

상부유입식 전기 Cyclone-Bag Filter의 특성 Characteristics of Electrostatic Cyclone-Bag Filter with Upper Inlet

이 원 희 · 여 석 준

부경대학교 환경공학과

(1999년 10월 25일 접수, 2000년 1월 24일 채택)

Won-Hee Lee and Seok-Jun Yoa

Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received 25 October 1999; accepted 24 January 2000)

Abstract

The main object of this study was to investigate experimentally the characteristics of electrostatic cyclone-bag filter with upper tangential inlet in order to overcome the low collection efficiency for the submicron particle and high pressure drop which were main problems of general fabric bag filters. The experiment was carried out for the analysis of collection efficiency and pressure drop of electrostatic cyclone-bag filter comparing to those of fabric bag filter with various experimental parameters such as the inlet velocity (filtration velocity) and applied voltage, etc.

In the results, the upper tangential inlet type showed higher collection efficiency for submicron particles below 2 μm in diameter than that of center inlet and over 99.9% for overall collection efficiency. Pressure drop reduction ratios were shown as 40~50% for the applied voltage 0kV by the centrifugal force and 70~90% for 20kV by the centrifugal and electrostatic force with the tangential inlet velocity (12~21 m/s).

Key words : electrostatic cyclone-bag filter, centrifugal force, electrostatic force, collection efficiency, pressure drop reduction ratio

1. 서 론

산업발전에 의한 대기오염의 심각성으로 인해 입자상 물질을 포함한 대기오염물질에 대해 더 강화된 배출 허용기준을 입법 예고하고 있어(환경처, 1993) 이에 따른 고효율 집진장치의 개발이 절실히 요구되고 있다. 현재 개발되어 사용되고 있는 집진장치 중 여과집진장치는 연소 및 폐기물 소각공정

에서 배출되는 입자상 오염물질을 처리·제거하는데 효과적이고 집진성능이 매우 우수하여 실제 산업체에서 널리 사용되고 있으며(Beitez, 1993) 계속적인 새로운 여과포의 개발로 인해 적용범위가 광범위하여 비약적인 성장을 보이고 있다. 그러나 다른 집진장치에 비해 압력손실이 과도하여 유지·관리비용의 경제적 부담이 크며 2 μm 이하의 미세입자에 대해 집진효율이 낮을 뿐만 아니라 처리유량(여과속도)의 한계로 인해 장치규모가 큰 단점을

가지고 있어 이를 해결하기 위한 연구·개발이 시급한 실정이다.

현재까지 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 cyclone 집진장치 (Sheperd and Lapple, 1939)를 전처리 시스템으로 설치하여 여과집진장치에 유입되는 분진부하를 줄이는 방법을 사용하고 있으나 이러한 집진시스템은 두가지 단위 집진장치를 사용함으로써 설치 면적의 증가 및 유지관리비의 상승을 더욱 더 가중시키고 있으며 높은 압력손실 및 2 μm이하의 미세입자에 대한 낮은 집진효율은 해결되지 못하고 있다. 그리고 여과집진 메카니즘에 정전기력을 부가하여 (行田森男, 1993; Frederick, 1961) 미세입자에 대한 효율상승과 과도한 압력손실을 감소시키는 연구가 수행되고 있지만 이 또한 낮은 압력손실의 문제점으로 인해 이를 보완하기 위한 연구가 매우 필요하다고 판단된다.

이러한 단점들을 보완하기 위해 본 연구에서는 기존 여과집진장치에 cyclone의 원심력효과와 전기 집진장치의 정전기력효과를 1기의 시스템으로 접목시킨 상부유입식 전기 Cyclone-Bag Filter (정전 원심여과 집진장치)에 대한 특성을 해석하고자 한다. 본 실험장치는 예비하전부에 의해 대전된 입자가 집진장치 내부에 접선으로 유입되면 원심력 및 정전기력효과에 의해 본체 벽면에 1차 집진되고 2차

적으로 여과포 표면에서 입자와 여과포 섬유사이의 정전기력에 의한 상호작용으로 입자부착률, 즉 집진효율이 증가하게 된다 (Fjeld and Owens, 1988; Humphries *et al.*, 1984). 또한, 집진장치 내벽으로 1차 집진되는 분진량의 증가에 의한 여과포에 누적되는 분진량의 감소와 여과포에 부착되는 입자의 동일 극성에 의한 상호간의 척력으로 인해 침상형태로 집진되는 메카니즘 (Lastow and Bohgard, 1992; Frederick, 1980)으로 여과포에 부가되는 압력손실은 상당히 감소할 것으로 예측된다.

따라서 본 연구에서는 설치 및 유지·보수가 용이한 실린더형 예비하전방식 (Chudleigh, 1985)을 채택하여 유입유속 (여과속도), 인가전압 및 유입방식 등의 실험변수에 따른 정전 원심여과 집진장치의 전계특성, 집진효율 및 압력손실 변화에 대한 실험적 해석을 수행함으로써 2기의 집진장치가 한 시스템으로 단일화된 상부유입식 전기 cyclone/bag filter의 최적 설계조건을 도출하여 설계기술개발 및 실용화에 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구는 원심력, 전기력 및 여과집진메카니즘을

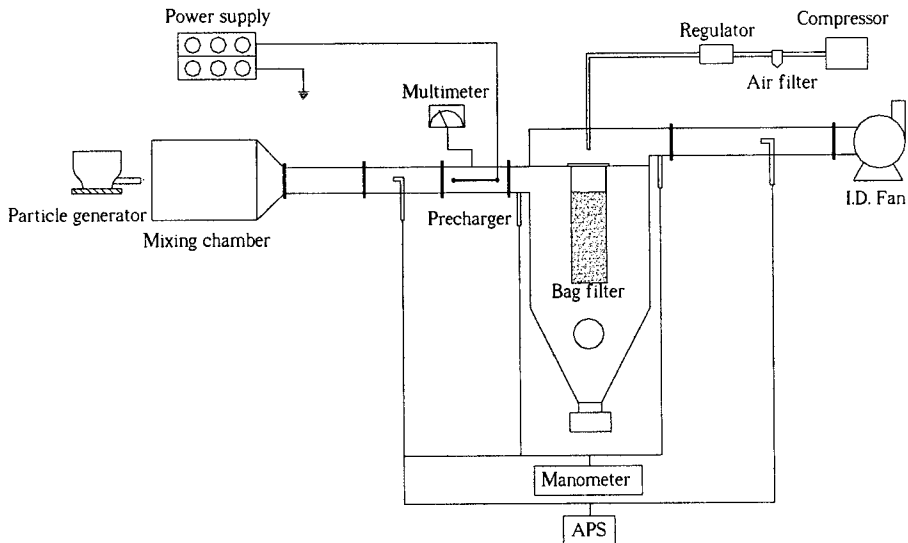


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus with upper tangential inlet.

1기의 시스템에 결합시킨 상부유입식 정전 원심여과 집진장치의 집진효율 및 압력손실특성을 실험적으로 해석하는데 있다.

본 집진시스템은 원심력 효과를 고려하기 위한 접선유입구와 일반 여과집진장치의 특성을 고려한 중앙유입구를 가진 실험장치 본체, 입자를 하전시키

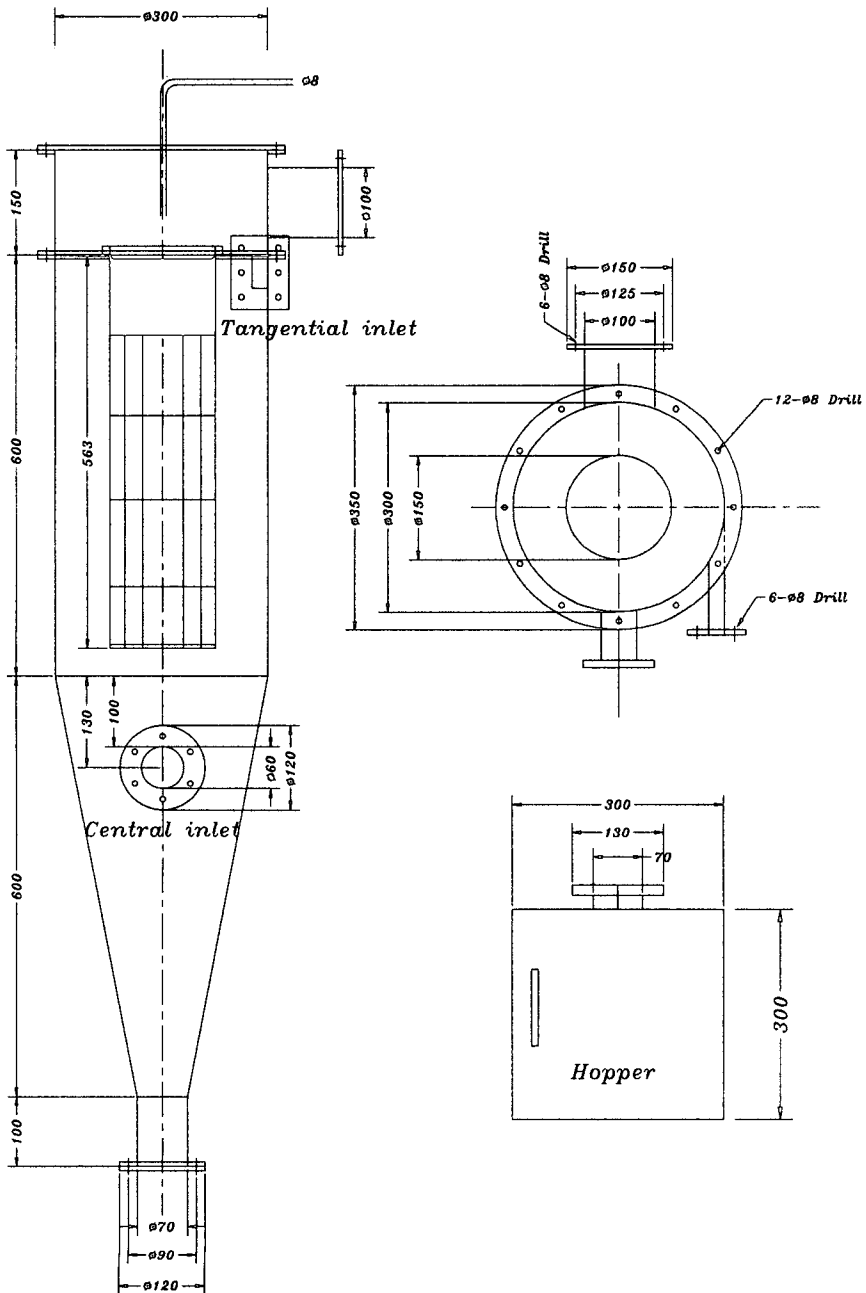


Fig. 2. Schematic of electrostatic cyclone/bag filter with upper tangential inlet.

기 위한 예비하전부, 예비하전부에 단계적으로 고전압을 공급할 수 있는 고전압 발생장치, 분진 발생 및 공급장치, 여과포 탈진을 위한 pulse-jet 탈진장치, 탈진된 분진을 제거하는 호퍼(hopper), 처리유량을 조절하는 흡입 송풍기와 전압-전류 특성, 집진 효율 및 압력손실 등을 측정할 수 있는 측정시스템으로 구성되어 있으며 상부유입식 전기 cyclone/bag filter의 전체 시스템에 관한 모식도를 그림 1에 나타내었다.

2. 1. 1 실험장치 본체

본 실험장치는 기존의 여과집진장치와 상부로 유입되는 원심력 집진장치의 결합형태로서 집진장치 내부에 1개의 여과포가 장착되어 있다. 표 1은 본 실험에서 사용된 여과포의 규격 및 물리적인 특성을 나타내었다. 그리고 몸통직경, 몸통길이, cone의 길이는 일반적으로 사용되고 있는 Lapple의 표준 사이클론의 규격에 맞추어 제작되었다. 분진의 유입을 위해 집진장치 상부에 원심력효과를 고려하기 위한 접선유입구와 기존의 여과 집진장치의 특성과 비교하기 위해 본체 하부에 중앙유입구가 설치되어 있으며, 그림 2에 상부유입식 전기 cyclone/bag filter 본체의 모식도를 나타내었다.

2. 1. 2 실험용 분진 및 분진공급장치

실험용 분진은 삼천포 석탄 화력발전소에서 포집한 coal fly ash이며, 외부 습도에 의해 입경분포 및 입경별 개수가 변화하는 것을 막기 위해 24시간 이상 건조한 후 사용하였다.

그림 3은 입경별 수농도 및 질량농도의 측정이 가능한 APS(Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc.)를 사용하여 분진의 입경분포를 측정된 것이다. 분진의 입경분포는 0.5~15 μm의 범위를 가지며 개수기준

평균입자크기는 3.29 μm, 중량기준 평균입자크기는 5.11 μm로 나타났다. 그리고 3 μm 이하의 미세입자수가 42.6% 정도로 본 실험에서 사용하기에 적합한 분진으로 판단된다. 분진의 화학조성은 SiO₂ (64.7%), Al₂O₃ (22.85%), Fe₂O₃ (7.66%) 등으로 구성되어 있으며 SiO₂ 및 Al₂O₃가 전체의 약 87% 정도를 차지하고 있다. 또한 실험조건인 상온에서 분진의 비저항은 2 × 10⁸ ~ 1.6 × 10⁹ Ω·cm이며 비중은 2.14로 나타났다.

분진을 기류 중으로 일정하게 공급하기 위한 분진 공급장치는 screw feeder와 전압조절장치(power supply)로 이루어져 있다. 분진은 분진 hopper의 하부에 위치한 screw feeder의 일정한 회전에 의해 hopper의 옆에 부착되어 있는 원형관으로 유입되고, 원형관의 상부에서 압축공기를 상방향으로 분사

Table 1. Dimension and physical characteristics of fabric filter.

Item	Content
Material	Polyester
Dimension (mm)	150 ^w × 563 ^l × 1ea
Weight (g/m ²)	510
Thickness (mm)	2
Air permeability (cc/cm ² /sec)	20
Tensile strength (kg/5cm)	165 × 150
Bursting strength (kg/cm ²)	37
Thermal resistance temp (°C)	125

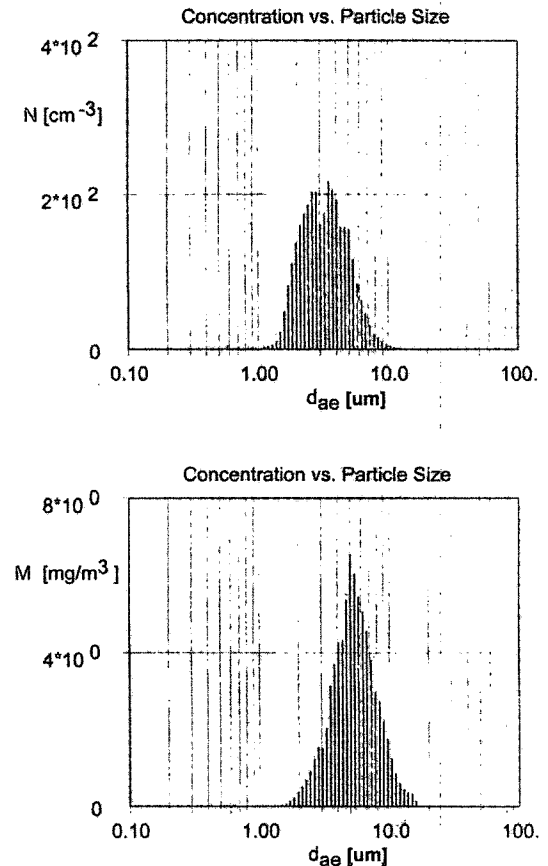


Fig. 3. Size distribution of test dust.

시켜 주면 상·하부의 압력구배에 의해 분진이 기류중으로 분산, 공급되어진다. 그리고 전압조절장치를 사용하여 screw의 회전속도를 제어함으로써 공급되는 분진의 양을 조절하고, 이에 따라 유입농도를 변화시킬 수 있게 제작되었다.

2. 1. 3 예비하전 장치

본 실험장치의 전단부에서 입자를 예비하전시키는 부분으로서, 고전압 공급장치에서 공급되는 고전압이 실린더 단면의 중심에 위치한 코로나 방전극에 인가되면 실린더 내부에 전계가 형성되어 기류중의 분진이 하전되는 원리이다.

예비하전부는 직경 100 mm, 길이 300 mm의 실린더형이고, 실린더 단면의 중심에 길이 100 mm의 방전극이 설치되어 있다. 실린더 내 유속으로 인한 방전극의 흔들림을 막기 위해 방전극 양단을 고정할 수 있는 테프론 재질의 고정대가 있고, 그 내부로 고전압이 인가되어진다. 방전극은 직경 1 mm의 스테인레스 스틸 재질의 원형 방전극을 사용하였다.

2. 1. 4 고전압 공급장치

예비하전장치의 방전극에 처리가스의 이온화와 분진의 하전을 위해 고전압을 공급/조절하는 고전압 발생시스템으로 AC 220 V를 1차측에서 입력하여 2차측에 유도 발생하는 교류의 고전압을 고전압용 실리콘 정류기로 단파정류하여 직류 고전압을 발생시키는 장치이며 0~100 kV의 전압과 0~10 mA의 전류범위에서 연속적이고 단계적인 조작이 가능하게 제작되었다. 그리고 고전압을 제어하는 digital control box와 고전압 발생기 본체로 구성되어 있다.

2. 1. 5 Pulse-jet 탈진 장치

본 실험에서 사용된 탈진 방식은 충격 기류식으로 이 방식은 여과포의 외면 여과에 의한 퇴적 분진에 대해서 여과포 내면의 상부에서 순간적으로 충격 기류를 공급하여 그 충격과 역기류에 의해 여과포 외면의 분진을 털어내는 방식이다. 공기 압축기에서 생성된 압축공기는 air filter와 air dryer를 통과하면서 정화되어지고 일정 압력(5 kg/cm²)으로 조절 가능한 압력조절기와 탈진 주기 및 탈진 시간 조절이 가능한 타이머로 구성된다.

Table 2. Inlet velocity and filtration velocity with inlet types.

Flow rate (m ³ /min)	Filtration velocity, V _f (m/min)	Inlet Velocity, V _i		Precharger Velocity (φ100 mm) (m/s)
		Tangential V _{i,t} (m/s)	Central V _{i,c} (m/s)	
0.65	2.8	12	5.54	1.38
0.815	3.5	15	6.92	1.73
0.978	4.3	18	8.30	2.08
1.141	5.0	21	9.69	2.42

2. 2 실험방법

본 실험의 내용은 유입유속(여과속도) 및 인가전압에 따른 일반 여과집진장치와 상부접선유입식 정전 원심여과 집진장치의 집진효율과 압력손실 특성에 대한 비교로 구분될 수 있다. 집진특성을 파악하기 위해 입자의 크기별 수농도 및 질량농도의 측정이 가능한 입정계수기인 APS (Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc.)를 사용하여 유입농도 및 유입유속의 변화에 따른 입경별 집진효율을 측정하였으며, 본 실험의 주요 변수 중의 하나인 유량 및 여과속도는 미세압력계 (micromanometer, Furness Controls Ltd, FCO 12)를 사용하여 덕트내 유속을 측정함으로써 산출되어졌다. 유속 측정 및 분진 채취 지점은 대기 오염공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4% 되는 지점을 선정하고, 각 지점에서 측정된 유속 및 분진의 수농도와 질량농도를 산술 평균하여 그 평균치를 사용하였다. 또한 중앙유입과 접선유입의 유입방식 및 정전기력 유무에 따른 압력손실특성을 비교·분석하기 위해 실험장치의 유입·출구 부분 50 mm 지점에서 미세압력계를 사용하여 정압차에 의해 계산되는 압력손실을 2분 간격으로 30분간 측정하여 유입유속 및 인가전압에 따른 각각의 압력손실을 측정하였다.

본 연구에서의 실험적 변수로는 유입농도 300 mg/m³, 인가전압은 접선유입시 0, 10, 20 kV(중앙유입 0 kV), 본체로의 유입유속(여과속도)은 접선유입시 12~21 m/s(2.8~5.0 m/min), 중앙유입시 5.54~9.69 m/s(2.8~5.0 m/min)로 처리유량 0.65~1.14 m³/min의 범위에서 수행되었으며 구체적 data는 표 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전압-전류 특성 실험

실험조건변화에 따른 전계특성을 파악하기 위해서 인가전압, 유입농도 및 유입유속 변화에 따른 실험을 Multimeter (Fluke 27, LG DM-332)를 사용하여 수행하였다. 그림 4는 가스에 분진입자가 적재되지 않은 $M_p=0.0\text{ mg/m}^3$ 인 조건에서 덕트내 가스 유속에 따른 전압-전류 특성을 비교한 것이며, 그림 5는 유입농도 변화에 따른 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입유속에 따른 전압-전류 특성은 다소 차이가 있지만 그 차이는 거의

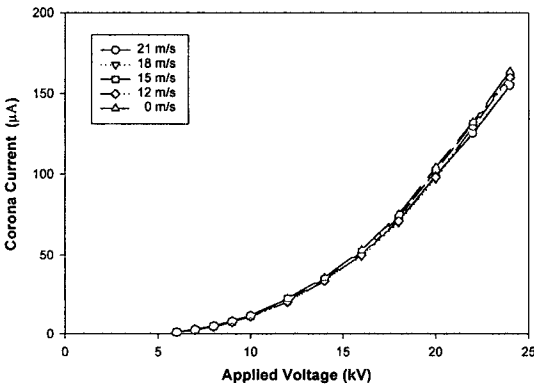


Fig. 4. Current vs. applied voltage with tangential inlet velocities ($M_p=0.0\text{ mg/m}^3$).

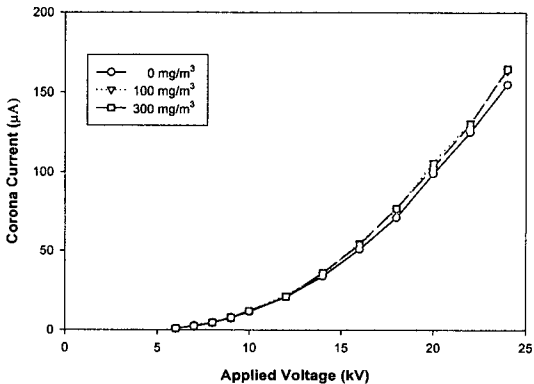


Fig. 5. Current vs. applied voltage with dust loadings (tangential inlet velocity, $V_{t,i}=21\text{ m/sec}$).

미미한 정도이며 유입농도 유무에 따른 방전전류의 차이 또한 거의 변화가 없는 것으로 보여진다. 유속에 따른 미소한 차이는 Jaworek과 Krups(1996)에 의해 수행된 실험연구와 유사한 결과로서 음극방전극을 사용할 경우, 가스흐름의 속도에 비해 접지극으로 흐르는 전자의 이동속도가 매우 빠르기 때문에 접지극으로 흐르는 전류의 방해요소로 큰 작용을 하지 못함을 알 수 있다. 따라서 본 실험 범위에서는 유입유속 및 유입농도에 따른 전압-전류 특성의 차이는 거의 없는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 인가전압이 25 kV 이상이 되면 접지극으로의 전류흐름이 증가하여 스파크가 생길 우려가 있으므로 본 실험에 적용되는 인가전압은 각각 10, 20kV로 설정하였다.

3.2 집진효율 특성

3.2.1 입경별 집진효율

상부접선유입시 선회류형성에 의한 원심력효과와 예비하전에 의한 전기력효과가 결합하여 집진특성에 미치는 영향을 일반 여과집진장치에 준하는 중앙유입식과 비교하기 위해 APS를 사용하여 유입·출구에서 개수측정을 하고 식(1)에 의해 입경별 집진효율을 계산하였다.

$$\eta_j(\%) = \frac{N_{in,j} - N_{out,j}}{N_{in,j}} \times 100 \quad (1)$$

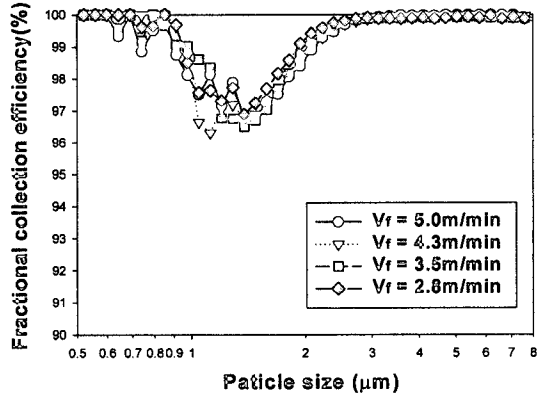
여기서, η_j 는 입경별 부분집진효율, $N_{in,j}$ 는 입경별 유입 입자수, $N_{out,j}$ 는 입경별 유출 입자수를 나타낸다.

그림 6(a)는 중앙유입(인가전압 0kV)의 경우 유입농도 300 mg/m^3 일 때 여과속도 $V_f=2.8, 3.5, 4.3, 5.0\text{ m/min}$ 에 따른 입경별 집진효율을 나타낸 것이다. $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 의 범위를 제외한 모든 입경범위에서 98% 이상의 높은 집진효율을 보이며, 최소 집진효율을 나타내는 임계입경 $1\text{ }\mu\text{m}$ 부근에서 96%의 다소 낮은 집진효율을 나타낸다. 이는 일반여과집진의 특성인 입자의 확산, 직접차단, 관성력효과에 의해 해석될 수 있으며, 또한 $2\text{ }\mu\text{m}$ 이하의 입경에서 여과속도가 5.0 m/min 으로 증가되면서 상대적으로 낮은 집진효율을 보이는 것은 분진입자의 통과 메카니즘인 압출(seepage), 불어나감(pinhole plugs) 등의

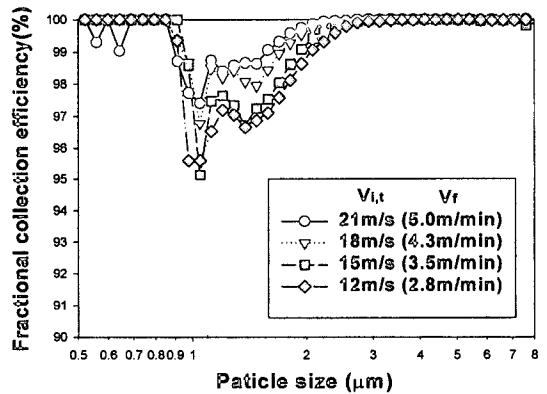
효과(El-Shobokshy *et al.*, 1994)에 의한 것으로 판단된다.

그림 6(b)는 중앙유입과 동일한 조건에서, 원심력 효과 및 여과집진에 의한 집진특성을 파악하기 위해 접선유입식, 인가전압 0kV 및 여과속도 2.8~5.0 m/min(접선유입유속 $V_{i,t}=12\sim 21$ m/s)일 때의 집진효율을 나타낸 것이다. 1~2 μm 의 입경 범위를 제외한 모든 영역에서 98% 이상의 집진효율로 중앙유입과 유사한 경향을 나타내는데 반해, 1~2 μm 의 입경범위에서 유입유속변화에 따른 집진특성은 중앙유입의 경우와 매우 뚜렷한 차이를 보임을 알 수 있다. 즉, 유입유속(여과속도)이 증가할수록 일반여과집진의 특성과는 달리 집진효율이 높아지는 경향을 보이며 유입유속 21 m/s인 경우 12 m/s에 비해 2% 이상의 높은 집진효율을 나타낸다. 이는 중앙유입에서 압출, 붙어나감 등으로 여과집진되지 않을 수 있는 일부 분진입자들이 접선유입으로 생성된 선회류에 의한 원심력효과에 의해 1차 분리 집진되고 있기 때문이며(Zhou and Soo, 1990), 이에 의한 효과는 유입유속이 증가할수록 더욱 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 확산에 의한 효과가 감소하면서 관성력이 회복되는 전환점인 입경입경 1 μm 부근은 상대적으로 높지 않은 집진효율을 나타내는데 이러한 미세입자에 대한 집진특성을 보완하기 위해 유입부 전단에 예비하전부를 설치하여 정전기력 효과를 부가함으로써 집진효율의 향상을 도모할 수 있다.

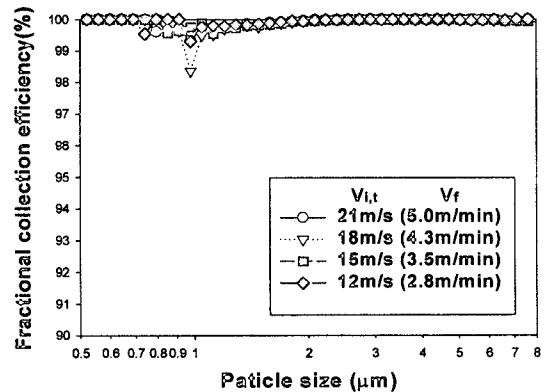
즉, 그림 6(c)는 접선유입에서 인가전압 20kV인 경우 원심력 및 정전기력효과가 결합됨으로써 유입유속에 따른 입경별 집진효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 접선유입유속 $V_{i,t}=12\sim 21$ m/s(여과속도 2.8~5.0 m/min), 유입농도 300 mg/m³일 때 모든 입경범위에서 99% 이상의 높은 집진효율을 보이며, 특히, 0.9~2 μm 범위에서 접선유입식의 전기력이 고려되지 않은 경우(그림 6(b))에 비해 최대 5% 정도의 집진효율 증가가 나타나고 있다. 더욱이 유입유속이 낮은 12, 15 m/s에서 이에 대한 효과는 매우 뚜렷하게 보임을 알 수 있다. 이는 유입유속이 낮은 경우 접선유입에서 원심력효과가 작아져 장치벽면에 1차 집진되는 효과의 감소를 전기 사이클론의 특성인 전기력에 의해 장치벽면으로의 입자이동도(Dietz, 1982)를 회복하며, 또한 관성력 및 차단효과



(a) central inlet (applied voltage, 0 kV)



(b) upper tangential inlet (applied voltage, 0 kV)



(c) upper tangential inlet (applied voltage, 20 kV)

Fig. 6. Fractional collection efficiency vs. particle diameter with filtration velocities (inlet velocities) ($M_p = 300 \text{ mg/m}^3$).

가 지배적인 2 μm 이상의 큰 입자에 비해 정전기력이 효과적인 미세입자의 경우 정전기력에 의한 여과포의 집진이 동시에 결합되어 나타나기 때문인 것으로 추정된다.

3. 2. 2 총괄집진효율

그림 7은 유입농도 300 mg/m³ 일 때, 중앙유입과 접선유입에서 여과속도 2.8, 3.5, 4.3, 5.0 m/min (접선 유입속도 12, 15, 18, 21 m/s), 인가전압 0, 10, 20 kV 에 대한 총괄 집진효율을 비교한 것으로서, 총괄 집진효율식은 다음과 같이 표시된다(단, 입자는 구형으로 가정).

$$\eta_t (\%) = \frac{\sum(V_j N_{in,j} - V_j N_{out,j})}{\sum(V_j N_{in,j})} \times 100 \quad (2)$$

여기서, η_t는 총괄집진효율, V_j는 입경별 부피, N_{in,j}는 입경별 유입 입자수, N_{out,j}는 입경별 유출 입자수를 나타낸다.

접선유입 및 일반 여과집진장치의 특성을 지닌 중앙유입의 경우 99.8% 이상의 총괄집진효율을 보이며, 중앙유입에 비해 접선유입시 다소 높은 집진효율을 나타냄을 알 수 있다. 인가전압 0kV 일 때 접선유입시 유입유속이 12 m/s에서 21 m/s로 높아질 때 집진효율은 증가하는 반면, 중앙유입인 경우 미세하게 감소하는 경향을 나타내며 또한 접선유입 및 중앙유입의 유입유속별 집진효율차이는 유속이 증가하면서 더욱 크게 나타나는데 이는 전술한 바와 같이 원심력효과 증가에 의한 1차 집진이 증대되기 때문이다. 더욱이 인가전압 20kV인 경우 유입 유속에 관계없이 최저 99.9% 이상의 매우 우수한 집진특성을 보이고 있다. 이는 입경별 집진효율에서도 보듯이 접선유입에 의한 원심력효과와 예비하전에 의한 전기력이 결합되어 집진기 본체 벽면으로 향하는 입자의 이동속도를 더욱 가속화시켜 1차 집진되는 양이 증가되는 것과 여과집진 메카니즘에 정전기력효과가 부가되어 여과포에 의한 집진효과가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 일반 여과집진장치에 원심력효과와 정전기력효과가 부가된 이러한 집진시스템은 유속변화에 크게 상관없이 서로 보완하며 작용하기 때문에 다양한 처리유량을 적용하기에 적합할 것으로 사료된다.

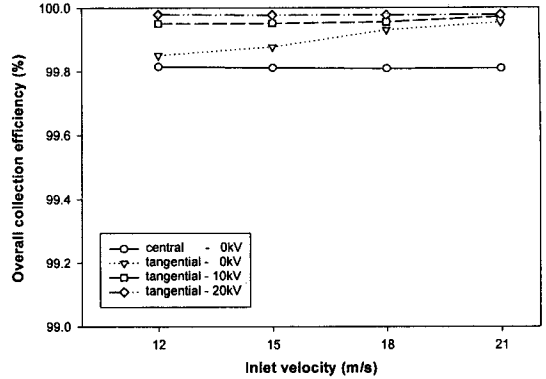


Fig. 7. Overall collection efficiency vs. inlet velocity with inlet types and applied voltages (W₀ = 300 mg/m³).

3. 3 압력손실

여과집진장치의 가장 큰 문제점인 높은 압력손실은 분진이 여과포에 부착되어 분진퇴적층을 형성하게 되고 이 분진층은 여과포의 공극을 막는 눈막힘 현상에 의해서 발생하게 되는데 여과집진장치에서 발생하는 여과포의 압력손실은 Darcy의 압력손실식(김종석과 조병환, 1990)으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P = K_1 V_f + K_2 C_i V_f^2 t \quad (3)$$

여기서 K₁, K₂는 여재 및 분진층의 저항계수, V_f는 여과속도, C_i는 여과재 분진부하농도, t는 여과시간, 우변의 첫항은 청정 여과재에 의한 압력손실, 둘째항은 포집분진층에 의한 압력손실을 의미한다.

본 실험은 식(3)의 우변 둘째항의 여과포 분진층 저항에 의한 압력손실을 감소시키기 위해 원심력 및 전기적효과를 효과적으로 결합하여 분진입자가 여과포상에 침착하기 전에 미리 집진장치 내벽에서 1차 집진되는 효과를 최대로 증대시키고, 2차적으로, 여과포상에 부착된 입자들은 예비하전에 의한 정전기력의 영향으로 서로간의 전기적 힘에 의해서 침상구조(dendrite)를 형성시켜 여과표면적을 상대적으로 넓혀서 기존의 여과집진장치에서 가장 큰 문제점인 과도한 압력손실을 줄이는데 그 목적이 있다.

그림 8은 유입농도 300 mg/m³ 일 때 유입방식 및 인가전압에 따른 유입유속별 분진층에 의해 여과포에 부가되는 압력손실을 비교한 것이다. 중앙유입

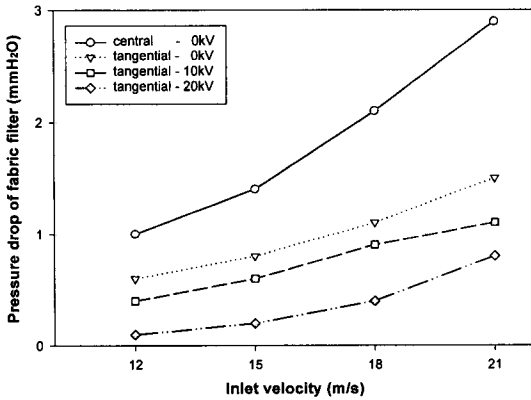


Fig. 8. Pressure drop of fabric filter vs. inlet velocity with inlet types and applied voltages ($M_{p0} = 300 \text{ mg/m}^3$).

및 접선유입 모두 유입유속(여과속도)이 증가함에 따라 여과포에 부가되는 압력손실은 증가하는 것을 볼 수 있으며, 인가전압 0kV에서 접선유입의 경우 중앙유입에 비해 유입유속 변화에 따른 여과포에 걸리는 압력손실 증가 구배는 작게 나타나며, 접선유입에 전압 20kV를 인가할 때 이에 대한 효과는 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 즉, 유입유속 12m/s, 인가전압 0kV에서 전압을 인가하지 않은 중앙과 접선유입의 여과포 압력손실차이는 0.4mmHzO인데 비해 접선유입유속이 15, 18, 21 m/s(여과속도 3.5, 4.3, 5.0 m/min)로 증가할수록 압력손실차이는 0.6, 1.0, 1.4mmHzO로 더욱 커짐을 볼 수 있다. 이는 접선유입의 경우 유입유속 증가에 의한 원심력효과 증대에 의해 집진장치 내벽으로의 1차 집진되는 효과가 증가되는 것과 식(3) 우변 둘째항에서 보듯이 유입유속, 즉 여과속도가 높아질 때 여과포 압력손실은 여과속도의 2승에 비례하여 증가하는 결과가 결합되어 나타나기 때문이다. 따라서, 식(3)의 여과속도 증가에 의한 V_f^2 의 영향을 제외하고 단지, 유입유속 증대에 의한 원심력효과에 의해 1차 집진되는 효과(즉, 중앙유입에 비해 C_i 의 감소)를 간접적으로 규명하기 위해 다음 section의 식(4)를 도입하여 해석할 수 있다.

또한, 접선유입의 인가전압 10, 20kV인 경우, 중앙유입 0kV의 경우에 비해 분진층에 의한 여과포의 압력손실은 현저히 낮게 나타남을 볼 수 있다. 즉, 인가전압 20kV의 접선유입과 중앙유입의 여과

포 압력손실 차이는 접선유입유속 $V_{i,i} = 12 \text{ m/s}$ 에서 0.9 mmHzO인데 반해, 유입유속이 15, 18, 21 m/s로 높아질 때 1.2, 1.7, 2.1 mmHzO로 더욱 증가함을 알 수 있으며, 특히, 유입유속 21 m/s에서 접선유입 20kV인 경우 중앙유입 0kV에 비해 여과포 압력손실을 3배 이상 감소시킬 수 있는 것으로 추정된다. 이는 전술한 바와 같이 접선유입 0kV의 경우와 유사하게 유입유속 증가에 의한 원심력효과 및 전압인가에 의한 전기력이 적절히 결합되어 장치벽면으로의 반경방향 입자 이동도가 더욱 커짐으로써, 분진입자가 여과포에 도달하기 전에 1차 집진되는 분진량이 증가하는 것과 2차적으로 정전기력을 가진 입자들이 여과포상에 부착될 때 서로간의 척력으로 인해 여과포상에서 침상구조를 형성하여 여과포면적을 증가시켜서 여과포 압력손실을 감소시키기 때문이다. 특히, 유입유속이 증가하면서 중앙유입에 비해 압력손실 차이가 더욱 커지는 것은 위에서 설명한 이유에 첨가하여 앞서 언급한 바와 같이 식(3)의 둘째항에서 유입유속, 즉 여과속도 증가(V_f^2 의 효과) 자체에 의한 영향이 결합되어 나타난 결과이다. 그리고 인가전압이 10, 20kV로 높아질수록 고하전량으로 인해 반경방향으로의 이동속도가 더 증가하게 되고 입자들 사이의 쿨롱력이 증가하여 여과포상의 침상구조가 더 잘 형성되기 때문에 압력손실의 감소효과는 더욱 뚜렷해진다.

따라서, 동일 여과포 압력손실조건에서 접선유입 0, 20kV인 경우 중앙유입 0kV에 비해 처리량을 1.5, 2배 정도로 각각 증대시킬 수 있는 것으로 예측된다.

3.4 압력손실 감소율(Pressure Drop Reduction Ratio)

중앙유입과 접선유입에서의 분진층에 의한 여과포 압력손실을 정량적으로 비교·분석하기 위해 식(4)의 압력손실 감소율(Pressure Drop Reduction Ratio, PDRR)을 계산하였으며, 식(4)는 Greiner *et al.* (1981)의 압력손실 감소율에 관한 식을 변형한 것으로, 다음과 같이 정의한다.

$$PDRR = \frac{(\Delta P_C - \Delta P_{Cr}) - (\Delta P_T - \Delta P_{Tr})}{(\Delta P_C - \Delta P_{Cr})} \times 100 \quad (4)$$

여기서, ΔP_C 는 중앙유입 0kV에서의 압력손실,

ΔP_1 는 접선유입에서 인가전압 0, 10, 20 kV인 경우 압력손실, ΔP_{C_r} 은 중앙유입에서 탈진 후의 압력손실이고 ΔP_{T_r} 은 접선유입에서 탈진 후의 압력손실을 나타낸다.

그림 9는 유입농도 300 mg/m³일 때 일반 여과집진장치의 특성을 나타내는 중앙유입(인가전압 0 kV)에 비교된 접선유입(인가전압 0, 10, 20 kV)의 접선유입유속별 여과포에 부가되는 압력손실 감소율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 인가전압 0 kV인 경우 유입유속에 따른 압력손실 감소율(PDRR)은 유입유속이 증가함에 따라 최저 40%에서 최고 50% 정도로 상승하는 것을 볼 수 있다. 식(3)의 우변 둘째항의 여과포 압력손실에서 중앙유입 및 접선유입의 압력손실 차이는 유입유속 증가(접선유입인 경우 원심력효과증대)에 따라 중앙 및 접선유입의 여과포 분진 누적량의 차이 즉, ΔC_i 와 V^2 이 결합되어 나타나므로 단지, 원심력효과 증대에 의한 ΔC_i 의 증가(장치 벽면으로의 1차 집진효과 증가)에 의해 나타나는 중앙 및 접선유입의 압력손실 차이를 평가하기는 어렵다. 그러나, 식(4)에서 보는 바와 같이 PDRR의 경우 여과속도의 수치 자체는 고려되지 않으며, 단지 여과포의 분진 누적량에 의존하기 때문에 접선유입 0 kV인 경우 원심력효과로 인해 본체 벽면에 1차 집진되는 분진량은 유속증가에 따라 커지며(C_i 의 감소), 즉, 유입유속이 높아지면서 원심력효과의 증대로 압력손실 감소율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 인가전압 20 kV인 경우, 70% 이상의 높은 압력손실 감소율을 보이며, 유입유속이 증가하면서 PDRR은 점진적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 원심력효과와 전기력에 의한 영향으로 집진기 내벽으로의 반경방향 이동속도를 증가시켜 1차 집진되는 양을 증대시키고 이로 인해 여과포에 부가되는 분진량이 감소하게 된다. 또한, 예비하전에 의해 대전된 분진들이 여과포 상에서 상호간의 전기력에 의해 침상구조를 잘 형성시켜 여과포면적을 넓히기 때문에 상대적으로 압력손실이 낮아진다는 것을 의미하며, 유입유속이 21 m/s의 경우 총 PDRR의 70% 중에서 약 50%는 접선유입에 의한 원심력효과이고 약 20%는 전기력효과라고 볼 수 있다. 이러한 경향은 유속이 낮아질수록 원심력효과는 감소하는 반면에 전기력효과는 상대적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며 이는 유속

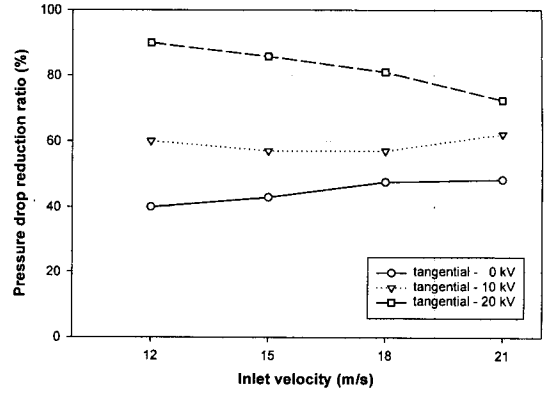


Fig. 9. Pressure drop reduction ratio vs. inlet velocity with applied voltages ($W_p = 300 \text{ mg/m}^3$).

감소에 의한 하전부내에서의 체류시간증가로 인한 하전량의 증가와 접선유입유속 감소에 의한 관성력의 감소로 전기력에 의한 반경방향 입자 이동효과를 증대시키기 때문이다. 그리고 인가전압 10 kV인 경우, 원심력에 전기력효과가 부가되는 전환과정으로 60% 정도의 PDRR을 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 원심력, 전기력 및 여과집진 메카니즘을 단위 시스템에 결합시킨 상부유입식 정전 원심여과 집진장치의 특성을 파악하기 위해 유입방식, 유입유속(여과속도) 및 인가전압 등의 실험변수에 따른 집진효율 및 압력손실 특성에 대한 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 접선유입시 인가전압 0 kV(유입유속 12~21 m/s)인 경우, 일반 여과집진장치의 특성을 지닌 중앙유입에 비해 다소 높은 99.8% 이상의 총괄 집진효율을 나타내며, 1~3 μm 범위의 미세입자 영역에서 유속 증가에 따른 집진효율 상승을 보여주고 있다. 특히, 접선유입시 인가전압 20 kV(유입유속 12~21 m/s)인 경우, 99.9% 이상의 높은 총괄 집진효율을 나타낸다.

2. 접선유입(인가전압 0 kV)시 분진층에 의해 여과포에 부가되는 압력손실은 유입유속이 증가할수록 중앙유입 0 kV에 비해 그 증가 구배는 감소하며, 접선유입에 전기력(인가전압 10, 20 kV)이 부가될

때 그 효과(압력손실 증가 구배의 감소)는 더욱 뚜렷하게 나타난다.

3. 접선유입시 인가전압 20kV 일 때 일반 여과집진장치의 특성인 중앙유입 0kV에 비해, 동일 여과포 압력손실 조건에서 2배 이상의 처리유량 증대효과를 기대할 수 있다.

4. 유입농도 300mg/m³, 유입유속 21 m/s, 인가전압 0kV에서 접선유입의 경우 원심력효과로 중앙유입에 비해 40% 이상의 압력손실 감소효과를 보여주고 있으며 접선유입에 20kV의 전압이 인가될 때 전기력 효과가 결합되어 70% 이상의 압력손실 감소 효과를 나타낸다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(98-2-13-02-01-1)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 김중석, 조병환(1990) 대기오염방지기술, 동화기술.
- 환경처(1993), 대기 환경 보전법 시행규칙(개정 1992. 8. 8. 총리령 404호).
- 行田森男(1993) 여과집진 기술의 최근의 동향, 첨단환경기술, 1(2), 2-9.
- Beitez, J.(1993) process engineering and design for air pollution control, PTR Prentice Hall, 331-369, 414-449.
- Chudleigh, P.W.(1985) A review of pre-charger technology with applications to fabric filtration, Filtration & Separation, 22(5), 311-316.
- Dietz, P.W.(1982) Electrostatically enhanced cyclone separators, Powder Technology, 31, 221-226.
- El-Shobkshy, M.S., S.A. Al-Sanea, and A.M. Adnam(1994) Computer simulation of monodispers aerosol collection in fibrous filters, Aerosol Sci. and Tech., 20, 149-160.
- 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(6), 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.
- Humphries, W., C. Jones., G. Miles, and G. Stewart(1984) Electrostatic enhancement of a fabric filter bag-house, *Proceeding of the Second International Conference on Electrostatic Precipitation*, Institute of Electrostatics Japan, Kyoto, 471-475.
- Jaworek, A and A. Krupa(1996) Corona discharge from a multipoint electrode in flowing air, Journal of Electrostatics, 38, 187-197.
- Lastow, O. and M. Bohgard(1992) Simulation of dendrite formation of aerosol particles on a single fibre, J. Aerosol Sci., 23(1), S105-S108.
- Sheperd, C.B. and C.E. Lapple(1939) Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collector, Industrial and Eng. Chem., 131(8), 972-984.
- Zhou, L.X. and S.L. Soo(1990) Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator, Power Technology, 63, 45-53.