

2단 평행판 전기집진기의 방전부 특성 실험 Experimental Study on the Discharge Electrode of A Two-Stage Electrostatic Air Cleaner

김 의 생*, 이 재 옥*, 김 용 진*, 최 현 오*
I. S. Kim, J. O. Lee, Y. J. Kim, H. O. Choi

Key words : Electrostatic air cleaner(공조용 전기집진기), Corona discharge(코로나방전), Space current(공간전류), Particle charge(입자하전)

ABSTRACT

The two-stage electrostatic air cleaner is a particle control device that uses electrical forces to move particles in the flowing gas stream onto collector plates. Despite a general understanding of electrostatic air cleaner operation and their successful use in industry, many questions regarding flow, electric fields and particle collection have remained unanswered.

In this paper, an experimental investigation for designing the discharge electrode, including ionizer wire diameter, plate length and wire-to-plate spacing, is carried out. The electrical conditions, namely the electric field intensity, the space current and the particle charge intensity, in wire-plate electrostatic air cleaner are reported and examined.

1. 서 론

현대산업의 급속한 발전과 더불어 산업전반에 걸쳐 환경오염문제가 심화되고, 환경보전에 대한 사회적 요구의 증가로 이에 대한 연구나 날로 증가되고 있다. 특히 화력발전소, 공장, 자동차 배기가스등에 의한 대기오염문제는 심각한 사회문제로 대두되고 있으며, 대기오염 문제와 더불어 인간생활에 직접적 영향을 미치는 에어로졸 및 공기중의 부유미립자 등 실내 환경오염 물질을 제어하는 것은 매우 중요하며, 이러한

오염원의 제거를 위해 여러가지 집진장치의 개발이 진행중에 있다. 일반적으로 집진해야 할 대상 에어로졸은 그 성상이 고체, 액체 및 이들 혼합물로서 직경이 서브미크론($1\mu\text{m}$ 이하)부터 수 $10\mu\text{m}$ 까지 광범위하다. 그런데 기계적 집진장치(중력, 관성력 및 원심력이용 집진장치)는 일반적으로 $1\mu\text{m}$ 이상의 비교적 큰 입자에 대해서는 집진효율은 높으나, 공장등에서 발생하는 오일 미스터(oil mist), 흙(fume)을 비롯하여 실내공기 오염의 원인이 되는 일반대기분진 및 담배연기 등과 같은 서브마이크론 입자들에 대

* 한국기계연구원 공조기기실

해서는 적합하지 않다. 그리고 필터에 의한 집진방식은 집진효율은 높지만 압력손실이 크게 됨으로 운전비용의 증가 및 소음 등에 문제를 수반한다. 이에 반해 정전기력을 이용한 전기집진장치는 코로나 방전(corona discharge)에 의해 기류중의 분진입자에 전하를 하전시켜 이 대전입자를 쿨롱력에 의해 집진극판에 집진하는 원리로 일반 기계식 집진원리와 필터에 의한 집진방식에 비해 저압력 손실이면서 미세입자에 대해 높은 집진효율을 나타내며 운전비용 및 설치비가 작아 최근에는 산업용 및 환경용 집진장치로 널리 사용되고 있다.¹⁻⁴⁾

일반적으로 전기집진장치는 분진에 전하를 부여하는 방전부(하전부)와 대전분진을 부착, 집진하는 집진부를 동일공간에서 행하는 1단식 전기집진기와 이를 별도로 한 2단식 전기집진기로 크게 나눈다. 전기집진기의 방전부에 있어서 부(-)극방전은 정(+)극에 비해 전기적 특성 및 효율은 높지만, 인체에 유해한 오존이 10배 이상 발생하므로 일반공조용에서의 전기집진방식은 정(+)극 방전을 사용하며, 여러종류의 분진에 대한 집진효율을 높이기 위해 2단식을 채택하고 있으며, 일반공조용인 경우 2단식 전기집진기 가운데서도 평행판형 전기집진 장치가 대부분 사용되어지고 있다. 이 경우, 주어진 처리유량과 요구되는 집진효율에 대하여 방전부와 집진부의 크기를 최소화하는 것이 매우 중요하며, 이를 위하여 장치의 각 구성요소에 대하여 전기적 특성과 유체 및 분진입자의 유동특성 등이 규명되어야 한다.^{1,5,6)} 2단 평행판 전기집진기의 방전부의 기호설명이 Fig.1에 나타나 있는데, 그림에서 L 은 방전부의 길이, H 는 방전판의 높이이며, W 는 방전극선과 방전판 사이의 거리($2W$ 는 방전부의 폭)을 나타낸다.

일반적으로 전기(electric field)는 대전(charge)된 물체에 대해 영향을 끼칠 수 있는 공간(space) 말하는데, 방전극선과 방전판 사이의 코로나 방전에 의해 방출되는 이온들은 전계를 따라 움직이며 전계의 세기가 크면 이온의 이동이 그만큼 빨라지는 성질을 갖고 있다. 따라서 이오나이저 와이어에서 방전판 사이의 전계분

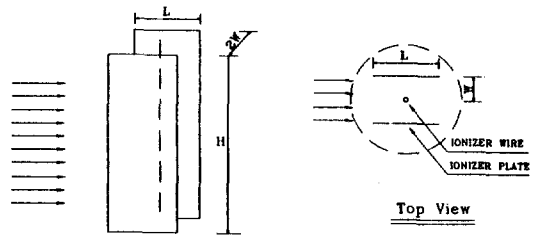


Fig.1 Nomenclature in the section of discharge electrode

포와 전계의 세기와 입자하전 특성은 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 일반공조용 2단평행판 전기집진기의 방전부 설계를 위하여 방전부의 길이, 방전판 사이의 간격 및 방전극선(ionizer wire)의 직경 등의 변화에 대한 코로나 방전 실험 및 전계분포 측정실험과 방전부를 통과하는 유입분진 입자의 하전량 측정실험을 통하여 전기 및 입자 하전특성을 고찰, 평가함으로써 얻어진 실험결과들을 방전부의 최적설계에 응용할 수 있도록 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

2단 평행판 전기집진기 방전부의 코로나 전기특성 및 방전극의 인가전압에 따른 유입분진의 하전량 측정을 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 실험장치는 먼저 방전판과 극선으로 구성된 방전부 실험모델과 방전극에 코로나 전압을 인가하는 고전압공급장치, 방전부의 전장을 측정하는 전계분포 측정장치, 분진입자 공급장치 및 분진입자의 크기분포와 하전량을 측정하는 계측시스템 등으로 구성된다.

본 실험에 사용된 방전부 실험모델은 일반공조용 집진기 표준크기(610mm×610mm)에 일치시키기 위하여 방전판의 높이(H)는 540mm로 고정하였다. 그리고 방전판의 길이와 방전판 사이의 간격을 변화시킬 수 있도록 하였다. 방전

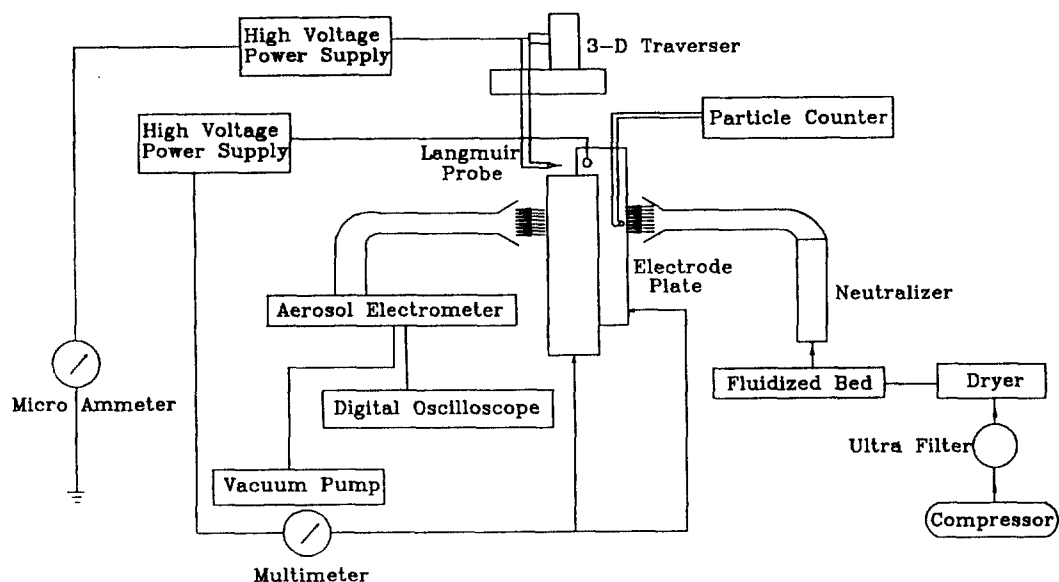


Fig.2 Schematic diagram of the experimental arrangement

극선(ionizer wire)은 직경 0.2mm, 0.3mm, 0.4 mm의 텅스텐 와이어를 사용하였고, 방전판은 알루미늄합 5052 합금을 사용하였다.

그리고 방전극에 코로나 전압을 인가하기 위하여 30kW/5mA용량의 고전압공급장치(High Voltage Power Supply)를 사용하였으며, 방전극과 방전판 사이의 전계분포를 측정하기 위하여 3차원 이송대(3D Traverse) 및 랑뮤어 프루브(Langmuir Probe)를 제작하여⁷⁾ 방전부 인가전압에 따른 전계분포를 측정하였다. 랑뮤어 프루브는 내경 1mm 유리관속에 직경 0.1mm 텅스텐 와이어를 삽입하고, 유리관 끝에 텅스텐 와이어를 15mm 누출시켜 만들었으며, 측정시 랑뮤어 프루브에 공급하는 전압은 고전압공급장치(15 kV/10mA)를 사용하였다. 코로나 방전에 의한 방전극선과 방전판 사이의 전류측정을 위하여 인가전압공급 장치와 방전판 사이에 마이크로 암메터(micro-ammeter)를 연결하여 전류를 측정하였다.

방전부를 통과한 유입입자의 하전량 측정을 위하여 입자 하전량 측정기(Aerosol Electrometer; TSI Model 3068)를 사용하였으며, 측정된 하전량의 데이터 처리를 위해 디지털 오실로스

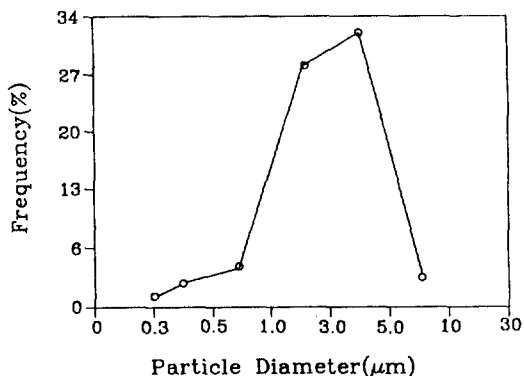


Fig.3 Size distribution of the test SiO₂ particle

코프(LeCroy 9450)를 설치하였다. 이때, 유입분진입자는 SiO₂ 이며, 이는 유동층을 이용한 입자 발생장치(Fluidized-Bed Aerosol Generator; TSI model 3400)를 이용하여 공급하였고, 입자 발생장치에 공급하는 공기의 청정도 및 건조(dry)를 위해 콤프레셔(compressor)에서 발생한 압축공기를 Clean up 필터(filter)와 실리카겔의 건조제를 통과 시킨 후 입자발생장치에 주입시켰으며, 이때 발생된 입자의 극성을 중성화시키기 위해 분진입자 뉴트라라이저(Aerosol Neutrali-

zer, K⁸⁵ : TSI Model 3012)를 사용하였다. 그리고 방전판에 유입되는 분진 입자의 크기 및 유속을 측정하기 위해서 입도계수기(Particle Counter : ROYCO 5000)와 유속계(Thermal Anemometer)를 사용하였다. Fig.3은 본 실험에 사용된 SiO₂ 분진입자의 입경분포를 보여주고 있다.

2.2 실험방법

앞에서도 언급한 바와 같이 방전극선에서 방전판 사이의 전계(electric field)는 방전부 설계에 매우 중요하며, 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 먼저, 방전극선에 가해지는 인가전압과 방전극선과 방전판 사이의 거리를 고정한후 Langmuir probe를 3차원 이송대로 3mm간격으로 이동 시키면서 공간전압을 측정하였다. 이와 같은 방법으로 방전극선 인가전압을 5kV에서 15kV까지 1kV씩 증가시키면서 측정 하였으며, 방전극선과 방전판 사이의 거리를 12mm, 17.5mm,

25mm로 변화시키면서, 방전판 폭을 20mm, 30mm, 40mm, 45mm, 50mm, 55mm, 60mm, 70mm로 변화시키면서 측정하였다. 또한 위의 각 경우에 대해 방전극선과 방전판 사이의 전류흐름을 마이크로 암메타로 동시에 측정하였다.

방전극선과 방전판 사이에 존재하는 이온과 방전부를 통과하는 입자들간의 충돌로 극성을 띤 이들 입자의 하전량 측정실험은 먼저, 입자 발생장치와 뉴트라이저를 통과한 중성 입자를 방전부 유입부에서 입자계수기에 의하여 입자 분포를 측정하여 이들 입자가 정상적으로 균일하게 분포, 유입됨을 확인한 후, 방전부 유입부와 유출부에서 입자하전 측정치의 차이에 의하여 순수입자하전량을 유추하였다. 이때 방전부에 유입되는 분진의 유동속도는 1m/s로 고정하였다. 방전부에 유입된 입자의 하전량은 방전극선에 공급하는 인가전압을 5kV에서 15kV까지 1kV씩 증가 시키면서, 방전극선과 방전판의 폭을

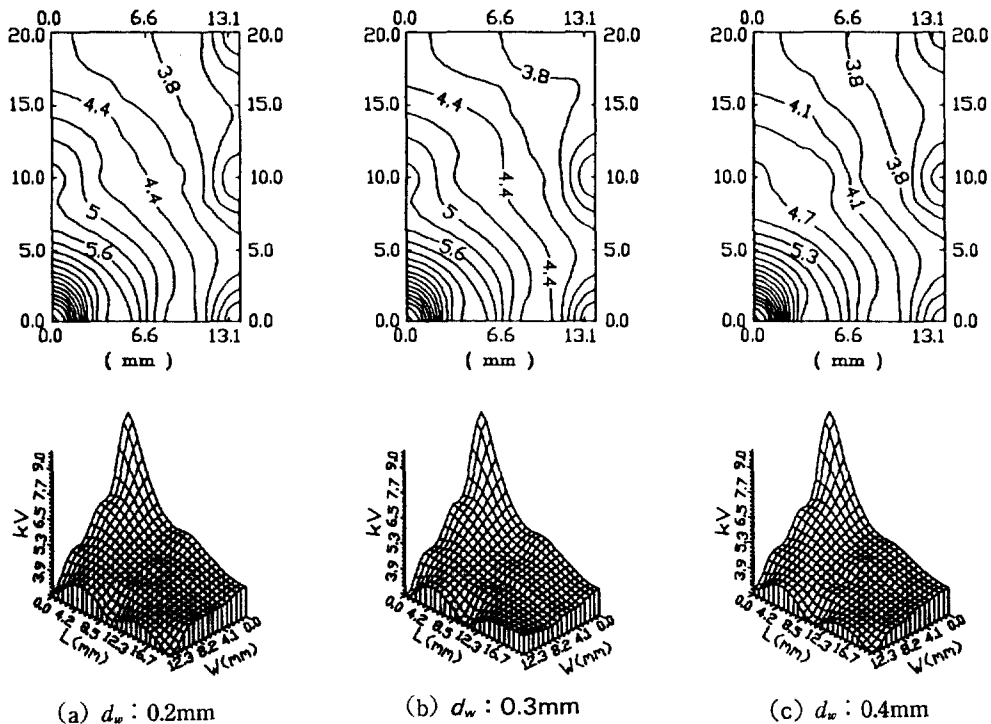


Fig.4 Electric potential distributions between corona wire and discharging electrode plate($L=40\text{mm}$, $W=12\text{mm}$, $V_d=10\text{kV}$)

전계분포 측정때와 같은 크기로 변화 시키면서 유입입자의 하전량을 입자하전기와 디지털 오실로스코프에 의하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 방전부 공간전계분포

Langmuir probe를 사용하여 방전부 내부공간의 전계분포 측정 결과를 Fig.4의 (a), (b), (c)에 나타내었다. 이 때 (a), (b), (c)는 각각 방전판 길이, L을 45mm, 방전판 간의 간격, 2W를 24mm, 그리고 방전극선에 인가되는 전압은 10kV로 고정하고 방전극선의 직경을 0.2mm, 0.3mm, 0.4 mm로 변화시키면서 방전극선과 방전판 사이의 공간에서의 등전계분포선과 동일조건의 3차원 공간전압분포도로 나타내었다. 상단 그림의 X축은 방전극선과 방전판 사이의 폭이 12mm를 나타내며, Y축은 방전극선을 중심으로 방전판 길이의 반인 20mm에 대한 전계분포를 나타내었다. 그리고 하단 그림의 X축은 방전극선과 방전판 사이의 거리를 나타내었고, Y축은 방전판의 길이, Z축은 전계분포를 3차원으로 표시하였다.

그림에서 보는바와 같이, 방전극선의 직경에 따라 방전극선과 방전판 사이의 전계는 (a), (b), (c) 모두 거의 같은 경향을 나타내고 있으나, 와이어 직경이 작은 경우, 방전극선과 방전판 사이의 전계세기가 넓게 분포되어 있으며, 직경이 큰 경우 방전극선 주위에서 전계의 구배가 작음을 보여준다. 그리고 등전계분포 그림(a), (b), (c)에서 유로 방향과 방전판 벽면에서 나타난 원 형태의 전계는 Langmuir probe의 직경이 0.1mm, 노출된 와이어의 길이가 15mm이므로 측정시 probe의 떨림과 probe에 가해지는 미세한 전류에 의한 실험적인 오차로 생각된다.

3.2 코로나 개시전압

본 연구에서 사용된 방전극선의 직경과 방전극선과 방전판 사이의 거리에 따른 코로나 개시(onset) 전압의 측정 결과를 Fig.5에 나타내었다. 그림의 X축은 방전극선의 직경을 나타내었으며, Y축은 코로나 개시전압을 표시하였다. 이때, 실

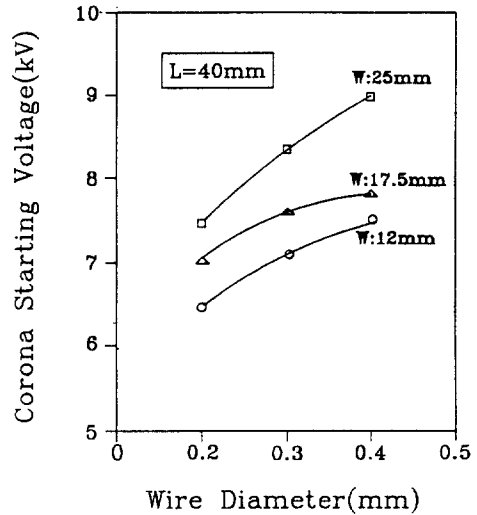


Fig.5 Variation of corona starting voltage with wire diameter for various distances between wire and plate

험에 사용된 와이어의 재질은 텅스텐 와이어로 직경 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm이며, 이오나이저 와이어와 방전판 사이의 거리는 12mm, 17.5mm, 25 mm이다.

그림에서 보는바와 같이, 와이어의 직경이 작을수록, 그리고 방전극선과 방전판 사이의 거리가 가까울수록 코로나 현상이 빨리 발생함을 알 수 있다. 이는 와이어의 직경이 작거나 판사이의 거리가 가까울수록 와이어 경계면에서 전계의 구배 또는 전기장의 세기가 강하게 됨에 따라 코로나의 발생이 쉬워지기 때문으로 사료된다. 그런데, 방전극선의 직경이 작으면 낮은 인가전압에 코로나가 발생되나 방전극선의 길이가 540 mm로 고정 되어 있는 본 실험조건에서는 와이어의 직경이 0.2mm로 너무 작을 때, 코로나 개시전압 이상의 영역에서 와이어의 급격한 진동 현상이 발생되었다. 이는 코로나 방전시 발생하는 이온들의 급격한 운동에 의한 유동장의 변화에 기인되는 와이어의 흔들림으로 사료되며, 이러한 현상은 방전부의 전기특성을 불안정하게 할 뿐만 아니라, 와이어의 수명을 단축시키는 요인이 될 것이므로 방전부 설계에서 매우 중요하게 고려되어야 할 사항이다.

3.3 이온나이저 와이어와 방전판 사이의 공간전류(space current)

방전부에서 유입되는 입자의 하전 및 전달특성은 방전극선의 인가 전압, 방전판 길이 및 방전극선과 방전판 사이의 폭에 긴밀한 관계를 갖고 있으므로 본 연구에서는 방전극선의 인가 전압 변동에 따른 전류변화 및 방전극선과 방전판 사이의 폭에 따른 전류변화 측정 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 3.2절의 결과에 따라 코로나 개시전압이 낮으면서 실험시 떨림 현상이 나타나지 않는 방전극 와이어 직경 0.3mm를 선택하여 방전판의 길이 변화에 따른 전류 측정 및 입자 하전량 측정을 수행하였다.

Fig.6의 (a), (b), (c)에서는 직경 0.3mm의 방전극선과 방전판 사이의 폭이 12mm, 17.5mm, 25 mm, 방전판의 길이를 20mm에서 70mm까지 10 mm씩 증가 시키면서 방전극선의 인가전압에 대한 방전극선과 방전판 사이에 흐르는 전류변화를 측정된 결과이다. 이때 방전극선에 대한 인가전압은 방전극선에서 방전판 사이에 전류변화가 일어나는 코로나 개시전압 이상 영역인 9kV에서 14kV까지 1kV씩 증가 시켰다. 그림의 X축은 방전판의 길이를 나타내며, Y축은 방전극선과 방전판 사이에 측정된 공간 전류(space current)를 나타내었다.

방전판 폭과 인가전압이 증가함에 따라 방전극선과 방전판 사이에 흐르는 전류는 방전판

폭이 60mm일 때 전류값이 최대이며, 방전판 폭이 45mm일 때는 60mm보다는 다소 낮은 값이지만 또 하나의 피크(peak)점을 나타내고 있다. 이러한 변화는 전류값의 차이는 있으나 방전극선과 방전판 사이의 폭이 17.5mm, 25mm 일 때도 같은 경향을 보이고 있다.(Fig.6(b), (c)참조) 이 결과는 방전판의 길이가 길어짐에 따라 코로나 개시전압이 낮아지게 되며, 하전입자가 방전판에 부착될 가능성이 높지만 또한 방전판에서의 전기저항이 변화되므로 전류의 세기가 달라지기 때문이다. 따라서 전기집진장치에서 방전부의 길이선택은 전력소비 측면에서 매우 중요하다. 또한 인가전압이 증가할수록 방전극선에서 많은 양의 이온(ion)이 발생하여 방전극선과 방전판 사이에 높은 전류가 흘러 하전량은 급격히 증가하였으나, 불꽃 방전(break-over)으로 인한 급격한 전력소비가 생기므로 인가전압의 선택 또한 중요한 변수이다. 이러한 공간전류 결과는 방전판의 길이 및 간격 결정에 중요한 것으로 방전부에 유입되는 입자의 하전특성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 대한 인가전압 변화에 따른 분진입자 하전량 변화는 다음 3.4 절에서 자세히 고찰하였다.

3.4 분진입자 하전량

방전부에 유입한 입자가 코로나 이온과의 충돌로 극성을 띄는 정도를 측정하기 위하여 방

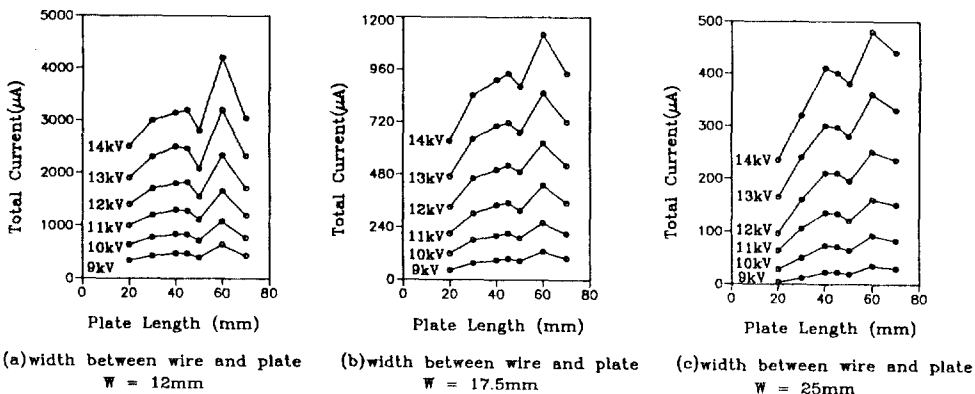


Fig.6 Variation of the total space current between wire and plate with the plate length for various corona voltages

전부 후면에 설치한 입자 하전량 측정기를 사용하였다. 하전량 측정은 3.3절의 방전판 길이의 변화에 따른 방전극선과 방전판 사이의 전류변화 측정결과를 토대로 공간전류의 첫번째 피크 값을 나타내는 방전판의 길이인 45mm로 고정하여 방전판과 방전극선 사이의 간격을 12mm, 17.5mm, 25mm 변화시켜 가면서 측정하였다. 그리고 이때 사용된 방전극선의 직경은 0.3mm이다. Fig.7에 측정결과를 나타내었으며, 그림에서 X축은 인가전압을 나타내며, Y축은 입자하전량 전압을 나타낸다. 여기서 입자하전량 값은 5분동안의 방전부를 지나는 입자하전량 변화값을 평균한 값이다.

그림에서 보는 바와 같이, 분진입자의 하전량은 방전극선과 방전판 사이의 간격이 12mm, 17.5mm, 25mm일 때 모두의 경우에서 인가전압에 따라 증가하다가 10kV전후에서 극대값이 나타났으며, 방전판 사이의 간격 17.5mm, 이오나이저 인가전압 10.5kV 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 그리고 인가전압이 11kV 이후에서 하전량은 감소하고 있음 보여주고 있다. 일반적으로 인가전압이 증가하면 방전부를 통과하는 입자의 하전량이 증가할 것으로 예상되었으나, 일정 인

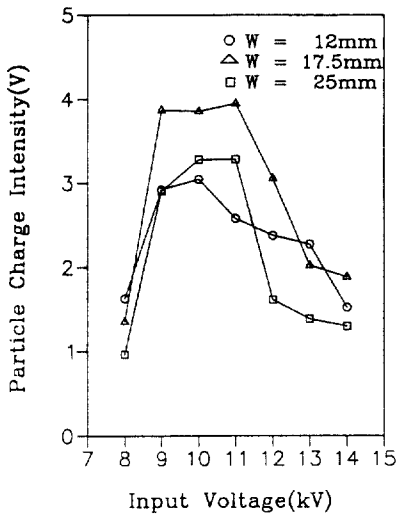


Fig.7 Variation of particle charge intensity with the electrode input voltage for various distances between wire and plate.

가전압 이후 정체 혹은 감소 현상을 보인 것은 방전부에 유입되는 입자가 전기장의 영향으로 인해 이온과의 충돌로 하전된 입자가 방전부에 집진됨으로 해서 전류량의 정체 혹은 감소되는 경향으로 해석된다.^{7,8)}

4. 결 론

2단 평행판 전기집진기에 대한 방전부의 전류변화량 및 입자 하전량 측정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 유도 할 수 있었다.

- (1) Langmuir probe를 사용한 방전부 내의 전계분포 측정 결과, 기존의 실험 및 이론적 데이터와 정성적으로 매우 잘 일치 하였으며, 와이어의 직경이 클 때, 공간내의 전기장의 구배가 작게 나타났다.
- (2) 이오나이저 와이어의 직경이 작거나, 이오나이저 와이어와 방전판 사이의 간격이 작으면 코로나 개시전압이 낮으며, 코로나 영역에서 와이어의 직경이 너무 작을 때 와이어의 떨림현상이 나타난다.
- (3) 이오나이저 와이어와 방전판 사이의 공간전류는 방전판 사이의 간격이 좁을수록, 인가전압이 높을수록 증가되나, 본 실험의 영역에서 방전판의 길이에 따라서는 증가, 감소의 2개의 극대값을 가지므로 이는 방전부 설계에서 중요하다.
- (4) 방전부를 통과하는 입자들의 전체 하전량은 방전판간의 간격과 인가전압에 따라 최대값이 존재하며, 이는 인가전압이 너무 높을 경우 코로나 이온에 의한 유동장의 변화로 통과하는 입자수가 감소되어 나타나는 현상으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Oglesy, S. and, Nichols, G.B., 1978, "Electrostatic Precipitation", Marcel, Dekker, New York.
2. 공기 청정 기술, 1991, 제4권 제1호, pp24-28.
3. Robinson, M., 1971, "Electrostatic Precipitation", in W. Strauss ed., Air Pollution Control,

- part 1, Wiley-Interscience, New York.
4. Strauss, W., 1966, "Industrial Gas Cleaning", Pergamon Press, Oxford.
 5. Smith, W.B. and McDonald, J. R., 1976, "Development of a Theory for the Charging of Particles by Unipolar Ions", *J. Aerosol Science* 7, 151.
 6. E.U. Lander, 1978, "Distribution of electron and ions in a corona discharge", *Proc. of IEE*, vol. 125-9, pp1069-1073.
 7. T.Y. Yamamoto and H.R. Velkoff, 1981, "Electrohydrodynamics in an electrostatic precipitator" *J. Fluid Mech*, vol. 108, pp1-18.
 8. Oron, A., Gutfinger, C. and Hassid, S., 1989, "Turbulent Deposition of Charged Particles under the Influence of an External Electric Field", *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 127-2, pp401-416.