로 제거시키는 국소청정시스템(source capture system)이 가장 효과적이다. 이러한 목적에 부합될 수 있는 가장 효율적인 공기정화기는 소형 2단 전기집진기이다. 2단 전기집진기는 입자의 하전과 포집이 각각 독립된 공간에서 발생되므로 입자들은 먼저 하전부에서 코로나방전으로 발생된 공기이온들에 의해 하전되고 집진부에서 정전기장에 의한 쿨롱력에 의해 포집된다.

전기집진기의 가장 중요한 특성은 집진효율이다. 특히 2단 전기집진기에서의 집진효율을 정확히 산출하기 위해서는 입자의 하전과 포집이 직접적으로 연결되어 고찰되어야 한다. 2단 전기집진기의 집진부에 적용할 수 있는 포집이론들<sup>1-7)</sup>은 이제 만족할 만한 수준에 와 있고, 하전부와 관련된 하전이론들<sup>8-13)</sup>은 엄격한 의미에서의 와이어-판 형상의 하전부에서의 입자하전 상황에 적용하기에는 다소 미흡하나<sup>14)</sup> 연속체 입자하전특성영역에서는 어느 정도 적용이 가능하다. 그러나, 아직까지 하전부와 집진부가 직접적으로 연결된 체계적인 이론적<sup>14)</sup> 또는 실험적<sup>15)</sup> 연구를 찾아보기 힘들다. 또한, 이제까지의 전기집진기와 관련된 거의 모든 실험들<sup>6, 7, 15)</sup>이 0.1 $\mu$ m 이상의 입자크기영역에만 국한되어 있고 그 이하의 아주 미세한 입자영역에서의 집진특성실험이 결여되어 있다. 따라서 본 연구에서는 하전상황이 어느정도 천이 하전특성 입자크기영역

( $Kn > 0.1-0.3$ )<sup>16, 17)</sup>에 속하는 0.1 $\mu$ m( $Kn=0.29$ )보다 작은 아주 미세한 입자크기 영역에서의 양의 코로나(positive corona)로 작동되는 2단 평행판 전기집진기의 집진특성에 관한 실험을 수행하고 이를 이론적 예측치들<sup>14)</sup>과 비교, 검토하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험장치

본 연구를 위해서 제작된 실험장치의 구성은 크게 청정풍동부, 입자 발생부, 2단 평행판 전기집진기 하전 및 포집부, 입자 샘플링 및 전달부, 입자농도 측정부등 5부분으로 되어 있다.

Fig.1에 도시된 청정풍동부의 설계 제작은 Leonard et al.<sup>6)</sup>, Kihm<sup>7)</sup>, Morel<sup>18, 19)</sup>의 연구에 근거하였다. 풍동노즐은 입구총횡비(aspect ratio) 약 7.5, 면적축소비(contraction ratio) 약 7.6으로 높이는 일정하고 폭만 감소되는 2차원 노즐(two-dimensional nozzle)로서 0에서 10m/s사이의 평균속도, 0.5%이하의 난류강도, 균일도 0.97%이하의 기류를 시험부로 공급한다. 풍동에 연결된 2단 평행판 전기집진

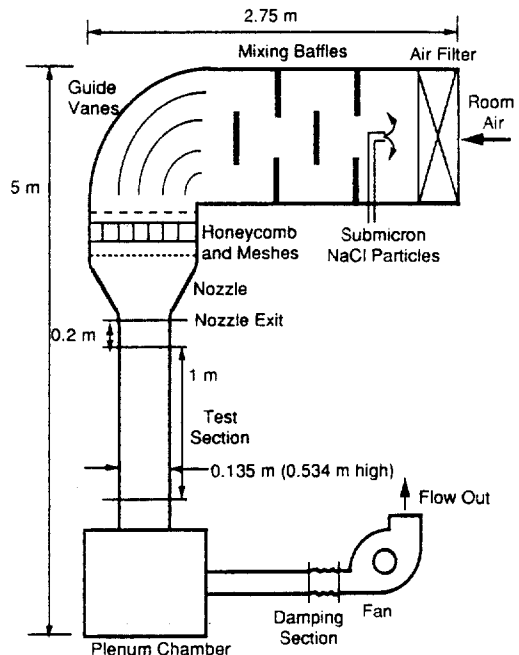


Fig.1 Schematic diagram of the clean wind tunnel for the ESP performance test

시험부는 13.5cm×53.4cm의 횡단면을 가지고 있다. 쉘(fan)에 의해 발생하는 기계적 진동 및 유동교란들이 상류로 전파하는 것을 최소화하기 위하여 완충부(damping section)와 플레넘챔버(plenum chamber)를 시험부의 하류에 설치하였다.

입자발생장치는 Fig.2에 도시된 바와 같다. 사용되는 NaCl수용액의 농도에 따라 0.1 $\mu$ m이하의 기하평균지름(geometric mean diameter)을 갖는 NaCl 에어로졸을 발생시켰으며 이 때의 기하표준편차(geometric standard deviation)는 약 1.74로 나타났다. 발생한 NaCl 에어로졸들은 15cm 두께의 HEPA 필터(0.3 $\mu$ m DOP 투과율 0.015%)를 통하여 흡입되는 청정공기 유동의 역류방향으로 주입되어 희석, 혼합된 후 풍동노즐부를 통과하여 시험부로 공급된다. 제작된 청정풍동의 배경농도는 본 연구의 관심영역내에서 최대 6×10<sup>5</sup> particles/m<sup>3</sup>을 제외하면 대부분 10<sup>5</sup> particles/m<sup>3</sup>이하로 유지되어 평균적으로 시험부로 공급되는 총입자농도값인 10<sup>9</sup> particles/m<sup>3</sup>에 비해 1/10,000 이하로 제어되었다.

실험수행시의 2단 평행판 전기집진기의 하전부와 집진부, 고전압전원공급장치, 에어로졸입자 발생 및 샘플링에 대한 도식을 Fig.3에 나타내었다. 상류와 하류의 에어로졸입자 샘플링 지점은 각각 풍동노즐

출구면과 시험부의 출구면의 수평중심선을 균등분할한 세개의 지점이고 각 위치마다 1회의 에어로졸입자 농도분포측정이 이루어졌다. 노즐의 출구면은 공급되는 NaCl에어로졸의 정확한 기하평균지름의 산출에 사용되고 시험부 출구지점은 집진기의 집진특성의 산출에 사용되었다. 풍동내의 공기유동으로부터 에어로졸을 추출하는 에어로졸 샘플링 및 전달시스템은 Fig.4에 도시되어 있고 그림의 샘플링 프로우브는 Okazaki and Willeke<sup>20</sup>의 이론에 따라 Willeke-type 샘플링 프로우브(Sampling probe)를 제작하였다.

에어로졸입자 샘플링 및 전달시스템에 의해 수송된 에어로졸은 Fig.5에 도시된 에어로졸입자 갯수농도측정장치의 다분산 샘플에어로졸(polydisperse-

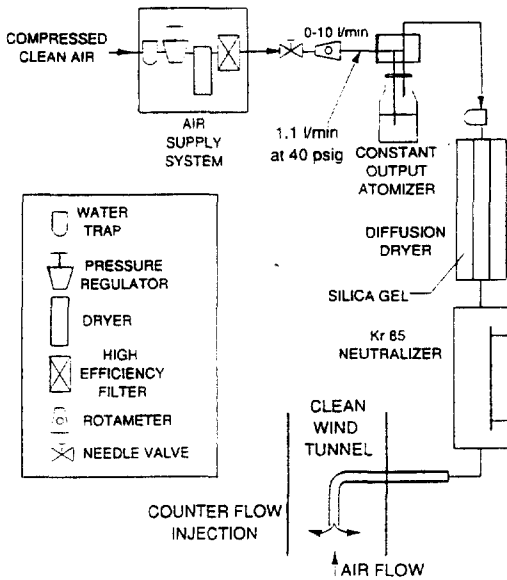


Fig.2 Schematic diagram of system used for generating NaCl submicron aerosols

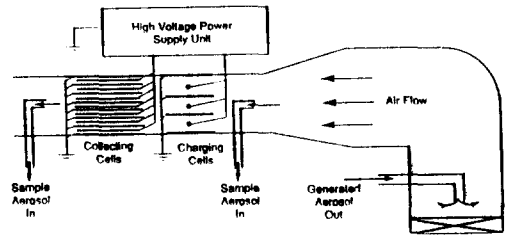


Fig.3 Schematic diagram of the electrostatic precipitator performance test

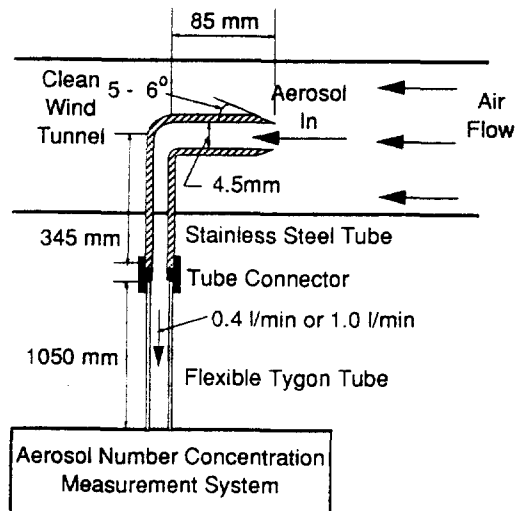


Fig.4 Schematic diagram of aerosol sampling and transport system

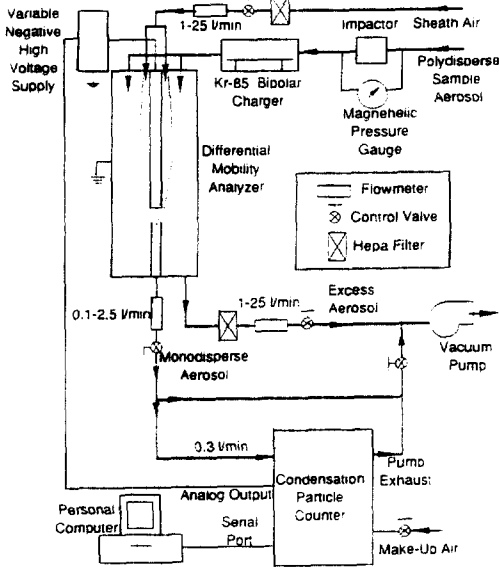


Fig.5 Schematic diagram of aerosol number concentration measurement system

sample aerosol) 입구로 유입된다. 본 연구에 사용된 에어로졸입자 수농도분포 측정장치는 전기적 유동을 검출방법(electrical mobility detection technique)을 이용하여 0.01-1 $\mu$ m의 입자크기영역을 총 32개의 자연로그척도로 균등분할하여 측정할 수 있다. 사용되는 샘플링유량, 임팩터의 종류에 따라 입자크기 측정가능구간이 정해지므로 본 연구에서는 샘플링유량을 0.4 l/min, 1.0 l/min의 두가지로, 임팩터의 노즐직경은 0.0457cm로 선택하여 측정구간을 0.014-0.631 $\mu$ m와 0.01-0.337 $\mu$ m로 선정하였다.

이러한 측정구간내에서 NaCl수용액의 농도에 따라 적절히 선택하여 모든 실험의 경우에 대해 발생된 에어로졸 총입자갯수의 거의 99% 이상이 측정되도록 하였다. 이때 보호공기(sheath air)는 항상 다분산 샘플에어로졸 유량의 10배가 흐르도록 하였고 단분산 에어로졸(monodisperse aerosol) 유량과 다분산 에어로졸(polydisperse aerosol) 유량은 항상 같게, 보호공기 유량과 과다에어로졸(excess aerosol)유량도 항상 같게 유지시켰다. 이러한 유량들의 조절은 Fig.5에 도시된 총 5개의 제어밸브로 이루어졌다. RS-232C 직렬통신포트로 연결된 퍼스널컴퓨터는 입자수농도값을 전송받아 CPC의 카운팅효율을 보정한 뒤 저장한다.

## 2.2 실험조건 및 방법

풍동내의 공기유동에 부유되는 NaCl 입자들의 실제 갯수농도를 정확히 구하기 위해서는 Fig.4의 에어로졸 샘플링 및 전달시스템의 흡입효율(aspiration efficiency)과 전달효율(transmission efficiency)을 Fig.5의 에어로졸 입자측정장치로부터 측정된 입자수농도분포에 보정하여야 한다. 이러한 에어로졸 샘플링 및 전달시스템에 관한 연구가 지금까지 여러 연구자들<sup>21-28)</sup>에 의해 이루어져 왔고, 본 연구에서는 흡입효율은 Belyaev and Levin<sup>21)</sup>의 이론을, 90° 곡부를 직선으로 가정했을 때의 전달효율은 Okazaki and Willeke<sup>20)</sup>의 이론을 적용하여 보정하였다. 90° 곡부에서의 충돌효율(impaction efficiency)은 Cheng and Wang<sup>28)</sup>의 이론으로부터 본 연구의 조건에서는 모든 입자크기에 대해 0이 얻어져 고려할 필요가 없음을 확인하였다.

전기집진기로 유입되는 NaCl 입자 에어로졸들의 정확한 특성치들을 집진성능 분석 실험을 수행하기 전에 검토하였다. 사용된 NaCl 수용액의 농도와 노즐출구에서 측정된 발생에어로졸 입자의 기하평균지름과의 관계를 Fig.6에 나타내었다. 둘의 관계는 상용로그 스케일상에서 거의 직선관계를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이때의 에어로졸입자 농도분포특성을 살펴보기 위하여 대표적인 0.01과 10g/l의 NaCl 수용액의 입자농도분포를 Fig.7에 도시하였다. 그림에서 y는 샘플링 프로브가 삽입되는 벽면의 상대벽면으로부터의 수직거리이고 w는 풍동채널의 폭이다. 그림으로부터 두 경우 모두 거의 로그정규분포(log-normal distribution)를 이루고 있음을 알 수 있다. 그리고 NaCl 수용액의 농도에 따른 기하표준편차의 변화를 Fig.8에 도시하였고 평균적으로 약 1.74의 수준을 유지하고 있음을 알 수 있다. Fig.6의 기하평균지름들은 Fig.7과 같은 세개의 입자농도분포들의 각 경우에 대한 기하평균지름들을 평균하여 얻어졌고 차례로 0.0324, 0.0668, 0.0777, 0.0934, 0.108, 0.123, 0.157 $\mu$ m이다.

2단 평행판 전기집진기의 집진특성실험을 위한 제원 및 작동조건은 Table 1에 수록되어 있다. 전기집진기의 집진효율의 산출을 위하여 기계적인 구조에 따른 영향을 배제하고 순수한 전기적 영향만을 고려하기 위하여 전술한 바와 같이 시험부출구에서 측정하였고 다음의 식이 사용되었다.

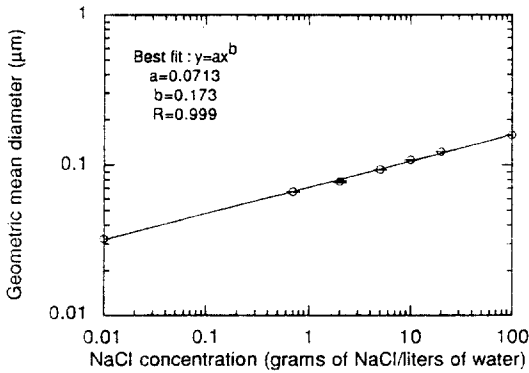


Fig.6 Variation of geometric mean diameter of the generated aerosol at the outlet of the nozzle

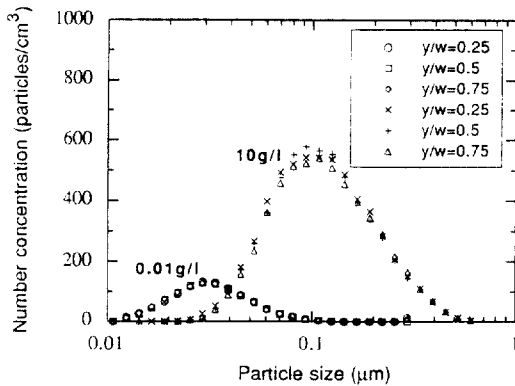


Fig.7 Number concentration distributions at the outlet of the nozzle with NaCl concentrations of 0.01g/l and 10g/l

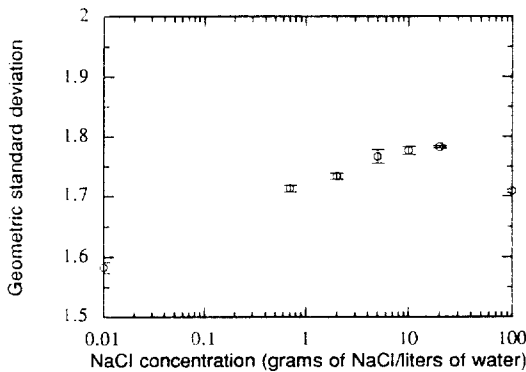


Fig.8 Variation of the geometric standard deviation at the outlet of the nozzle with respect to NaCl concentration

Table 1 Nominal conditions of 2-stage parallel-plate electrostatic

Width of charging cell(mm)	45
Length of charging cell(mm)	60
Applied voltage of corona wire(kV)	12
Width of collecting cell(mm)	5.9
Length of collecting cell(mm)	197
Applied voltage of high voltage plate(kV)	6
Velocity of gas(m/s)	3
Radius of wire(mm)	0.1
Temperature of air(K)	293
Pressure of air(atm)	1
Ion mobility(m <sup>2</sup> /V-s)	1.4×10 <sup>-4</sup>
Dielectric constant of particles(dimensionless)	6.1
Inlet particle concentration(particles/m <sup>3</sup> )	1×10 <sup>9</sup>
Viscosity of air(kg/m-s)	1.8×10 <sup>-5</sup>

$$\eta = \frac{\sum_i \eta_i (C_m)_i}{\sum_i (C_m)_i} = \frac{(C_m)_i - (C_e)_i}{(C_m)_i}$$

여기서  $i$ 는 측정입자크기채널, 각 채널에 대한 집진효율  $\eta_i = \frac{(C_m)_i - (C_e)_i}{(C_m)_i}$ ,  $(C_m)_i$ 와  $(C_e)_i$ 는 각각 전기적 효과가 작동하지 않았을 경우의 에어로졸 총입자농도와  $i$ 채널의 농도이고,  $(C_e)_i$ 와  $(C_e)_i$ 는 전기적 효과가 작동했을 경우의 에어로졸 총입자농도와  $i$ 채널의 농도이다. 집진특성실험의 경우에서도 시험부 출구면의 수평중심선의 균등분할한 세개의 위치에서 에어로졸 입자농도분포를 측정하고 전술한 바와 같이 흡입효율과 전달효율을 각각의 입자채널에 보정하여 최종갯수농도분포들을 구한 뒤 기하평균지름, 총입자농도와 같은 특성치들이 각각의 보정된 3개의 분포들로부터 평균되어 산출되었다.<sup>20)</sup>

### 3. 실험 결과 및 검토

#### 3.1 이론 예측치들과의 비교

Table 1에 수록된 제원 및 작동조건에 대하여 실험결과들로부터 산출한 집진효율들을 Fig.9에 도

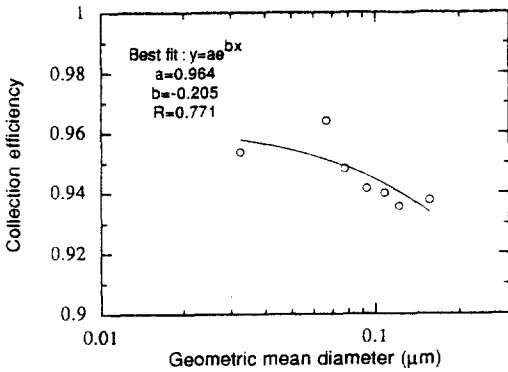


Fig.9 Collection efficiencies of the electrostatic precipitator with the reference operational conditions

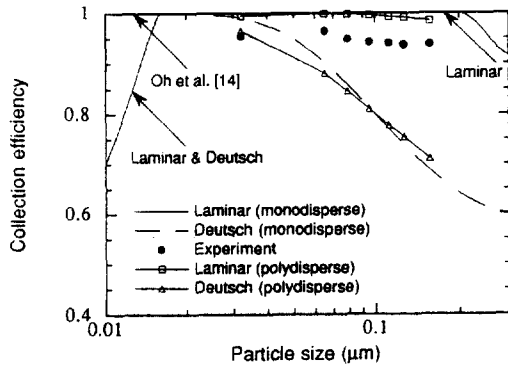


Fig.10 Comparison of the calculated and experimental collection efficiencies for the reference operational conditions

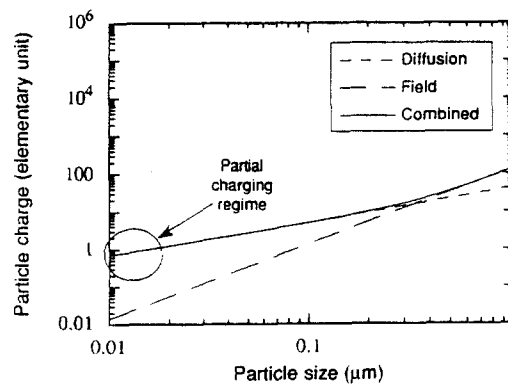


Fig.11 Variations of the combined particle charge with respect to particle size[14]

시하였다. 그림에서  $x$ 축의 기하평균지름들은 차례로 0.0324, 0.0668, 0.0777, 0.0934, 0.108, 0.123, 0.157  $\mu\text{m}$ 이다. 대부분의 집진효율값들은 기하평균지름이 감소함에 따라 약 93%에서 97%사이에서 증가하고 있으나 0.0324 $\mu\text{m}$ 에서 갑자기 감소함을 알 수 있다. 오명도등<sup>14)</sup>의 이론해석에 의하면 0.0324 $\mu\text{m}$ 에서도 계속적으로 증가하여야 한다.

이를 분석하기 위하여 오명도등<sup>14)</sup>의 이론해석결과들과 본 연구의 실험결과들을 함께 Fig.10에 도시하였다. 먼저 Fig.10에서 단분산적으로 산출된 이론적인 층류 효율곡선과 Deutsch 집진효율곡선을 살펴보면 입자크기 0.01 $\mu\text{m}$ ~0.02 $\mu\text{m}$  근처에서 갑자기 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 영역은 오명도등<sup>14)</sup>의 연구에서 발견하지 못하였던 부분적 하전영역으로서 Fig.11에서 알 수 있듯이 입자평균 하전량이 기본전하 1보다 작게 하전된 영역에 해당한다. 입자평균전하량이 기본전하 1보다 작다는 것은 하전부에 유입된 입자들의 일부는 전혀 하전되지 않음을 의미하고 이렇게 하전되지 않는 입자는 이론적으로 집진셀에서 포집될 수 없다. 오명도등<sup>14)</sup>의 이론해석에서는 이러한 입자크기영역이 층류효율곡선이나 Deutsch효율곡선이나 모두 100%의 집진효율로 예측되었으나, Fig.10은 이러한 영역에서 부분하전을 고려하여 두 경우의 이론적 집진효율이 동일하게 감소된 것을 수정하여 나타낸 것이다. 수정된 이론적 집진효율값들에 본 연구의 각각의 다분산적인 유입 NaCl 에어로졸의 입자크기분포를 고려한 종합적인 집진효율을 Fig.10에 또한 도시하였다. 대부분의 실험치들이 크기분포가 고려된 두 극단의 종합집진효율값 사이에 위치하고 있으나 기하평균지름 0.0324 $\mu\text{m}$ 에서의 실험값은 Deutsch모델에 근거한 하한 종합효율값 근처 바로 아래에 위치하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 이와같이 0.01 $\mu\text{m}$ 와 0.02 $\mu\text{m}$  사이의 갑작스런 집진 효율 감소 영향이 기하평균지름 0.0324 $\mu\text{m}$ 인 경우의 다분산적(polydisperse)으로 발생된 NaCl 입자들중에서 이 크기영역에 속하는 입자들에게 나타난 것으로 여겨지고, 실험적으로 관찰된 부분하전 입자크기영역이 실제적으로는 Fig.10에서 이론적으로 예측된 영역보다 더 큰 입자영역까지 확장되어 있음을 짐작할 수 있다.

이러한 집진효율 감소영역의 존재에 대한 또한



나의 실험적인 자료 제시를 위하여 Fig.12에 전기 집진기 작동시와 비작동시의 시험부 출구에서의 기하평균지름의 변화를 도시하였다. 예상하였던 대로 입자크기 0.0668 $\mu\text{m}$ 보다 입자크기가 큰 영역에서는 입자크기가 커짐에 따라 집진효율이 감소하므로 큰 입자들이 제거되지 못하고 남아 있기 때문에 집진기 통과 후의 기하평균지름이 큰 쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 그림에서 보면 0.1g/l와 0.2g/l 사이에서 두개의 적합곡선(fitting curve)이 서로 교차되어 교차점보다 작은 영역에서는 전기 집진기가 작동한 후의 기하평균지름이 작동전의 0.032 $\mu\text{m}$ 의 경우보다 작은 쪽으로 이동했음을 알 수 있다. 그 이유는 전술한 바와 같이 0.01~0.02 $\mu\text{m}$  근처의 부분적 하전특성영역의 작은 입자들이 상당수 제거되지 못하고 남아 있기 때문이다. 따라서 Fig.9에서 0.0324 $\mu\text{m}$ 의 집진효율이 다시 감소한 것은 0.01 $\mu\text{m}$ 와 0.02 $\mu\text{m}$  근처의 아주 미세한 NaCl 입자들이 100% 전부 하전되지 않음을 시사하고 있는 것이다. 이러한 결과로 미루어 2단 평행판 전기집진기는 0.01 $\mu\text{m}$  근처의 아주 미세한 입자들의 부분적 하전특성으로 인하여 집진효율이 감소하는 것으로 판단된다.

공기평균유속이 1.9m/s, 4.1m/s일 때의 집진효율 값들을 Fig.13, 14에 각각 도시하였다. 그림에서 실험치들의 기하평균지름은 차례로 0.0324, 0.0658, 0.0934, 0.123, 0.157 $\mu\text{m}$ 이다. Fig.10의 3m/s의 경우와 유사하게 대부분의 입자크기들에서 이론해석치들의 경향과 잘 일치하고 있으나 역시 0.0324 $\mu\text{m}$ 에서의 집진효율의 집진효율영역 외부아래로의 이탈 경향이 보이고 Fig.14의 평균공기속도 4.1m/s의 경우에는 더욱 증폭된 양상으로 나타나 입자크기 분포를 고려한 이론적인 종합집진효율 하한값과의 차이가 확연히 드러났음을 알 수 있다. 이는 실제로 부분하전영역의 범위가 이론적으로 예측된 수준보다 넓어서 더 큰 입자영역까지 미치고 있다는 것을 시사하는 것이다. 본 연구의 실험대상 입자 크기영역은 서론에서 전술한 바와 같이 천이하전 특성영역이며 이 영역은 확산하전의 지배를 받고 있다. Fig.11의 입자하전량의 산출에 있어 오명도등<sup>14)</sup>은 엄격히 연속체특성영역에서의 확산하전 상황에 적용될 수 있는 Fuchs<sup>8, 10)</sup>의 모델을 천이영역까지 확대 적용하였기 때문에 입자의 하전량이 다소

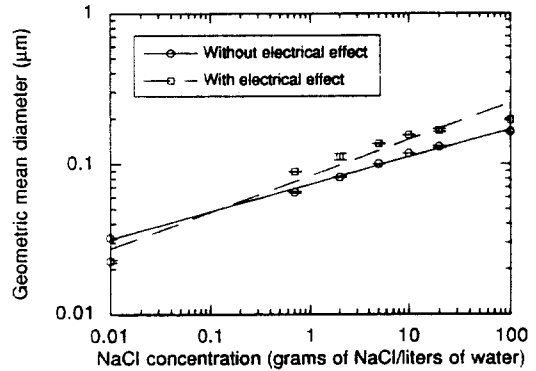


Fig.12 Electrical effect on geometric mean diameter

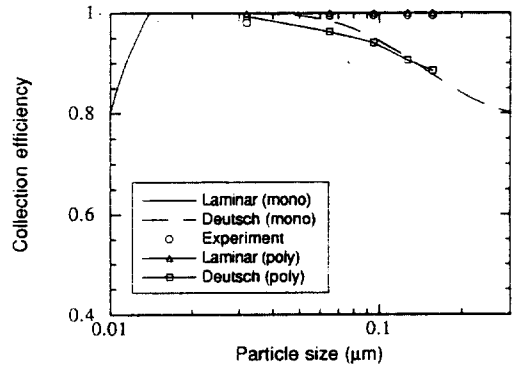


Fig.13 Comparison of the calculated and experimental collection efficiencies for air velocity=1.9m/s

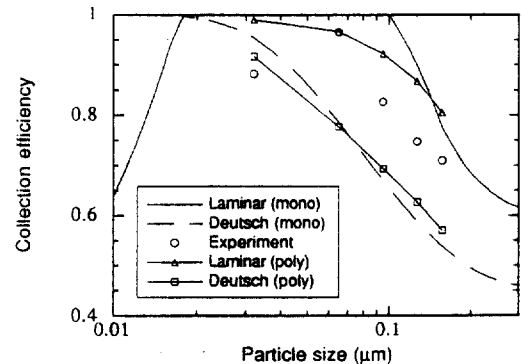


Fig.14 Comparison of the calculated and experimental collection efficiencies for air velocity=4.1m/s

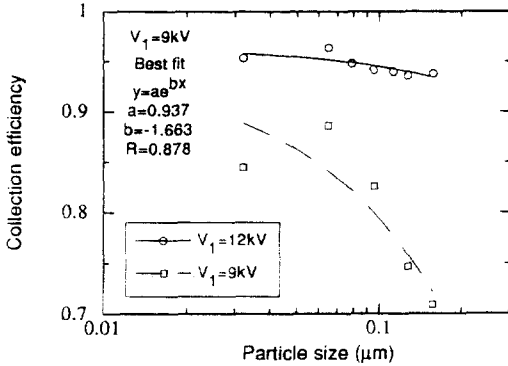


Fig.15 Effect of the applied voltage of the charging cell on collection efficiency

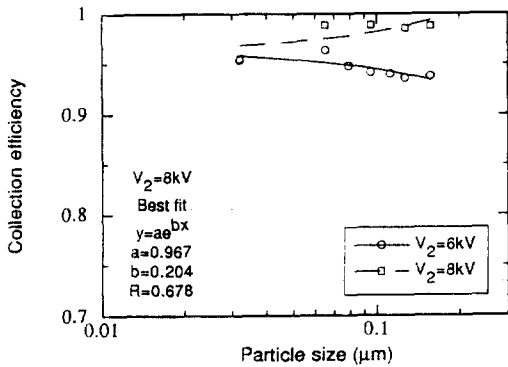


Fig.16 Effect of the applied voltage of the collecting cell on collection efficiency

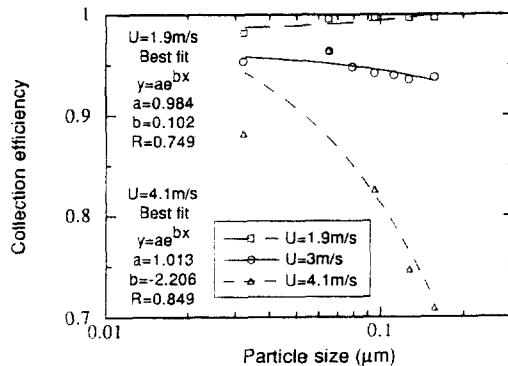


Fig.17 Effect of inlet air velocity on collection efficiency

과대에측된 것으로 판단된다. 따라서 하전셀에서의 실제적인 입자의 하전량은 이보다 작으며 천이영역과 연속체 특성영역의 경계부근(0.1 $\mu$ m 근처)은 어느 정도 Fuchs의 모델을 통하여 예측할 수 있다고 볼 수 있으나 천이영역의 특성을 완전히 회복한 적어도 0.01~0.02 $\mu$ m 근처의 입자크기영역은 순수한 천이특성영역에 적용될 수 있는 확산하전모델을 채택해야 할 것으로 판단된다.

Fig.10, 13, 14의 집진셀내에서의 유동 Re수를 구해보면 각각 2280, 1444, 3116으로 얻어지고 난류로의 천이가 시작되는 2300<sup>30)</sup>과 비교해 볼 때 유동 Re수가 증가함에 따라 층류효율곡선으로부터 점점 떨어져서 난류유동장을 가정한 Deutsch효율곡선으로 다가감을 알 수 있다. 이로부터 집진셀에서의 유동 Re수의 크기를 통하여 집진효율값을 예측할 수 있는 이론적인 집진모델의 선택을 결정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

### 3.2 설계변수들의 영향

하전셀의 코로나와이어의 인가전압의 영향에 대한 실험결과를 Fig.15에 도시하였다. Fig.15를 보면 하전셀 인가전압이 감소하면 집진효율이 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 하전셀에서의 입자의 하전량이 감소하기 때문이다. 3.1절에서 고찰했던 0.0324 $\mu$ m에서의 집진효율 감소경향이  $V_1=12kV$ 보다  $V_1=9kV$ 에서 더욱 증폭되었으며  $V_1=9kV$ 의 경우 입자크기가 커짐에 따라 집진효율의 감소기울기가 더욱 가파름을 알 수 있다.

집진셀의 고전압판의 인가전압의 영향에 대한 실험결과를 Fig.16에 도시하였다. Fig.16을 보면 인가전압이 증가함에 따라 집진셀에서의 전기장의 강도가 증가하여 하전입자에 작용하는 정전기력에 의한 집진판으로의 횡단속도(migration velocity)가 커지게 되고 그 결과 집진효율이 증가함을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 0.0324 $\mu$ m에서의 집진효율의 감소경향이 보인다.

집진기 통과공기의 평균속도의 영향에 대한 실험결과를 Fig.17에 도시하였고 이는 3.1절에서 이미 논의하였다. Fig.17을 보면 평균속도가 감소할수록 평균집진효율이 증가함을 알 수 있다. 이는 하전셀에서의 하전시간의 증가로 인한 입자의 하전량의 증가 하전입자의 집진셀에서의 체류시간의 증가,



난류혼합효과의 감소로 인한 층류형 포집의 회복에 기인한 것이다. 평균속도가 빨라질수록 실험영역에서 입자크기가 커짐에 따라 집진효율의 감소기울기가 더욱 급해짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

0.3 $\mu$ m이하의 미세한 입자크기영역의 NaCl입자들을 이용하여 2단 평행판 전기집진기의 집진특성 실험을 수행하고 이로부터 얻어진 실험결과들을 이론해석<sup>14)</sup> 예측치들과 비교함으로써 다음과 같은 결론들을 얻었다.

1) 오명도동<sup>14)</sup>의 이론은 0.3 $\mu$ m이하의 입자크기 영역에서도 실험결과들과 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

2) 오명도동<sup>14)</sup>의 이론모델에 의한 2단 평행판 전기집진기의 집진효율의 산출에 있어 연속체 특성영역의 확산전하모델인 Fuchs 모델의 채택으로 인하여 적어도 0.01~0.02 $\mu$ m 근처에서는 실제의 경우보다 집진효율을 과대예측할 것으로 판단된다.

3) 소형 2단 평행판 전기집진기는 Table 1과 같은 정격 작동조건하에서 작동할 때 0.03 $\mu$ m~0.2 $\mu$ m의 입자크기영역에서 약 93%에서 97%사이의 집진효율을 보였다.

4) 기하평균지름 0.0324 $\mu$ m에서는 집진효율이 갑자기 감소함을 보였으며 이는 0.01 $\mu$ m~0.02 $\mu$ m 근처의 초미세 입자크기영역에서의 집진효율이 급격히 감소함을 시사하는 것이고 이는 부분적인 입자하전특성 때문인 것으로 판단된다.

5) 집진셀내의 유동 Re수를 통하여 이론적인 집진효율을 산출하기 위한 층류효율모델과 Deutsch효율모델의 선택을 결정하는 것이 타당함을 밝힐 수 있었다.

6) 본 연구에서 살펴본 설계변수인 하전부, 집진부 인가전압과 유입공기속도가 집진효율에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Deutsch, W., 1992, "Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator", *Annalen der Physik*, Vol.68, pp.335-344.
2. White, H.J., 1963, *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
3. Cooperman, P., 1971, "A New Theory of Precipitator Efficiency", *Atmospheric Environment*, Vol.5, pp.541-551.
4. Zhibin, Z. and Guoquan, Z., 1992, "New Model of Electrostatic Precipitation Efficiency Accounting for Turbulent Mixing", *J. Aerosol Science*, Vol. 23, No.2, pp.115-121.
5. Leonard, G.L., Mitchner, M. and Self, S.A., 1980, "Particle Transport in Electrostatic Precipitators", *Atmospheric Environment*, Vol.14, pp.1289-1299.
6. Leonard, G.L., Mitchner, M. and Self, S.A., 1982, "Experimental Study of the Effect of Turbulent Diffusion on Precipitator Efficiency", *J. Aerosol Science*, Vol.13, No.4, pp.271-284.
7. Kihm, K.D., 1987, *Effects of Nonuniformities on Particle Transport in Electrostatic Precipitators*, Topical Report T-258, Stanford University.
8. Fuchs, N.A., 1947, "The Charges on the Particles of Aerocolloids", *Izv. Akad. Nauk. SSSR, Ser. Geogr. Geofiz.*, Vol.11, pp.341-348.
9. White, H.J., 1951, "Particle Charging in Electrostatic Precipitation", *AIEE Trans.*, Vol.70, pp.1186-1191.
10. Liu, B.Y.H. and Pui, B.Y.H., 1977, "On Unipolar Diffusion Charging of Aerosols in the Continuum Regime", *J. Colloid and Interface Science*, Vol.58, pp.142-149.
11. Liu, B.Y.H. and Kapadia, A., 1978, "Combined Field and Diffusion Charging of Aerosol Particles in the Continuum Regime", *J. Aerosol Science*, Vol. 9, pp.227-242.
12. Fjeld, R.A. and McFarland, A.R., 1989, "Evaluation of Select Approximations for Calculating Particle Charging Rates in the Continuum Regime", *Aerosol Science and Technology*, Vol.10, pp.535-549.
13. Han, R.J. and Gentry, J.W., 1993, "Field and Combined Diffusional and Field Charging of Fibrous Aerosols", *Aerosol Science and Technology*, Vol.18, pp.165-179.

1. Deutsch, W., 1992, "Bewegung und Ladung der Elektrizitätsträger im Zylinderkondensator", *An-*

14. 오명도, 유경훈, 이준식, 1994, "2단 평행판 정전식 집진기에서의 입자 하전 및 포집", 대한기계학회 논문집, 제8권, 제2호, pp.432-445.
15. Hautanen, J., Janka, K., Keskinen, J., Lehtimäki, M. and Kivistö, T., 1986, "Optimization of Filtration Efficiency and Ozone Production of the Electrostatic Precipitator", *J. Aerosol Science*, Vol.17, pp.622-626.
16. 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.
17. Romay, F.J. and Pui, D.Y.H., 1992, "On the Combination Coefficient of Positive Ions with Ultrafine Neutral Particles in the Transition and Free-Molecule Regimes", *Aerosol Science and Technology*, Vol.17, pp.134-147.
18. Morel, T., 1977, "Design of Two-Dimensional Wind Tunnel Contraction", *J. Fluids Engineering*, June, pp.371-378.
19. Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions", *J. Fluids Engineering*, June, pp.225-233.
20. Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, "Transmission and Deposition Behavior of Aerosols in Sampling Inlets", *Aerosol Science and Technology*, Vol.7, pp. 275-283.
21. Belyaev, S.P. and Levin, L.M., 1974, "Techniques for Collection of Representative Aerosol Samples", *J. Aerosol Science*, Vol.5, pp.325-338.
22. Durham, M.D. and Lundgren, D.A., 1980, "Evaluation of Aerosol Aspiration Efficiency as a Function of Stokes Number, Velocity Ratio and Nozzle Angle", *J. Aerosol Science*, Vol.11, pp.179-188.
23. Jayasekera, P.N. and Davies, C.N., 1980, "Aspiration below Wind Velocity of Aerosols with Sharp Edged Nozzle Facing the Wind", *J. Aerosol Science*, Vol.11, pp.535-547.
24. Tufto, P.A. and Willeke, K., 1982, "Dependence of Particulate Sampling Efficiency on Inlet Orientation and Flow Velocities", *American Industrial Hygiene Association Journal*, Vol.43, pp.436-443.
25. Wiener, W.C., Okazaki, K. and Willeke, K., 1988, "Influence of Turbulence on Aerosol Sampling Efficiency", *Atmospheric Environment*, Vol.22, pp. 917-928.
26. Fan, B.J., McFarland, A.R. and Anand, N.K., 1992, "Aerosol Particle Losses in Isokinetic Sampling Probe Inlets", *Environmental Science and Technology*, Vol.26, pp.390-394.
27. Fan, B.J., Wong, F.S., McFarland, A.R. and Anand, N.K., 1992, "Aerosol Deposition in Sampling Probes", *Aerosol Science and Technology*, Vol.17, pp. 326-332.
28. Cheng, Y.S. and Wang, C.S., 1981, "Motion of Particles in Bends of Circular Pipes", *Atmospheric Environment*, Vol.15, pp.301-306.
29. Hinds, W.C., 1982, *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, New York.
30. Schlichting, H., 1979, *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill, New York.