

방전극 형상 및 여과재에 따른 정전 여과집진장치특성에 관한 연구

Investigation of Characteristics of Electrostatic Bag Filter with Discharge Electrode Shapes and Filter Properties

김 정 일 · 여 석 준

부경대학교 환경공학과

(1998년 2월 11일 접수, 1998년 5월 12일 채택)

Jeong-II Kim, Seok-Jun Yoa

Department of Environmental Engineering, Pukyong University

(Received 11 February 1998; accepted 12 May 1998)

Abstract

In this study, the characteristics of electrostatic bag filter to overcome the main problems such as the high pressure drop and low collection efficiency for submicron particles are investigated with the experimental parameters. Especially, the experiment is carried out focusing on collection efficiency and pressure drop change mechanism as a function of discharge electrode shapes and filter properties, including the applied voltages, filtration velocities and particle concentrations, etc.

Results show that the collection efficiency is improved over 30% for the fine particle below $1\mu\text{m}$ and pressure drop reduction ratio (PDRR) increases in the following order : 4 mm screwy > 4 mm square > 4 mm round discharge electrodes. For the filter properties, Nomex is more effective than PE under the influence of electrostatic force. Applying 30 kV for a screwy discharge electrode, higher overall collection efficiency is maintained in spite of the increment of filtration velocity over four times (8 m/min) in comparison with that of 2 m/min and PDRR are highly shown over 80% with various filtration velocities, 5, 8, 11 m/min.

Key words : electrostatic bag filter, discharge electrode shape, filter property, applied voltage, collection efficiency, pressure drop

1. 서 론

산업발전에 따른 대기오염문제의 심각성으로 인해 정부의 대기오염물질에 대한 배출규제가 계속적으로 강화되고 있어 각 산업체에 설치되어 있는 대

기오염 방지시설의 교체 및 보완이 절실히 요구되고 있다. 현재 가장 많이 설치되어 있는 고효율 집진장치 중의 하나인 여과집진장치는 높은 집진효율로 인해 그 수요는 계속 증가 추세에 있지만, 서브마이크론($1\mu\text{m}$ 이하) 범위의 미세입자에 대한 집진효율이 감소하는 경향을 보이며 압력손실이 다른

집진장치에 비해 상대적으로 크기 때문에 설치 및 유지 관리비 등 경제적 비용이 많이 소요되고 처리 유량(여과속도)의 한계로 인해 장치 규모가 큰 단점이 있다. 이러한 여과집진장치의 제반 문제점을 보완하기 위해서 정전기력을 부가한 정전 여과집진장치 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 상업화에 가장 근접한 정전 여과집진장치에는 내부하전방식의 Apitron (American Precision Industries)이 있으며 (Helfritsch, 1977), 이 장치의 구조는 각각의 단위 여과포 하단부에 wire-pipe 형태의 원통형 전기집진기가 각각 부착되어 있고 입자들이 전기집진기 내의 전기장을 통과하면서 negative (-)로 대전되며 상부에 위치한 여과포에 집진되어진다. 이러한 Apitron의 구조는 고전압을 인가하지 않을 경우 일반 여과집진장치의 구조와 동일하다. Smith *et al.* (1984)은 Apitron에 30 kV의 전압을 인가할 경우 압력손실은 두 배 이상 감소되고 총괄집진효율은 증대되며, 일반 여과집진장치의 연구결과 (Carr and Smith, 1984)와 비교해서 5배의 더 높은 여과속도 범위에서도 유사한 압력손실과 총괄집진효율을 나타낸다고 보고하였다. 그러나 Apitron과 같이 여과집진장치의 본체 내부에서 정전기력을 유발시키는 내부하전방식은 각각의 여과포 내부 또는 지지틀에 방전극이 부착되므로 설치가 용이하지 않고 탈진 및 여과포 교체 등 유지 관리 면에서 많은 어려움을 내포하고 있다. 이에 반해 여과집진장치의 전단부에 하전장치를 설치하여 입자를 예비하전시키는 예비하전방식은 설치가 용이하고 유지 관리가 간편하며 성능면에서도 우수한 장점을 지니고 있다 (Chudleigh, 1985; Chudleigh and Bainbridge, 1980). Ohtsuka와 Shimoda (1986)는 간단한 예비하전장치를 사용하여 입자를 400 kV/m의 전계내에서 예비하전시킨 결과 입자농도에 관계없이 압력손실은 1/2 정도 감소되고, 서브마이크론 범위의 집진효율은 60%에서 93%로 증가됨을 보였다. 이러한 예비하전방식은 성능 향상 뿐만 아니라 설치 및 유지 관리 면에서도 상당한 장점을 가지고 있으므로 대기오염물질 배출규제에 적절히 대응할 수 있으며 경제 산업적 측면에서도 발전 가능성은 클 것으로 여겨진다. 그러나 현재까지 진행된 예비하전방식의 정전 여과집진장치에 대한 연구는 성능 규명에 국한되어 제한된 범위의 인자들에 대해서 수행되어졌

기 때문에 예비하전방식의 실용화를 위해서는 유속, 인가전압, 입자농도, 방전극 형상 및 여과재 등의 여러 인자에 따른 최적조건을 파악하고, 이를 위해 주어진 변수에 대한 다양한 범위에서 다각도로 연구가 이루어 질 필요성이 있다. 특히 예비하전방식 정전 여과집진장치의 성능에 영향을 미칠 수 있는 인자들 중 방전극 형상 및 여과포 재질은 입자하전 메카니즘, dust층의 구조, 여과재의 정전기 특성 등을 변화시킬 수 있는 중요 변수로 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 예비하전방식 정전 여과집진장치에 영향을 미치는 인자들에 대한 기본적 특성 파악을 위해 기초실험을 수행하였으며, 이를 위해 실린더형 예비하전장치를 사용하여 방전극 형상과 여과포 재질에 따른 집진효율 및 압력손실 변화에 대한 특성해석과 여과속도, 분진농도, 인가전압에 따른 정전기력의 효과를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 분진공급장치 (particle generator), pulse-jet 형식의 여과집진장치 본체 (bag filter), 입자를 예비하전시키기 위한 예비하전장치 (precharger), 예비하전장치에 인가되는 고전압을 단계적으로 발생, 공급하는 고전압 공급장치 (high voltage power supply) 그리고 전압-전류, 집진효율 및 압력손실 등을 측정할 수 있는 제측시스템으로 구성되어 있다. 또한 공기 유동 형성을 위한 흡입 송풍기와 흡입 송풍기의 회전속도를 제어함으로써 기류의 유량을 조절할 수 있는 유량조절장치가 여과집진장치 후단에 설치되어 있으며, 전체적인 모식도를 그림 1에 나타내었다.

2.1.1 실험본진 및 분진공급장치

실험본진은 삼천포 화력발전소에서 채취한 fly ash이며, 외부 습도에 의해 입경분포 및 입경별 개수가 변하는 것을 막기 위해 105°C에서 24시간 이상 건조한 후 사용하였다. 그림 2는 입경별 수농도 및 질량농도의 측정이 가능한 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI)를 사용하여 본진의 입경분포를 측정하는 것이다. 본진의 입경분포는 0.5~10 µm의 범

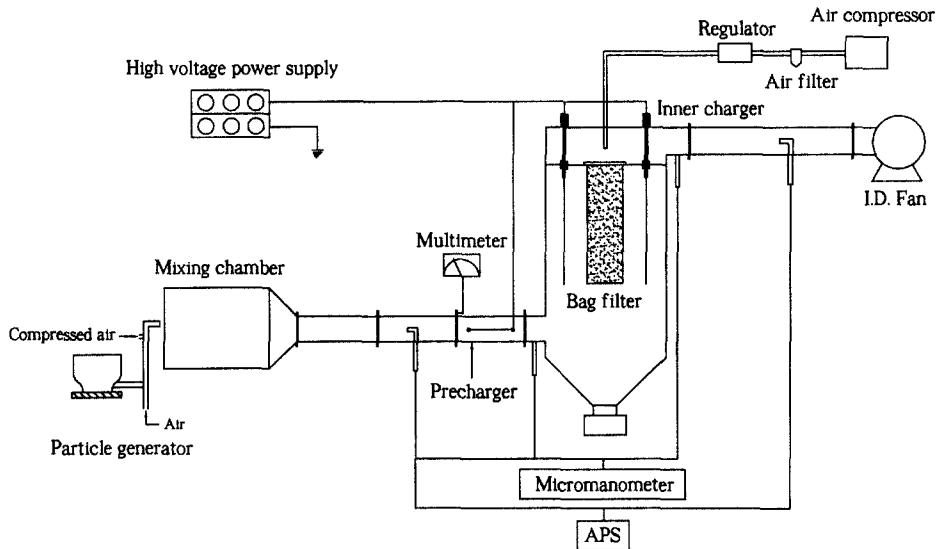


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

위를 가지며, 본 실험의 관심대상인 서브마이크론($1\ \mu\text{m}$ 이하) 범위의 미세입자 수가 많은 것을 볼 수 있다. 개수기준 평균 입자크기는 $2.24\ \mu\text{m}$ 이며 중량기준 평균입자크기는 $4.09\ \mu\text{m}$ 로 나타났다.

분진을 기류 중으로 일정하게 공급하기 위한 분진공급장치는 feeding screw와 전압조절장치로 이루어져 있다. 분진은 분진 hopper의 하부에 위치한 feeding screw의 일정한 회전에 의해 hopper의 옆에 수직으로 부착되어 있는 내경 200 mm의 원형 관으로 투입되고, 원형 관의 상부에서 압축공기를 상방향으로 분사시켜 주면 상·하부의 압력 구배에 의해 분진이 기류 중으로 분산, 공급되어진다. 그리고 전압조절장치를 사용하여 feeding screw의 회전속도를 제어함으로써 공급되는 분진의 양을 조절하고, 이에 따라 분진농도를 변화시킬 수 있게 제작되었다.

2.1.2 고전압 공급장치 및 예비하전장치

예비하전장치에 고전압을 공급하기 위한 장치로서, $0\sim 100\text{ kV}$ 의 전압과 $0\sim 10\text{ mA}$ 의 전류 범위에서 연속적이고 단계적인 조작이 가능하게 제작되었다. 또한 가변저항을 조절하므로써 정전압/정전류 제어를 하도록 되어 있으며, 실험시 과전압 및 과전류가 흐를 경우 자동차단할 수 있는 보호장치가 내장되

어 있다.

예비하전장치는 여과집진장치의 전단부에서 입자를 예비하전시키는 부분으로서, 고전압 공급장치에서 공급되는 고전압이 실린더 단면의 중심에 위치한 코로나 방전극에 인가되면 실린더 내부에 전기장이 형성되어 기류 중의 분진이 하전되는 원리이다. 예비하전부는 직경 100 mm, 길이 300 mm의 원형 실린더이고, 실린더 단면의 중심에 길이 200 mm의 방전극이 설치되어 있다. 덕트내 유속으로 인한 방전극의 흔들림을 막기 위해 방전극 양단을 고정할 수 있는 테프론 재질의 고정대가 있고, 그 속을 통해서 고전압이 인가되어진다. 고정대는 다양한 방전극을 교체할 수 있도록 제작되었으며, 실험에 사용된 방전극은 황동 재질의 직경 4 mm인 원형 방전극(round wire)과 나선형 방전극(screwy wire), 한 면이 4 mm인 정방형 방전극(square wire)이 사용되어졌다(그림 3).

2.1.3 여과집진장치 본체

장치의 본체는 여과재 및 탈진시스템으로 구성되어 있으며, 실험에 사용된 여과포는 Nomex와 PE 두 가지 재질로써 각각의 규격 및 물리적 특성을 표 1에 나타내었다. 여과재의 물성에 따른 집진효율 및 압력손실의 차이를 최소화하기 위해서 각 여과

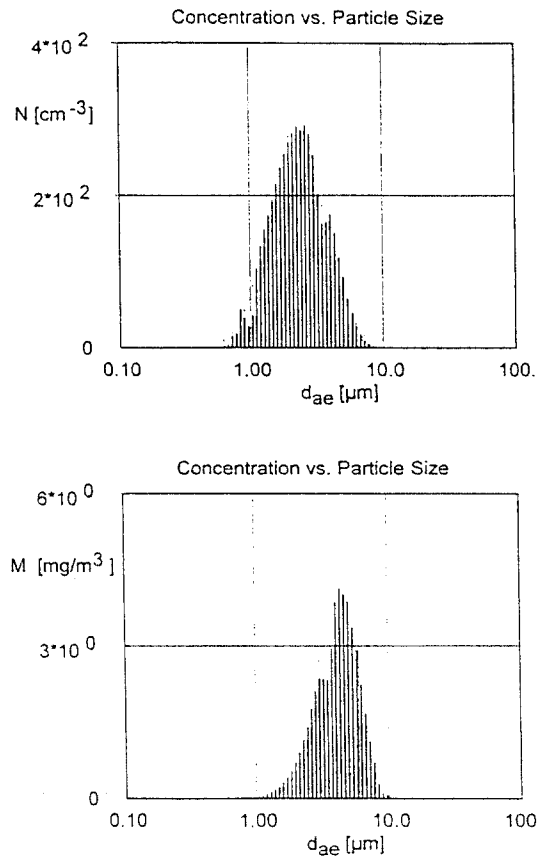


Fig. 2. Size distribution of test dust.

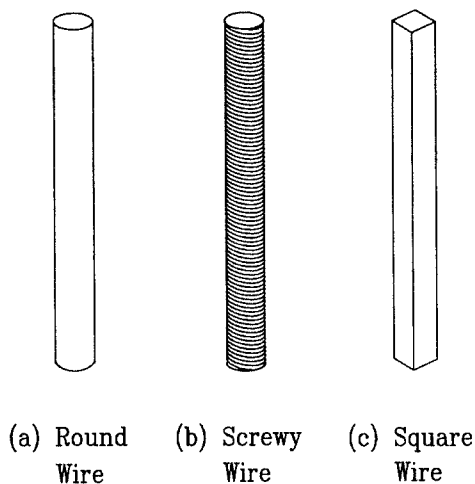


Fig. 3. Construction of discharge electrodes.

Table 1. Dimension and physical characteristics of test fabrics.

Items	Filter properties	
	PE	Nomex
Dimension (mm)	500 ^l × φ150 × 1ea	500 ^l × φ150 × 1ea
Specific weight	1.38	1.38
Weight (g/m ²)	510	500
Thickness (mm)	2.0	2.0
Air permeability (cc/cm ² /sec)	19	19
Tensile strength (kg/5 cm)	165 × 150	150 × 120
Bursting strength (kg/cm ²)	37	36
Thermal resistance temp. (°C)	125	240
Surface treatment	moisture resistance	medullary textile

재의 치수, 통기도 및 두께는 동일하게 제작하였다. 여과포에 집진된 분진의 탈진방식은 압축공기에 의한 충격기류식으로서, 여과포의 외면여과에 의한 집진 분진을 여과포 내면의 상부에서 0.1초의 짧은 시간 동안 충격기류를 분사시키므로써 탈진하는 방식이다. 공기 압축기에서 생성된 압축공기는 air filter와 air cleaner를 통과하면서 정화되어지고 압력 조절기에 의해서 4 kg/cm²의 압력으로 분사되어진다.

2.2 실험방법

본 실험은 예비하전방식 정전 여과집진장치의 방전극 형상과 여과재에 따른 집진효율 및 압력손실의 변화특성을 파악하는데 그 목적이 있으며, 아울러 인가전압, 여과속도, 분진농도 등의 다양한 변수에 따른 정전기력의 효과에 대한 해석도 함께 수행하였다. 이를 위해 본 실험의 전체적인 실험내용은 예비하전부의 전압-전류 특성 비교와 분진 하전유·무에 따른 집진효율 및 압력손실 비교로 구분되어지며, 각각의 실험은 방전극 형상, 여과포 재질, 인가전압, 여과속도 및 분진농도 등을 변화시키면서 수행하였다. 본 실험에서 주요 변수 중의 하나인 유량 및 여과속도는 미세압력계 (micromanometer, Furness Controls Ltd. FCO 12)를 사용하여 덕트내 유

속을 측정하므로써 산출되어졌다. 유속 측정점 및 분진 채취 지점은 여과집진장치의 전 후단에서 대기오염 공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4% 되는 지점을 선정하고, 각 지점에서 측정한 유속 및 분진의 수농도와 질량농도를 산술 평균하여 그 평균치를 사용하였다.

예비하전부의 전압-전류 특성은 multimeter (Fluke 27)를 사용하여 방전극 형상, 덕트내 유입유속 및 분진농도 변화에 따른 인가전압과 전류의 상관관계를 도출하므로써 구해졌다. 여기서 덕트내 유입유속은 0, 1, 2.5, 4 m/sec, 분진농도는 30, 45, 60 mg/m³로 변화되어졌고 방전극은 원형, 사각형, 나선형 세 종류를 사용하였다. 전계 형성 유·무에 따른 압력손실 변화 특성을 비교하기 위해서 여과집진장치 전 후단 50 mm 지점에서 미세압력계 (micromanometer)를 이용하여 정압차에 의해 계산되는 여과포의 압력손실을 10분 간격으로 1시간 동안 측정 후, 탈진 전 후의 압력손실을 계산하였다. 이 실험에서의 변수는 방전극 형상, 분진농도, 인가전압 및 여과속도로써, 분진농도는 15, 30, 45 mg/m³, 여과속도는 2, 5, 8, 11 m/min이고, 인가전압은 전압-전류 특성 실험의 결과에서 나타나는 안정한 전압 범위 내에서 3단계의 전압을 선택하였다. 방전극 형상, 인가전압 및 여과속도 변화에 따른 입경별 부분집진효율 및 총괄집진효율은 입자가 노즐에서 급격히 가속될 때 입자의 관성력에 의해 발생하는 time delay 및 광산란 효과를 이용하여 입자의 공기역학적 직경 및 입경별 수농도를 측정할 수 있는 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI)를 사용하여 위에서 기술한 각 분진 채취점에서 10분 동안 채취하여 입경별 수농도 및 질량농도의 누적치를 측정하므로써 구해졌다. 이 실험에서 인가전압 및 여과속도 변화는 압력손실 특성 실험의 경우와 동일하다. 또한 여과재에 따른 특성을 파악하기 위해 PE 및 Nomex에 대해서도 위의 과정이 동일하게 수행되어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전압-전류 특성 실험

정전 여과집진장치의 성능에 영향을 미칠 수 있는 예비하전부의 전기장 특성을 파악하기 위해서 방전극 형상, 유입유속 및 분진농도 변화에 따른 전

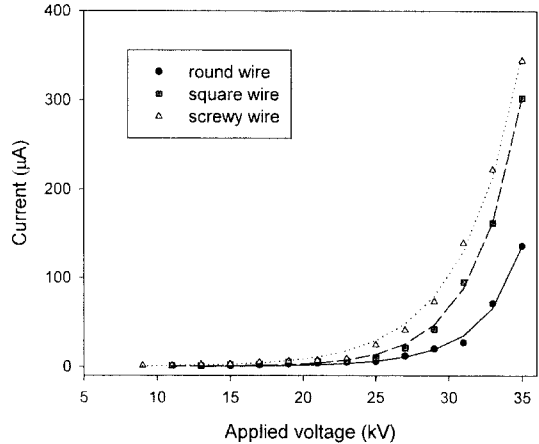


Fig. 4. Current vs. applied voltage with three discharge wires ($M_p=0.0$ mg/m³, $V_i=0.0$ m/sec).

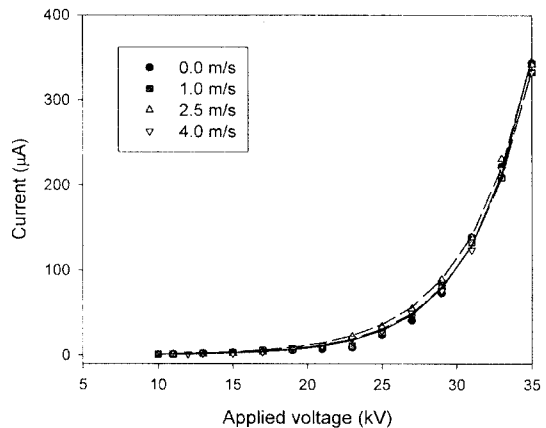


Fig. 5. Current vs. applied voltage with various inlet gas velocities (screwy wire, $M_p=0.0$ mg/m³).

압-전류 특성 실험을 수행하였다. 그림 4는 가스에 분진입자가 적재되지 않은 $M_p=0.0$ mg/m³ 상태에서 방전극 형상에 따른 전압-전류 특성을 비교한 것이다. 대체적으로 인가전압에 따라 접지극으로 흐르는 전류는 나선형 방전극이 가장 크고 다음으로 사각형, 원형 방전극 순이며, 코로나 개시전압도 나선형이 가장 낮은 것으로 나타난다. 이것은 Watanabe et al. (1986)의 1~5 mm의 원형, 4 mm 사각형 및 핀 부착 방전극을 사용한 평판형 전기집진기의 전압-전류 특성 실험에 관한 연구에서 코로나 방전전력

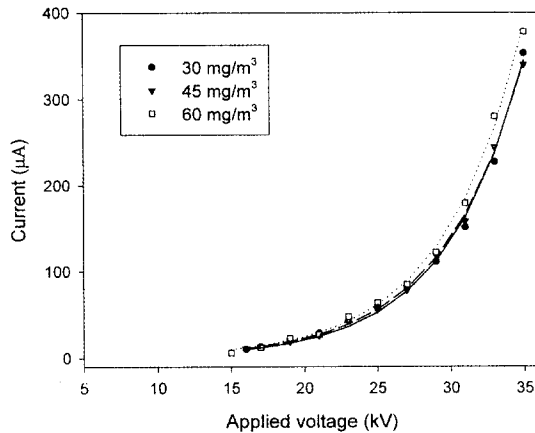


Fig. 6. Current vs. applied voltage with various dust concentrations (screwly wire, $V_f=2.5$ m/s).

($V \times I_c$)이 편부착, 4 mm 사각, 3 mm 원형 방전극 순으로 방전극의 곡률 반경이 작을수록 높게 나타나는 결과와 유사하다.

그림 5와 6은 덕트내 유입유속 및 분진농도 변화에 따른 전압-전류 특성을 비교한 것으로, 동일 전압에서 코로나 방전전력($V \times I_c$)이 가장 높은 나선형 방전극을 사용하여 도출한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 유입유속에 대해서는 거의 차이가 없는 것으로 나타나며, 분진농도 변화에 대해서는 본 실험에서 사용한 낮은 분진농도 조건에 의해 코로나 전류는 미세한 차이를 보이나, 농도가 높아지면 입자에 의한 자유 전자의 이동효과가 증대되어 그 차이는 뚜렷해 질 것으로 예측된다.

또한 인가전압이 30 kV 이상이 되면 접지극으로 흐르는 전류가 급격히 증가하고 있는데 이로 인해 30~35 kV 이상의 범위에서는 불꽃방전(spark)의 회수가 많아질 수 있기 때문에 역전리 및 순간적 전계손실이 발생하여 분진대전에 장애가 심해질 우려가 있다. 따라서 본 실험에 적용되는 인가전압의 변화단계는 20, 25, 30 kV로 선택한다.

3.2 입경별 부분집진효율

분진입자의 부분집진효율을 산정하기 위해서 입경별 개수 측정이 가능한 APS를 이용하여 정전 여과집진장치의 유입 유출부에서 개수측정을 하고, 아래 식에 의해 입경별 부분집진효율을 계산한다.

$$\eta_d = \frac{N_i - N_o}{N_i} \times 100 \quad (1)$$

여기서, η_d 는 입경별 부분집진효율이고 N_i , N_o 는 입경별 유입 입자수 및 유출 입자수이다.

3.2.1 인가전압 및 여과속도에 따른 입경별 부분집진효율

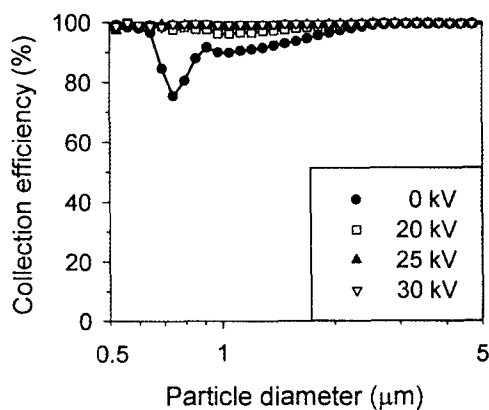
예비하전방식 정전 여과집진장치의 인가전압 및 여과속도에 따른 입경별 부분집진효율 특성을 알아보기 위해서 방전효과가 높은 나선형 방전극과 PE 재질의 여과포를 사용하여 실험을 수행하였다. 그림 7은 그 결과를 나타낸 것으로 집진효율에 대한 정전기력의 영향은 여과속도가 증가할수록 다소 둔화되고 있지만 전체 입경 범위에서 상당한 효과를 보이고 있다. 여과속도가 2 m/min(유입부 덕트내 유속 1 m/s)일 경우 전압을 인가하지 않았을 때는 1 μm 이상의 집진효율이 90% 이상 나타나고 있으나 인체에 침착물이 높은 서브마이크론 범위의 입자는 집진효율이 최저 74%까지 감소되고 있으며, 여과속도가 증가하면서 최저 효율은 더욱 더 낮아진다($V_f=11$ m/min에서 20% 정도). 이것은 1 μm 이상의 입자는 여과집진장치의 집진메카니즘인 관성과 직접 차단에 의해 집진효율이 높지만 서브마이크론 범위의 입자에서는 입자의 관성력과 여과포의 직접차단 효과가 현저히 감소하기 때문이다. 그러나 0.6 μm 이하의 미세입자에 대해서는 입자의 브라운 운동(Brownian motion)에 의한 확산효과로 집진효율은 높으며, 입자직경이 증가하면서 확산효과는 차츰 감소하여 0.7 μm를 전후해서 최저 집진효율을 나타내는 임계지점이 나타나게 된다(Donovan, 1985). 이러한 서브마이크론 범위에서의 집진효율은 그림 7-(b), (c), (d)의 인가전압 0 kV에서와 같이 유속이 증가할수록 확산효과의 감소, 탈진 분진의 재비산, 분진입자 통과메카니즘인 압출(seepage)과 붙어나감(pinhole plugs) 등의 영향으로 인해 관성력 및 차단 효과에 의한 효율 증대 효과가 상쇄되면서 상당히 감소하게 된다. 이와 같은 서브마이크론 범위의 낮은 집진효율은 입자를 대전시키므로 인해 여과집진 메카니즘에 정전기력이 부가되므로써 매우 호전될 수 있다.

일반적으로 입자의 대전은 전력선을 따라 이동하는 음이온의 직접 충돌에 의한 전기장대전과 음이

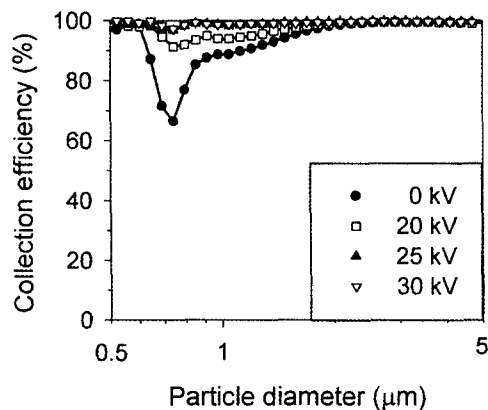
온의 브라운 운동에 의한 확산대전에 의해 이루어진다. 전기장대전은 $0.5\mu\text{m}$ 이상의 입자대전에 주요하고 $0.2\mu\text{m}$ 이하의 입자대전에 대해서는 확산대전이 주된 메카니즘이 되며 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 사이의 입자는 전기장 및 확산대전에 의해서 대전된다. 또한 입자하전량은 전기장 내에서의 입자 체류시간과 비례한다(Oglesby and Nichols, 1978).

이러한 대전원리에 의해 입자가 대전되므로써 여과집진메카니즘에 정전기력이 부가되어, $1\mu\text{m}$ 이상의 큰 입경에 비해 특히 서브마이크론 범위의 집진 효율 곡선이 더욱 높게 상향하게 된다. 그림 7에서

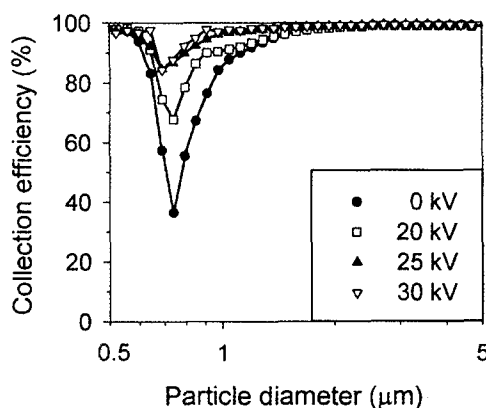
볼 수 있듯이 각 여과속도에서 20kV의 전압이 인가되었을 때 최소 집진효율을 나타내는 $0.7\mu\text{m}$ 부근의 임계지점에서 집진효율이 평균 30%씩 증가하므로써 정전기력의 영향이 매우 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그림 7-(a)의 여과속도 2 m/min에서 20kV의 최소 전압을 인가했을 경우 서브마이크론 범위의 집진효율은 96% 이상의 고효율을 보이며, 입경이 $1\mu\text{m}$ 이상으로 증가되면서 정전기력에 의한 집진효율 상승은 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 이는 입경증가에 의한 관성력의 증대로 전기적 효과를 상대적으로 감소시키기 때문이



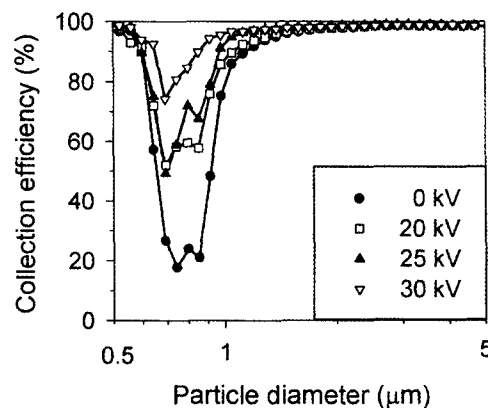
(a) $V_f = 2 \text{ m/min}$



(b) $V_f = 5 \text{ m/min}$



(c) $V_f = 8 \text{ m/min}$



(d) $V_f = 11 \text{ m/min}$

Fig. 7. Collection efficiency vs. particle diameter with various applied voltages(PE, screwy wire).

다. 그림 7-(b), (c), (d)는 여과속도 5, 8, 11 m/min 일 경우의 인가전압에 따른 집진효율을 나타내는데, 집진효율은 여과속도 2 m/min과 유사한 분포를 보이지만 정전기력에 의한 고효율의 효과는 유속이 증가할수록 감소되고 있다. 이는 앞서 언급한 유속증가에 의한 효율 감소영향과 전기장 내에서의 입자 체류시간에 비례하는 입자하전량의 감소로 인해 기인된 것이다. 입자하전량의 증감에 의한 집진효율 변화를 여과속도 8 m/min에서 살펴보면, 인가전압 25 kV와 30 kV의 집진효율이 유사하게 나타나므로서 25 kV의 전압에서 입자의 대전이 포화상태에 이르는 것으로 판단되고 인가전압 20 kV에서의 집진효율과 생기는 차이가 입자하전량에 따른 정전기력 효과의 감소 부분으로 예상할 수 있다. 그러나 여과속도 11 m/min에서는 25 kV와 30 kV의 집진효율이 0.7 μm 부근의 임계 지점에서 최대 20% 정도 차이를 보이고 있는데, 이는 여과속도 8 m/min과 달리 예비하전부에서의 빠른 유속으로 인해 25 kV에서는 입자가 전하포화상태에 이르지 못하기 때문에 생기는 결과로 여겨진다. 반면 30 kV의 높은 인가전압이 주어질 때 최소 집진효율이 73%로 여과속도 2 m/min에서 전압을 인가하지 않은 경우와 유사하게 나타나므로써 강한 전기장에 의한 정전기력 효과가 유속 증가에 따른 효율 감소를 어느 정도 극복하고 있다고 할 수 있다. 이러한 결과로부터 30 kV의 전압 인가시 4배 이상의 유량을 처리하더라도 유사한 집진효율을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 2. 2 방전극 형상에 따른 입경별 부분집진효율

그림 8은 PE를 사용하여 여과속도 5, 8 m/min에서 전압을 20 kV와 25 kV 인가했을 경우의 방전극 형상에 따른 입경별 부분집진효율을 각각 비교한 것이다. 여과속도 5 m/min의 경우 20 kV의 낮은 전압에서는 코로나 방전전력이 가장 높게 나타난 나선형 방전극의 경우 정전기력 효과가 가장 높은 서브마이크론 범위에서 상대적으로 높은 집진효율을 나타내며 사각형과 원형 방전극은 미세한 집진효율 차이를 보인다. 비록 전압-전류 특성에서 사각형 방전극이 원형에 비해 높은 방전전력을 나타내지만 사각형의 경우 저전압에서는 코로나가 방전극 전체 표면에서 발생하지 않고 모서리 부분에서 산발적으로 생성되기 때문에 실제 입자의 하전률은 원형과

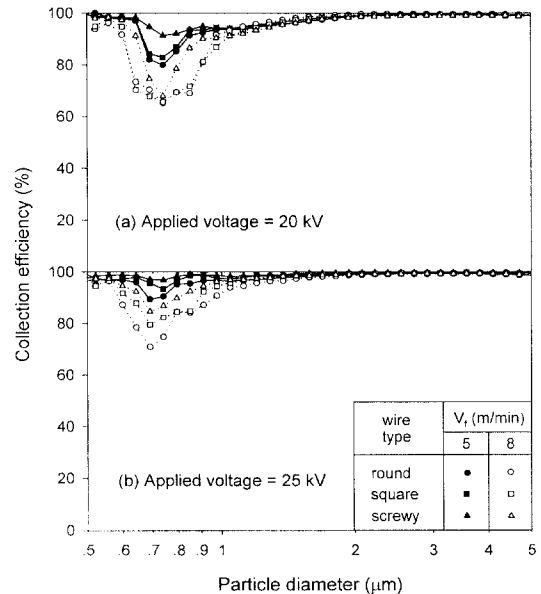


Fig. 8. Comparison of collection efficiency with three discharge wires for filtering velocities 5, 8 m/min (PE).

유사하여 이러한 결과가 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 전류가 많이 흐르는 25 kV의 비교적 높은 인가전압에서는 코로나가 사각형 모서리 전체에서 비교적 균일하게 분포되므로 나선형에 비해 다소 낮은 집진효율을 보이지만 원형에 비해선 상대적으로 높게 나타난다. 여과속도 8 m/min의 경우 20 kV의 인가전압에서는 전계 내에서의 체류시간 감소로 인해 세 방전극의 집진효율은 큰 차이를 보이지 않지만, 25 kV인 경우 체류시간 감소에도 불구하고 강한 전장의 효과로 포화하전상태에 도달하기 때문에 집진효율 차이는 현저하게 나타난다.

3. 2. 3 여과포 재질에 따른 입경별 부분집진효율

여과포의 재질에 따른 정전 여과집진장치의 집진효율 특성을 파악하기 위해서 나선형 방전극을 사용하여 입자를 예비하전시킨 후 일반 산업체에서 많이 사용되고 있는 PE와 Nomex의 집진효율을 비교하였다. 그림 9는 여과속도 5 m/min에서 20 kV와 25 kV의 전압을 각각 인가했을 경우 PE와 Nomex의 입경별 부분집진효율을 비교한 것으로, 입경별 집진효율의 분포는 유사한 형태를 보이고 있지만

최저효율점 부근의 미세입경 범위에 대해 PE의 집진효율이 Nomex에 비해 높게 나타나고 있으며, 인가전압이 증가하면서 두 여과재에 의한 효율 차이는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 표 1의 여과재 비중, 중량 및 두께에서 볼 수 있듯이 PE가 Nomex에 비해 부직포(felted filter)의 압착정도가 좋기 때문에 같은 통기도라 하더라도 입자의 통과메카니즘인 압출 및 붙어나감 현상이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 10은 그림 9에서 PE 및 Nomex의 인가전압 변화에 따른 집진효율 특성을 정량화하기 위해 식(2)을 도입하여 나타낸 그림이며, 식(2)는 정전기력 효과가 집진에 미치는 영향을 수량화한 집진효율 증가율을 의미한다.

$$CEIR = \frac{\eta_i - \eta_0}{\eta_0} \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서, CEIR (Collection Efficiency Increment Ratio)은 입경별 집진효율 증가율이고 η_i 는 전압을 인가했을 경우의 입경별 부분집진효율, η_0 는 전압을 인가하지 않은 경우의 입경별 부분집진효율이다.

인가전압 25kV에서 최대 집진효율 증가율(CEIR)은 Nomex 80%, PE 48% 정도로 Nomex가 매우 높게 나타나며, 인가전압을 증가시킬 때 CEIR의 증가치는 Nomex에서 역시 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 전기력 효과가 중요하게 작용하는

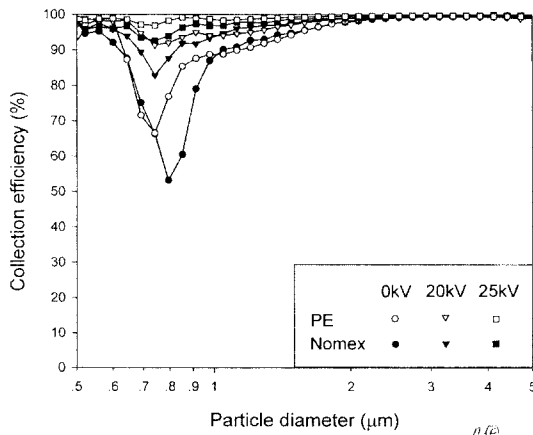


Fig. 9. Comparison of collection efficiency with various applied voltages-PE and Nomex (screwly wire, $V_t=5$ m/min).

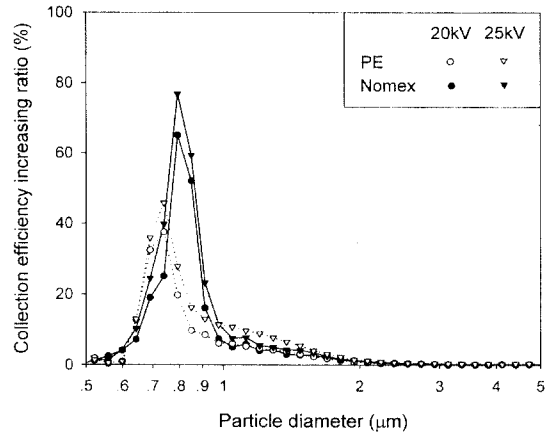


Fig. 10. Comparison of collection efficiency increment ratio for applied voltages 20, 25 kV -PE and Nomex (screwly wire, $V_t=5$ m/min).

미세입경에서 현저하게 나타남에 따라, 전압을 인가하지 않은 경우에는 집진효율이 PE가 Nomex에 비해 높음에도 불구하고 전압 인가에 의한 정전기력 효과는 Nomex의 경우 그 미치는 영향이 크게 작용하는 것으로 예측된다.

3.3 총괄집진효율

그림 11은 방전극 형상, 인가전압 및 여과속도에 따른 총괄집진효율을 비교한 것으로서, 총괄집진효율은 다음과 같이 표현된다. (단, 입자는 구형으로 가정)

$$\eta_t = \frac{\sum(V_i N_{i_i} - V_i N_{o_i})}{\sum(V_i N_{i_i})} \times 100 \quad (3)$$

여기서, η_t 는 총괄집진효율이며 V_i 는 입자 입경별 부피, N_{i_i} , N_{o_i} 는 유입 및 유출 입자의 입경별 개수이다. 20kV의 전압을 인가했을 경우 방전극 형상에 따른 총괄집진효율은 비슷하지만 25kV 및 30kV로 인가전압이 증가함에 따라 부분집진효율에서와 같이 사각형과 나선형 방전극의 경우 총괄집진효율 상승이 원형 방전극에 비해 뚜렷하게 나타나지만 절대 증가 수치(1% 미만)로는 매우 미약한 증가분으로 이는 미세입경범위의 높은 효율 증가에도 불구하고 총괄집진에 미치는 영향은 크지 않기 때문이다. 그러나 여과집진장치의 문제점인 미세입자의

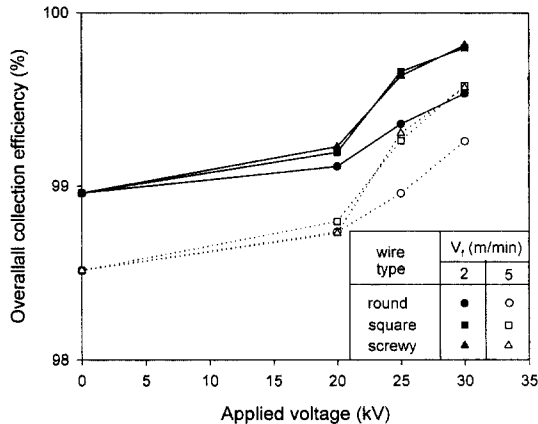


Fig. 11. Comparison of overall collection efficiency with various filtering velocities—three discharge wires (PE).

낮은 효율을 극복하기 위해서 강한 전기장을 형성하는 나선형 방전극은 매우 효과적일 것으로 판단된다. 여과속도 및 인가전압에 따른 η 는 나선형 방전극, 30 kV, 5 m/min인 경우 원형 방전극 및 30 kV의 여과속도 2 m/min과 동일효율을 보이며, 0 kV, 2 m/min에 비해 높은 총괄집진효율을 나타낸다.

따라서 나선형 또는 사각 방전극에 30 kV의 전압이 인가되면 전기력이 없는 경우에 비해 높은 효율을 유지하면서 처리유량을 2배 이상 증대시킬 수 있다.

그림 12는 여과포 재질, 여과속도 및 인가전압에 따른 총괄집진효율을 비교한 것이다. 전압을 인가하지 않은 경우 여과속도 11 m/min을 제외하고는 PE의 총괄집진효율이 Nomex에 비해 높게 나타나고 있으나 전압을 인가함에 따라 입자 부피에 비례하는 총괄집진효율이 Nomex의 경우가 더 높게 나타나고 있다. 이러한 결과로부터 부분집진효율에서 기술한 바와 같이 서브마이크론 범위의 미세입자에 대해서는 전압을 인가하더라도 PE의 부분집진효율이 Nomex에 비해 높지만, 전압인가에 따라 식(3)에 나타나는 바와 같이 입자의 부피에 비례하는 총괄집진효율이 Nomex에서 더 높게 나타남으로 인해 입자 부피가 큰 $2\mu\text{m}$ 이상의 범위에서는 Nomex의 부분집진효율이 더 큰 것으로 판단할 수 있다. 또한 그림에서 주목할 점은 여과속도 8 m/min에서 30 kV

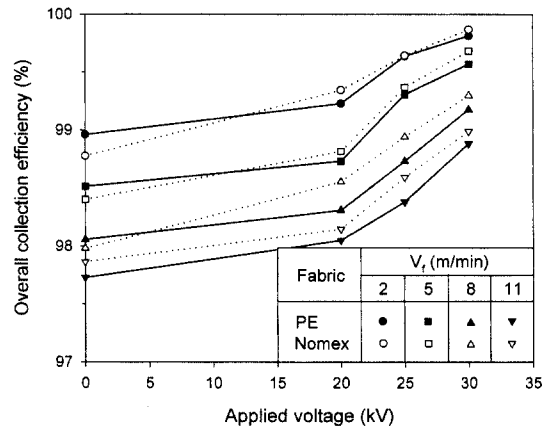


Fig. 12. Comparison of overall collection efficiency with various filtering velocities—two fabric filters (screwy wire).

의 전압을 인가하면 PE 및 Nomex 모두 여과속도 2 m/min에서 전압을 인가하지 않은 경우의 총괄집진 효율과 비슷하게 나타나므로서 4배의 처리유량 증대를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 압력손실

여과집진장치에서의 높은 압력손실은 여과포의 눈막힘으로 인해 생기게 된다. 그러나 정전 여과집진장치에서는 여과포상에 집진된 입자들이 같은 극성을 가지고 있으므로 입자들 간에 서로 척력이 작용하여 여재상에 침상구조(dendrite)가 발달하게 되고, 이로 인해 여과 표면적이 상대적으로 커져서 압력손실은 감소하게 된다. 이러한 압력손실의 감소는 인가전압이 증가할수록 고하전량으로 인한 입자들 사이의 쿨롱력이 증가하여 더욱 현저해진다.

3.4.1 분진농도 및 여과속도에 따른 압력손실

그림 13은 PE와 나선형 방전극을 사용하여 분진농도 및 여과속도에 따른 압력손실을 측정된 결과이다. 분진농도가 증가할수록 여과포의 눈막힘이 가중되어 압력손실은 커지고 있으며, 인가전압을 높일수록 압력손실은 감소하고 있다. 여과속도 5 m/min의 경우 45 mg/m^3 의 분진농도에서 20 kV의 낮은 인가전압에서도 15 mg/m^3 에서 전압을 인가하지 않은 경우보다 압력손실이 더 낮게 나타나고 있다. 여과

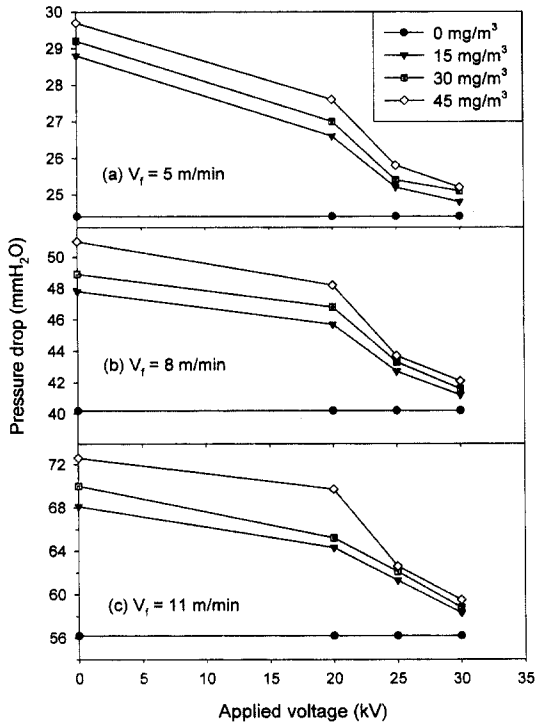


Fig. 13. Pressure drop vs. applied voltage with various dust concentrations (PE, screwy wire).

속도 8, 11 m/min에서도 5 m/min에서와 유사한 압력 손실 분포 형태를 나타내며, 25 kV 이상의 전압을 인가하면 5 m/min에서와 같이 동일 압력손실하에서 3배의 분진농도를 처리할 수 있는 것으로 나타난다.

3. 4. 2 방전극 형상에 따른 압력손실

방전극 형상에 따른 압력손실을 비교하기 위해 인가전압별 여과속도에 따른 압력손실감소율(Pressure Drop Reduction Ratio, PDRR)을 계산하였다. 압력손실감소율은 운전시작에서 한 번의 탈진주기(1 시간)까지의 압력손실 변화에 하전의 유무에 따른 정전기력 효과를 해석하기 위해 Greiner *et al.*(1981)에 의한 압력손실 감소에 관한 식을 변형한 것으로, 다음과 같이 정의한다.

$$PDRR = \frac{(\Delta P_o - \Delta P_i) - (\Delta P_{Eo} - \Delta P_{Ei})}{(\Delta P_o - \Delta P_i)} \times 100 \quad (4)$$

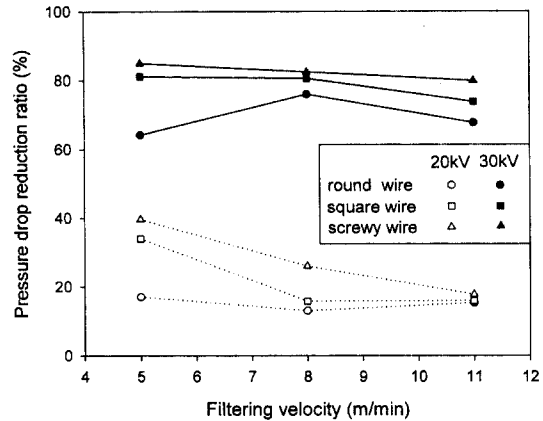


Fig. 14. Comparison of PDRR for applied voltages 20, 30 kV—three discharge wires (PE, $M_p=45$ mg/m^3).

여기서 ΔP_o 는 인가전압이 0 kV일 때의 압력손실, ΔP_{Eo} 는 정전기력이 존재할 때의 압력손실, ΔP_i 는 인가전압이 0 kV일 때 탈진후의 잔류압력손실이고 ΔP_{Ei} 는 전압이 인가되었을 때 탈진후의 압력손실이다. 그림 14는 인가전압, 방전극 형상 및 여과속도에 따른 압력손실 감소율을 나타낸 것으로, 예측한 바와 같이 인가전압 30 kV인 경우 20 kV에 비해 최저 40% 이상의 감소율효과를 보이며, 방전극 형상에 따라 나선형, 사각형, 원형 순으로 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 전압-전류 특성에서 전술한 입자 하전량의 차이가 침상구조의 형성에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 또한 여과속도가 증가하면서 PDRR은 감소하는 경향을 보이며, 이 역시 예비 하전부 내의 체류시간 감소로 하전효과가 낮아짐에 의한 것으로 평가된다(30 kV, 원형 방전극, 여과속도 5 m/min에서 PDRR이 낮게 나타난 것은 실험적 오차로 예측됨). 여과속도 5 m/min의 30 kV의 전압을 인가하면 나선형과 사각형 방전극은 80% 이상의 아주 높은 압력손실감소율을 나타내고 있으며 8 m/min과 11 m/min에서도 80% 전 후의 높은 압력손실감소율을 보이고 있다.

3. 4. 3 여과포 재질에 따른 압력손실

그림 15는 각각의 여과속도에서 나선형 방전극을 사용하였을 경우 PE와 Nomex의 압력손실을 비교

한 것이다. 여과포 자체가 가지는 압력손실($M_p = 0 \text{ mg/m}^3$), 즉 분진의 부하가 없을 경우 Nomex의 압력손실이 PE에 비해 높게 나타나고 있는데, 이는 표면처리에 있어서 PE는 발수 가공되었지만 Nomex는 모소처리만 됨으로 인해 표면이 다소 거칠기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 표면의 거칠 정도에 의해 분진이 존재할 경우의 압력손실 차는 분진이 없을 경우의 압력손실 차에 비해 더 커지게 된다. 이와 같은 이유로 그림 15에서 전압을 인가하지 않은 경우에 Nomex가 PE에 비해 압력손실이 더 크지만 여과속도 8 m/min에서 20 kV의 전압 인가에 따라 Nomex의 압력손실이 더 낮게 나타나며 11 m/min에서는 비슷한 압력손실을 보이고 있다. 반면, 5 m/min, 20 kV 이상에서 PE가 Nomex에 비해 압력손실이 낮게 나타나는 것은 Nomex에 비해 정전기력 영향이 다소 낮아지더라도(그림 16에서 언급됨) 8 m/min보다 상대적으로 낮은 여과속도에서 체류시

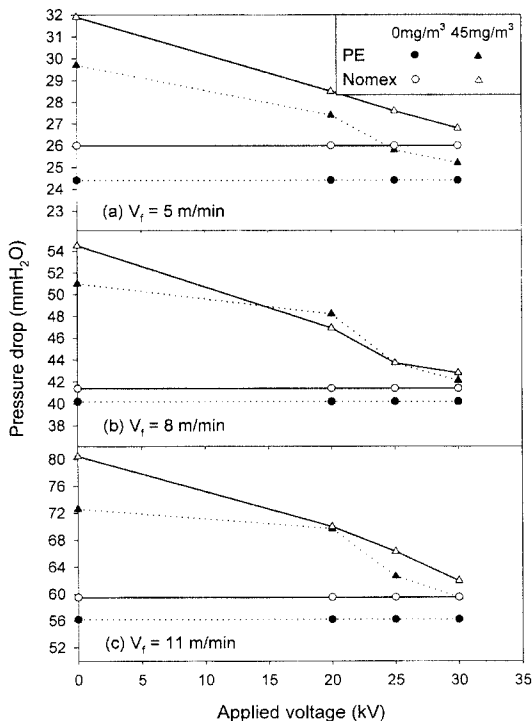


Fig. 15. Comparison of pressure drop for dust concentrations 0, 45 mg/m³-PE and Nomex (screw wire).

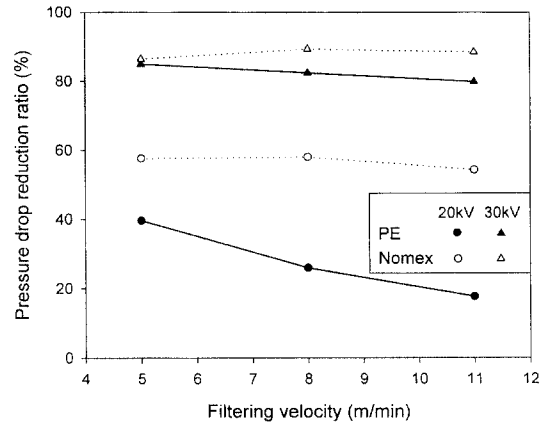


Fig. 16. Comparison of PDRR for applied voltages 20, 30 kV-PE and Nomex (screw wire, $M_p = 45 \text{ mg/m}^3$).

간 증가로 강한 전기장 효과가 충분히 작용하였기 때문이며, 11 m/min인 경우 8 m/min에 비해 전기장 효과가 감소되어 두 재료의 정전기력 효과가 상대적으로 감소되었음을 의미한다. 이러한 여과포 재질에 따른 정전기력의 영향을 알아보기 위해 PE와 Nomex의 압력손실감소율을 그림 16에 나타내었다. 30 kV의 인가전압에서는 PE와 Nomex 모두 80% 이상의 높은 압력손실감소율을 보이고 있으나 20 kV의 인가전압에서는 Nomex의 경우 최고 60%, PE는 최고 40%의 압력손실감소율을 나타내므로써 다소 차이를 보이고 있다. 이는 집진효율 특성에서 언급한 바와 같이 Nomex가 PE에 비해 정전기력의 효과가 더욱 높게 작용하는 것으로 여겨진다.

4. 결 론

방전극 형상, 여과포 재질, 인가전압, 여과속도, 분진농도 등 다양한 변수에 따른 예비하전방식 정전 여과집진장치의 집진효율 및 압력손실 변화특성에 대한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 코로나 방전전력은 4 mm 나선형, 4 mm 정방향, 4 mm 원형 순으로 높게 나타나며, 유입 유속 및 높이 않은 분진농도는 코로나 방전전력에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타난다.

2) 새 가지 유형의 방전극 중 나선형의 부분집진 효율이 가장 높게 나타나며, 20 kV의 인가전압에서는 사각형과 원형이 비슷한 부분집진효율을 보이고 25 kV 이상에서는 사각형이 원형에 비해 더 높은 효율을 보이는 것으로 나타난다. 압력손실 감소면에서도 나선형, 사각형, 원형 순으로 크게 나타나며 나선형의 경우 30 kV의 전압을 인가하면 80% 이상의 높은 압력손실감소율을 보인다.

3) PE와 Nomex의 부분집진효율은 0.75~0.9 μm 범위에서는 Nomex가 PE에 비해 최대 40% 높게 나타나며, 그 외의 입경범위에서는 비슷한 집진효율증가율을 보인다. 또한 전압 인가에 따른 압력손실 감소율도 Nomex가 크게 나타나므로 인해 정전기력에 의한 효과는 Nomex에서 더욱 크게 작용하는 것으로 판단된다.

4) 동일 유속에서 인가전압 증가에 따라 총괄집진효율(98% 이상)은 상승하며, 여과속도 2 m/min에서 20 kV의 전압을 인가하면 미세 입경범위에서 96% 이상의 높은 집진효율을 보인다. 또한 전기장 효과에 의한 입자의 하전으로 인해 처리유량 및 농도의 증대를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 동원학술재단의 연구 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사를 포함합니다.

기호설명

M_p : dust concentration (mg/m³)

V_f : filtration velocity (m/min)

V_i : inlet velocity (m/sec)

참고 문헌

- Carr, R.C. and Smith, W.B., Fabric Filter Technology for utility Coal-Fired Power Plant Part III; Performance of Full-Scale Baghouse, J. of Air Pollut. Control Assoc., 34(3), 281-293.
- Chudleigh, P.W. (1983) Reduction of Pressure Drop across a Fabric Filter by High Voltage Electrification, Filtration & Separation, 20(3), 213-216.
- Chudleigh, P.W. (1985) A Review of Pre-Charger Technology with Applications to Fabric Filtration, Filtration & Separation, 22(5), 311-316.
- Chudleigh, P.W. and Bainbridge, N.W. (1980) Electrostatic Effects in Fabric Filters During Build-up of the Dust Cake, Filtration & Separation, 17(4), 309-311.
- Donovan, R.P., L.S. Hovis, G.H. Ramsey, and D.S. Ensor (1982) Electric-Field-Enhanced Fabric Filtration of Electrically Charged Fly Ash, Aerosol Science and Technology, 1, 385-399.
- Donovan, R.P. (1985) Fabric Filtration for Combustion Sources, Marcel Dekker, New York, 149-197.
- Fjeld, R.A. and T.M. Owens (1988) The Effect of Particle Charge on Penetration in an Electret Filter, IEEE trans. ind. appl., 24(4), 725-731.
- Frederick, E.R. (1961) How dust filter selection depends on electrostatics, Chem. Eng., 68, 107-114.
- Frederick, E.R. (1980) Fibers, Electrostatics, and Filtration: A Review of New Technology, J. Air Pollut. Control Assoc., 30(4), 426-431.
- Greiner, G.P., D.A. Furlong, D.W. Van Osdell, and L.S. Hovis (1981) Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration, J. Air Pollut. Cont. Assoc., 31, 1125-1130.
- Helfrich, D.J. (1977) Performance of an electrostatically aided fabric filter, Chem. Eng. Prog., 73, 54-57.
- Henry, R.F., W.F. Podolski, and S.C. Saxena (1985) A Review of Electrostatically Augmented Gas Cleaning Devices for Particulate Removal, IEEE trans. ind. appl., 1A-21(4), 939-949.
- Humphries, W., C. Jones, G. Miles, and G. Stewart (1984) Electrostatic Enhancement of a Fabric Filter Baghouse, Proceeding of the Second International Conference on Electrostatic Precipitation, Institute of Electrostatics Japan, Kyoto, 471-475.
- Oglesby, S. Jr. and G.B. Nichols (1978) Electrostatic Precipitation, Marcel Dekker Inc., 57 pp.
- Ohtsuka, K. and M. Shimoda (1986) Mechanism of Fabric Filtration by Electrostatic Augmentation, Journal of Electrostatics, 18, 93-102.
- Penney, G.W. (1977) Using Electrostatic Forces to Reduce Pressure Drop in Fabric Filters, Powder Technology, 18, 111-116.
- Smith, W.B., J.D. McCain, D.H. Pontius, and B.E. Pyle (1984) Electrical Augmentation of Fabric Filters by Pre-charging, Proceedings of the Second International Conference on Electrostatic Precipitation, Institute

of Electrostatics Japan, Kyoto, 444 pp.
Watanabe, T., H. Fujinami, T. Takuma, and Y. Sunaga (1986)
DC Corona Discharge Characteristics and Ion-

Flow Distrbution for Several Types of Rods under
Low Pressure, IEEE trans. ind. appl., 1A-22(3),
547-553.