

## 하부유입식 원심 여과집진장치의 특성

여 석 준

부경대학교 환경공학과

(1999년 9월 7일 접수, 2000년 1월 7일 채택)

## Characteristics of Cyclone-Bag Filter with Bottom Inlet

Seok-Jun Yoa

*Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University*

### ABSTRACT

The main object of this study was to investigate experimentally the characteristics of cyclone-bag filter with bottom inlet to decrease the high pressure drop which was one of main problems of fabric bag filter. The experiment was executed for the analysis of collection efficiency and pressure drop (specially, pressure drop of fabric filter) characteristics of the cyclone-bag filter in comparison with those of general fabric bag filter with various experimental parameters such as the inlet velocity, dust loading and variation of vortex region, etc. In the results, the tangential inlet type showed higher collection efficiency for submicron particles below  $1 \mu\text{m}$  in diameter than of center inlet, and over 99% for overall collection efficiency. For the inlet particle concentration  $100 \text{ mg/m}^3$ , pressure drop reduction ratios were shown as 15~38% with the inlet velocity in case of large bag, while 30~48% for small bag due to the increase of vortex region.

---

Key Words : Cyclone-Bag Filter, Fabric Bag Filter, Collection Efficiency, Pressure Drop, Pressure Drop Reduction Ratio

## 요약문

여과집진장치의 중요 문제점 중의 하나인 높은 압력손실을 해결하기 위해 하부유입식 원심 여과집진장치의 특성을 실험적으로 분석하는 것이 본 연구의 주목적으로, 실험은 원심 여과집진장치의 집진효율과 압력손실(특히, 여과포 압력손실) 특성을 일반 여과집진기와 비교·분석하기 위해 유입유속, 유입농도 및 선회영역의 변화 등과 같은 다양한 파라미터들에 대해 수행하였다.

실험 결과, 1  $\mu\text{m}$  이하의 서브마이크론 입자들에 대해서 접선유입식이 중앙유입식의 경우 보다 높은 집진효율을 보였으며, 총괄집진효율은 99% 이상을 나타내었다. 유입농도 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  에서, 압력손실 감소율은 유입유속에 따라 large bag의 경우 15~38%인 반면, small bag의 경우 선회영역의 증가에 의해 30~48%이었다.

주제어 : 원심 여과집진장치, 여과집진장치, 집진효율, 압력손실, 압력손실 감소율

## 1. 서론

급속한 산업발달과 함께 화석연료의 사용이 증가되면서 대기오염문제가 심각하게 대두되기 시작했으며, 이에 따라 정부에서도 입자상 물질을 포함한 대기오염물질에 대해 단계적으로 강화된 배출허용기준을 적용하고 있어,<sup>1)</sup> 이미 설치되어 있는 집진장치들의 교체 및 새로운 고효율 집진장치의 개발이 필요 불가결하게 되었다.

현재 산업체에 설치되어 있는 집진장치 중의 하나인 여과집진장치는 연소 및 폐기물 소각공정 등에서 배출되는 입자상 오염물질을 제거·처리하는데 효과적인 장치로 그 집진 성능이 매우 우수하여 대기오염 배출규제에 적절히 대응할 수 있는 집진장치로서 인정되고 있다.<sup>2-4)</sup> 그러나 다른 집진장치에 비해 압력손실이 과도하여 유지·관리비 등의 경제적 부담이 큰 단점이 있어 이를 보완하기 위한 기술개발이 중요한 과제로 대두되고 있다. 일반적으로 여과집진장치의 과도한 압력손실을 감소시키기 위해 전처리 시스템으로 싸이클론<sup>5-9)</sup>을 설치하여 여과집진장치<sup>10-14)</sup>에 유입되는 분진의 부하를 줄이는 방법이 사용되고 있다. 하지만 이러한 집진시스템은 여과집진장치의 압력손실 감소 효과는 도모할 수 있지만 두 가지의 단위 집진장치를 사용함으로써 설치 및 유지·관리비의 상승을 초래하고 있기 때문에 2기의 집진장치를 단일 시스템으로 결합시킨 집진장치의 개발이 효과적일 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 여과집진장치와 싸이클론을 단일시스템으로 결합한 hybrid 집진 시스템인 원심 여과집진장치에 대한 특성을 해석하고자 한다. 이는 싸이클론의 몸통 내부에 여과재를 포함하고 있는 형태이며, bag에 의한 유동의 흐트러짐을 방지하고 선회류에 의한 원심력 효과를 최대한 발휘할 수 있도록 유동특성이 안정된 하부 접선유입식을 설정하였다. 본 시스템은 원심력에 의한 장치 내벽에서의 입자 집진과 여과포에 의한 집진이 단일 집진장치 내에서 동시에 이루어질 수 있는 새로운 집진장치로서, 여과포에 집진되는 입자의 부하를 감소시켜 여과포에 부가되는 압력손실을 대폭 줄일 수 있으며, 집진효율의 증가 및 압력손실 감소로 인한 처리유량의 증대 효과를 가져올 것으로 기대된다. 이러한 원심 여과집진장치는 성능 향상뿐만 아니라 설치 및 유지·관리면에서도 상당한 장점을 가지고 있으므로 앞으로의 발전 가능성은 매우 높을 것으로 기대되지만, 현재까지 하부유입식 원심 여과집진장치의 특성에 관한 연구는 국내외적으로 매우 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 하부유입식 원심 여과집진장치의 특성을 일반 여과집진장치와 비교 분석하기 위해 접선유입식 및 일반 여과집진기의 특성을 지니는 중앙유입식으로 구분하여, 다양한 유입유속, 유입농도 및 여과포의 크기(선회영역의 변화) 등 실험적 변수에 따른 집진효율 및 압력손실 특성에 대한 실험적 해석을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

#### 2.1.1. 실험장치 구성

본 연구는 하부유입식 원심 여과집진장치의 집진효율 및 압력손실 특성 파악을 위한 실험으로서, 사용된 실험장치는 크게 원심 여과집진장치 본체, 분진공급장치, 분진의 탈진을 위한 펄스제트(pulse-jet) 탈진장치, 탈진된 분진을 제거하는 호퍼(hopper) 및 처리유량을 조절하는 흡입 송풍기와 집진효율 및 압력손실을 측정할 수 있는 계측시스템으로 구성되어 있으며, Fig. 1에 전체적인 구성도를 나타내었다.

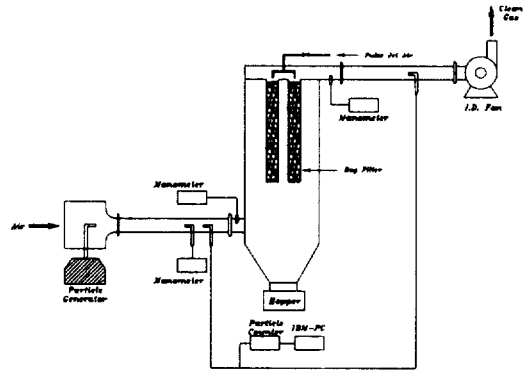


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

#### 2.1.2. 원심 여과집진장치 본체

본 실험장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 일반 산업체에서 사용되는 여과집진기와 하부 유입식 원심력 집진장치(cyclone)<sup>15)</sup>의 결합형태로서 집진장치 내부에 3개의 여과포가 장착되어 있으며, 일반 여과집진장치와의 비교 실험을 위해 집진장치 하부에 중앙 및 접선유입구가 설치되어 있다. 접선유입시 분진에 부가되는 원심력의 극대화를 위해 축소판을 연결하였으며, 집진장치 내의 선회류 영역 변화에 따른 여과포가 가지는 압력손실 및 집진효율 특성을 해석하기 위해 크기가 다른 2가지의 여과포를 장착하였다. 여과포의 재질은 현재 산업체에서 많이 사용되고 있는 표면이 발수 처리된 폴리에스테르이며, 본 실험에서 사용된 2가지 형태의 여과포 치수 및 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 또한 여과포

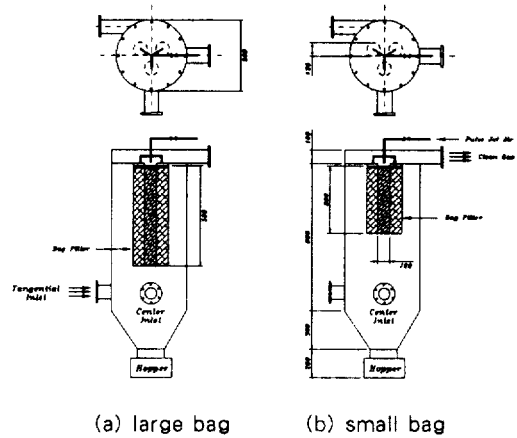


Fig. 2. Schematic of cyclone-bag filter with bottom inlet(large and small bag).

의 표면에 부착된 분진을 제거하기 위해 집진장치의 상부에 타이머가 장착된 펄스제트(pulse-jet) 방식의 탈진장치<sup>16)</sup>를 설치하였다.

Table 1. Dimension and physical characteristics of test fabric

Items	Small bag	Large bag
Filter properties	PE	PE
Dimension (mm)	300 <sup>L</sup> × 120 <sup>Φ</sup> × 3 <sup>GA</sup>	500 <sup>L</sup> × 120 <sup>Φ</sup> × 3 <sup>GA</sup>
Weight (g/m <sup>2</sup> )	510	510
Thickness (mm)	2	2
Air permeability(cc/cm <sup>2</sup> /sec)	20	20
Tensile strength(kg/5cm)	165 × 150	165 × 150
Bursting strength(kg/cm <sup>2</sup> )	37	37
Surface treatment(°C)	125	125

### 2.1.3. 실험용 분진 및 분진발생·공급장치

실험에 사용된 분진은 대안 화력발전소에서 채취한 fly ash이며, 외부 습도에 의해 입경분포 및 입경별 개수가 변하는 것을 막기 위해 105°C에서 24시간 이상 건조한 후 사용하였다. 입경별 수농도 및 질량농도의 측정이 가능한 APS(Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc.)를 사용하여 실험분진의 입경분포를 측정하였으며, 실험에 사용된 분진의 입경범위는 0.5~20  $\mu\text{m}$ 의 범위를 가지며, 개수 기준 평균 입자 크기는 2.03  $\mu\text{m}$ 이며 중량 기준 평균 입자 크기는 4.37  $\mu\text{m}$ 로 나타났다. 본 실험에 사용된 fly ash의 입경별 수농도 및 질량농도를 Fig. 3에 나타내었다.

본 실험에서 사용된 분진발생·공급장치는 일정량의 분진을 기류 중으로 분산, 공급하기 위한 장치로서 장치의 전단부에는 압축 공기를 주입하고 후단부에는 feeding screw의 회전에 의해 hopper의 옆에 부착되어 있는 내경 20 mm의 원형관을 투입되

고, 원형관의 상부에서 분진을 일정량의 압축 공기와 함께 상 방향으로 분사시켜 전·후단의 압력구배에 의해 분진 입자가 기류 중으로 분산 공급된다. 공급되는 분진의 양은 feeding screw의 회전속도를 제어함으로써 조절되고, 이에 따라 분진 농도를 변화시킬 수 있게 제작되었다.

## 2.2. 실험방법

본 실험은 원심력 여과집진장치의 특성을 일반 여과집진장치와 비교 분석하기 위한 것으로, 접선유입식과 일반 여과집진기의 특성을 지니는 중앙유입식으로 구분되어진다. 접선유입인 경우 집진장치 내에 1차 집진을 유발시키는 강한 선회류의 효과가 여과포에 부가되는 압력손실 및 집진효율특성에 미치는 영향을 해석하기 위해, 유입유속 및 bag 크기의 조절에 의한 선회류영역의 변화가 중요 실험변수가 된다. 집진특성을 파악하기 위해 입자의 크기별 수농도 및 질량농도의 측정이 가능한 입경계수기인 APS(Aerodynamic Particle Sizer, TSI Inc.)를 사용하여 유입농도 및 유입유속의 변화에 따른 입경별 집진효율을 측정하였다. 본 실험의 주요 변수 중의 하나인 유량 및 여과속도는 미세압력계(micromanometer, Furness Controls Ltd, FCO 12)를 사용하여 덕트 내 유속을 측정함으로써 산출되어졌다. 유속 측정 및 분진 채취 지점은 실험장치의 전·후단에서 대기오염공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4%되는 지점을 선정하고, 각 지점에서 측정된 유속 및 분진의 수농도와 질량농도를 산술 평균하여 그 평균치를 사용하였다. 일반 여과집진장치의 특성을 지닌 중앙유입과 원심력이 부가된 접선유입의 유입방식에 따른 압력손실특성을 비교하기 위하여 실험장치의 유입·출구 부분 50 mm 지점에서 미세압력계(micromanometer)를 사용하여 정압차에 의해 계산되는 압력손실을 5분간 측정 후, 탈진 전·후의 압력손실을 비교하였다.

본 연구에서의 실험적 변수로는 유입농도, 유입유속 및 여과포의 크기로서, 유입농도는 100, 200, 300  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 유입유속은 9, 12, 15, 18, 21  $\text{m}/\text{sec}$ , 여과포의 크기는 선회류영역의 변화를 위한 small bag과 large bag으로 설정되었으며, 각각의 실험변수에 따른 집진효율 및 압력손실 특성을 접선유입식

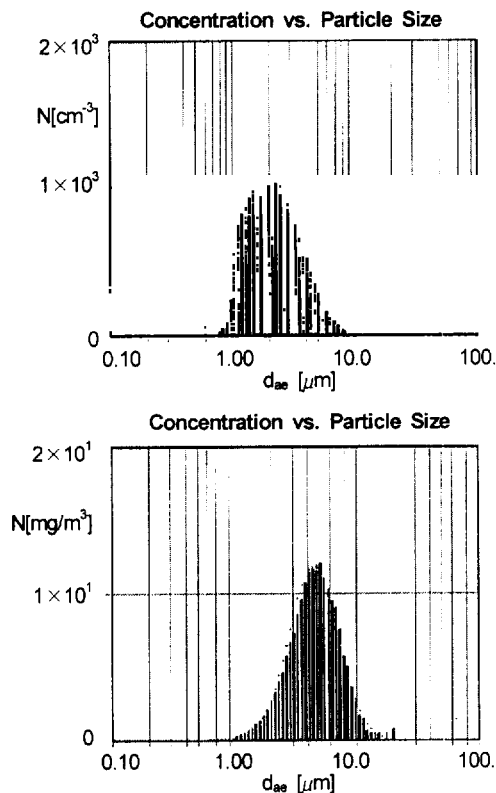


Fig. 3. Size distribution of test dust.

Table 2. Filtration velocities with flow rates for bag types

Flow rate (m <sup>3</sup> /min)	Inlet velocity (m/sec)	Filtering velocity(m/min)	
		Small bag	Large bag
3.5	21	10.3	6.2
3.0	18	8.8	5.3
2.5	15	7.4	4.4
2.0	12	5.9	3.5
1.5	9	4.4	2.7

과 일반 여과집진에 해당되는 중앙유입식으로 구분하여 수행하였다. Table 2에 여과포 크기에 따른 유입유속 및 여과속도를 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

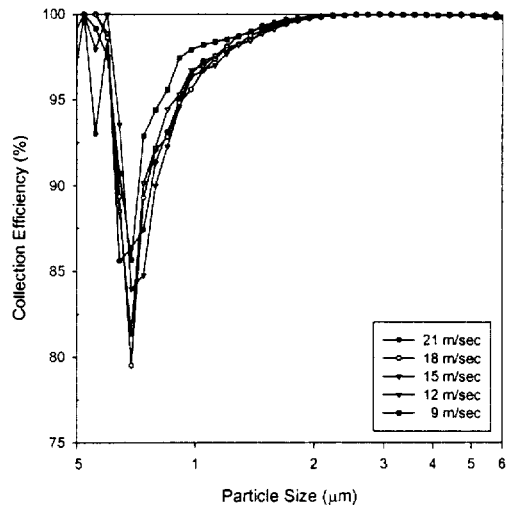
#### 3.1. 부분집진효율(Fractional Collection Efficiency)

선회영역 변화에 따른 집진특성을 파악하기 위해 Fig. 2(a), (b)에서 보는 바와 같이 장치 내에 large bag 및 small bag을 장착한 경우로 구분하여 실험을 수행하였다. 부분집진효율은 입경별 수농도 측정이 가능한 APS를 사용하여 집진장치의 유입, 유출부에서 개수측정을 하고, 아래 식에 의해 입경별 부분집진효율을 산정하였다.

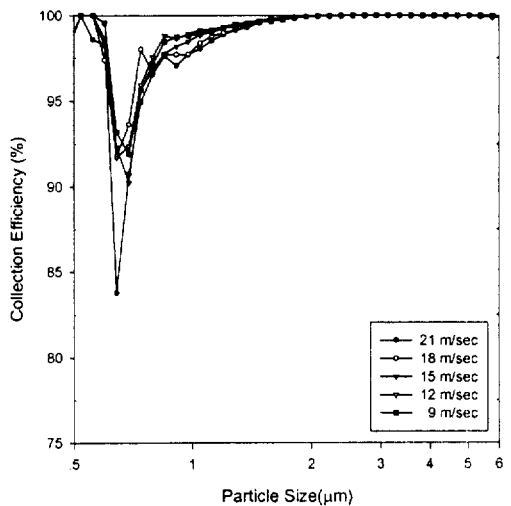
$$\eta_j(\%) = \frac{N_{in,j} - N_{out,j}}{N_{in,j}} \times 100 \quad (1)$$

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

Fig. 4(a), (b)는 길이 500 mm의 large bag을 사용한 선회영역이 좁은 경우에서 유입농도 100 mg/m<sup>3</sup>일 때 접선유입과 일반 여과집진장치의 특성을 나타내는 중앙유입식 유입유속 9, 12, 15, 18, 21 m/sec에 대한 입경별 집진효율을 나타낸 것이다. 중앙유입과 접선유입의 경우 2 μm 이상의 입경



(a) Center inlet



(b) Tangential inlet

Fig. 4. Collection efficiency vs. particle diameter with various inlet velocities (large bag, M<sub>p</sub>=100 mg/m<sup>3</sup>).

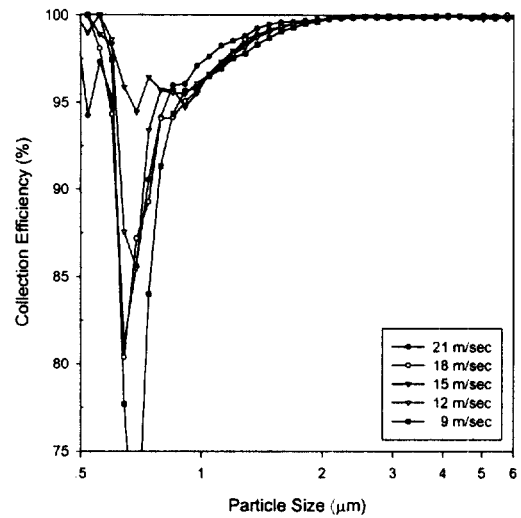
에서는 98% 이상의 높은 집진효율을 보이고 있으며, 유입유속 및 유입방식에 따른 집진효율의 차이는 거의 미미함을 알 수 있다. 그러나, 집진효율의 차이는 비록 없더라도 중앙유입의 경우 2 μm 이상의 입경에서 여과집진장치의 특성인 관성력과 직접 차단 효과에 거의 의존되고 있는 반면, 접선유입에서는 원심력에 의해 장치 벽면에 1차 집진되는 효과와 여과포에 의한 집진 메커니즘이 혼합되어 나타난 결과이다. 따라서 이에 대한 직접적인 정량 분석은

어렵지만 압력손실 부분에서 간접적인 해석은 가능할 것으로 판단된다.

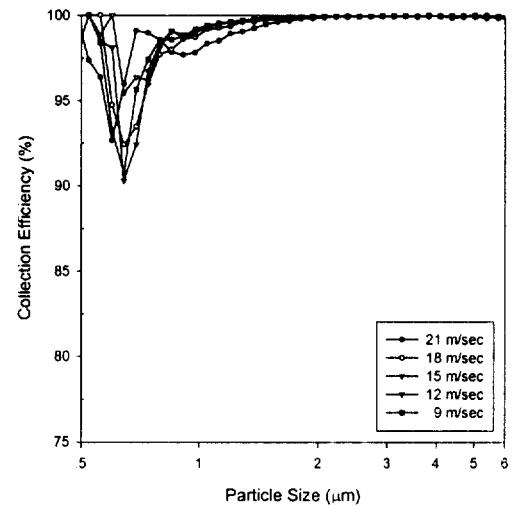
또한, 1~2  $\mu\text{m}$ 의 입경범위에서 일반 여과집진장치에 해당되는 중앙유입에 비해 접선유입의 경우 다소 높은 집진효율을 나타낸다. 더욱이 입자의 관성력 효과가 작은 입경 1  $\mu\text{m}$  이하에서 그림에서 보는 바와 같이 0.7  $\mu\text{m}$  부근은 확산효과가 감소하면서 관성력이 회복되는 전환점으로서 최소 집진효율을 나타낸다. 즉, 임계입경, 0.7  $\mu\text{m}$  부근에서 접선유입의 집진효율은 중앙유입에 비해 유입유속 21 m/s를 제외하고 5% 내외로 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 접선유입시 유발되는 선회류가 집진장치 내벽에서 매우 잘 형성되어 많은 양의 분진이 원심력 효과에 의해 1차 집진되고 있음을 나타내고 있으며, 유입유속 21 m/s의 경우 높은 유입유속으로 인해 집진장치의 벽면에 1차 집진된 후 침강하던 미세 입자가 다시 재비산되어 중앙유입에 비해 높은 집진효율을 보이지 못하는 것으로 추정된다. 특히, 1  $\mu\text{m}$  이하에서 중앙유입인 경우 여과집진의 특성인 압출 및 불어나감의 영향에 의해 유입유속(9~21 m/s), 즉 여과속도(2.7~6.2 m/min) 증가에 따라 효율이 감소함을 볼 수 있는데 반해, 접선유입인 경우 위의 현상에 의한 집진효율 감소 효과는 재비산 현상이 강한 유입유속 21 m/s를 제외하고는 원심력에 의해 1차 집진됨으로써 상대적으로 감소되는 것으로 추정된다.

Fig. 5(a), (b)는 동일 집진장치 내에 길이 300 mm의 small bag을 사용하여 선회영역 증가가 집진 효율에 미치는 영향을 비교·분석하기 위한 것으로, 유입농도 100  $\text{mg}/\text{m}^3$ 일 때 중앙유입과 접선유입시 유입유속 9, 12, 15, 18, 21 m/s(여과속도 4.4, 5.9, 7.4, 8.8, 10.3 m/min)에 대한 입경별 집진효율을 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)는 일반 여과집진의 특성을 나타내는 중앙유입의 경우로, Fig. 4(a)와 동일하게 입경 2  $\mu\text{m}$  이상의 입자에 대해서는 98% 이상의 집진효율을 나타내고 있으며, 입경 2  $\mu\text{m}$  이하의 입자에 대해서는 large bag의 경우에 비해 5% 내외의 낮은 집진효율을 보이고 있다. 이는 small bag의 사용으로 선회영역이 증가하더라도 중앙유입의 경우 원심력 효과는 고려되지 않으며, 동일 유입유속에서 large bag을 통과하는 여과속도보다 small bag을 통과하는 여과



(a) Center inlet



(b) Tangential inlet

Fig. 5. Collection efficiency vs. particle diameter with various inlet velocities (small bag,  $M_p=100 \text{ mg}/\text{m}^3$ ).

속도가 1.6배 정도로 증가한 것에 기인한다. 일반적으로 여과포의 집진 메카니즘에서 여과속도의 증가로 인해 직접차단, 관성력 효과는 커지는 반면 확산에 의한 효과는 감소되며, 여과포 섬유 사이로 미세 분진의 압출(seepage) 및 불어나감(pinhole plugs) 등<sup>7,18)</sup>의 효과가 커지므로 집진효율은 감소한다.

Fig. 5(b)는 접선유입인 경우의 집진효율 결과로, 입경 1  $\mu\text{m}$  이하의 최소 집진효율을 나타내는 임계

입경(0.7 μm) 부근에서 중앙유입에 비해 매우 높은 집진효율을 나타내고 있으며, 이는 유입분진에 부가되는 원심력의 효과가 매우 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 small bag을 사용한 Fig. 5(b)의 경우 Fig. 4(b)에 비해 동일 유입유속(유량)에서 여과속도의 증가(1.6배 정도)로 인해 집진효율의 감소가 예상되지만, 입경 0.6 μm 이상에서 오히려 높은 집진효율을 보이는 것은 선회영역의 증가에 의한 원심력 효과의 상대적인 증대로 장치 벽면으로의 1차 집진율이 높아졌기 때문인 것으로 판단된다.<sup>19,20)</sup> 반면, 입경 0.6 μm 이하의 경우 large bag의 결과인 Fig. 4(b)와 비교해 보면 small bag의 경우가 다소 낮은 집진효율을 보이고 있는 것은 여과속도의 증가로 확산에 의한 집진효과가 감소되기 때문이다.

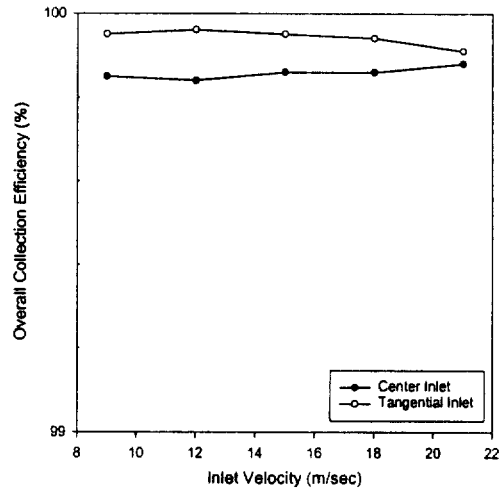
### 3.2. 총괄집진효율(Overall Collection Efficiency)

Fig. 6(a), (b)는 유입농도 100 mg/m<sup>3</sup>에서 선회영역 변화에 따른(large bag과 small bag) 유입유속별 총괄집진효율을 유입방식에 따라 비교한 것이며, 총괄집진효율 산정식은 다음과 같이 표현된다. (단, 입자는 구형으로 가정한다.)

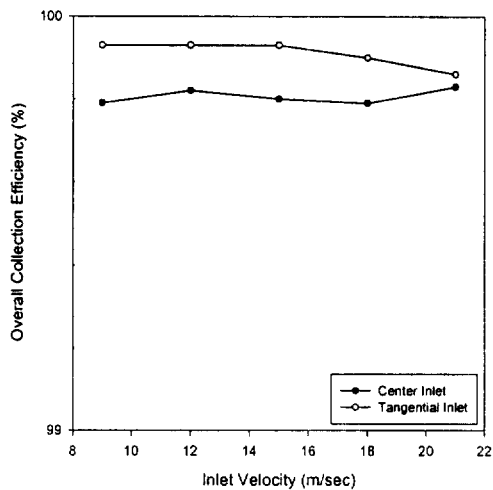
$$\eta_i(\%) = \frac{\sum(V_j N_{in,j} - V_j N_{out,j})}{\sum(V_j N_{in,j})} \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $\eta_i$ 는 총괄집진효율,  $V_j$ 는 입경별 부피,  $N_{in,j}$ 는 입경별 유입 입자수,  $N_{out,j}$ 는 입경별 유출 입자수를 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 large bag과 small bag의 경우 모두 유입분진에 선회류를 부가할 수 있는 접선유입의 경우가 중앙유입의 경우에 비해 총괄집진효율이 미세하지만 0.1% 내로 다소 높음을 알 수 있다. 또한 중앙유입의 경우 large bag에 비해 small bag의 집진효율이 다소 낮음을 볼 수 있는데, 이는 입경별 집진효율에서 전술한 바와 같이 여과속도의 차이(Table 2 참조)에 의한 것으로 판단된다. 반면, 접선유입의 경우는 집진장치 내벽에서 원심력의 효과에 의해 유입분진의 많은 양이 장치 벽면에 1차 집진되고 난 후 다시 여과포에 집진되므로 small bag의 여과속도의 증가에도 불구하고 총괄집



(a) Large bag



(b) Small bag

Fig. 6. Overall collection efficiency vs. inlet velocity with inlet types( $M_p=100$  mg/m<sup>3</sup>).

진효율에서 거의 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 각각의 유입방식에 따라 선회영역변화를 위한 large bag과 small bag을 사용한 경우의 집진 메커니즘 및 집진효율이 유사한 형태를 보인다는 것을 알 수 있으며, 접선유입의 경우가 원심력 효과에 의해 중앙유입에 비해 다소 집진효율이 높아 접선유입시 집진장치 내에 생성되는 선회류의 효과가 크게 작용함을 알 수 있다.

### 3.3. 압력손실(Pressure Drop)

본 실험의 중요 목적은 여과포에 집진되는 분진 부하량을 감소시키기 위해 원심력 효과를 부가하여 여과포에 분진이 도달하기 전에 1차 집진되는 효과를 증대시키는 것이며, 이의 효과를 정량적으로 분석하는 것이 필요하다. 이를 위해 원심력 효과가 고려되지 않은 경우에 장치 벽면에 1차 집진되지 않은 분진이라 하더라도 여과포에 의해 98% 이상 집진되므로 집진효율 측정으로는 평가하기가 불가능하다. 따라서, 여과포의 분진 부하량에 직접 비례하는 압력손실은 실험의 중요 변수로 적용되며, 특히 여과포에 걸리는 압력손실은 매우 중요한 의미를 갖는다. 집진효율의 경우와 동일하게 선회영역 및 유입 방식 변화에 따른 압력손실 특성 파악을 위한 실험을 수행하였으며 Fig. 7, 8은 large bag, Fig. 9, 10은 small bag을 사용한 경우의 실험 결과를 나타내었다.

Fig. 7은 선회영역이 좁은 경우(large bag)의 유입농도  $0 \text{ mg/m}^3$ 과  $100 \text{ mg/m}^3$ 일 때 유입유속에 따른 유입방식별 집진장치에 부가되는 총 압력손실을 나타낸 것이다. 중앙유입의 경우는 일반 여과집진장치가 가지는 압력손실의 특성으로 유입유속(여과속도)이 증가할수록 압력손실도 선형적으로 증가함을 보이고 있다. 접선유입의 경우 중앙유입에 비해 유입유속 변화에 따라 압력손실의 증가 구배가 다소 크게 나타나며, 이는 접선유입으로 인한 강한 선회류 형성으로 기인되며, 유입유속이 증가할 때 선회 효과가 더욱 커지기 때문이다.

또한, 중앙유입시 유입유속 9 m/s에서 21 m/s로 증가될 때 유입농도 0,  $100 \text{ mg/m}^3$ 에서 압력손실 증가는 각각 17, 28  $\text{mmH}_2\text{O}$ 로 유입농도가  $0 \text{ mg/m}^3$ 에서  $100 \text{ mg/m}^3$ 으로 증가될 때, 압력손실 차이는 11  $\text{mmH}_2\text{O}$  증대되는 반면, 접선유입시 동일 유입유속 조건에서 6  $\text{mmH}_2\text{O}$  증가되었음을 알 수 있다. 즉, 유입농도  $0 \text{ mg/m}^3$ 에서  $100 \text{ mg/m}^3$ 으로 증가될 때 압력손실 증가 구배는 접선유입에 비해 일반 여과집진장치에 준하는 중앙유입식의 경우 더 커지며, 이러한 효과는 유입농도가  $100 \text{ mg/m}^3$  이상으로 더 높아질 때 더욱 확연히 나타날 것으로 사료된다.

Fig. 7은 여과포를 포함한 장치 전반에 걸리는 압

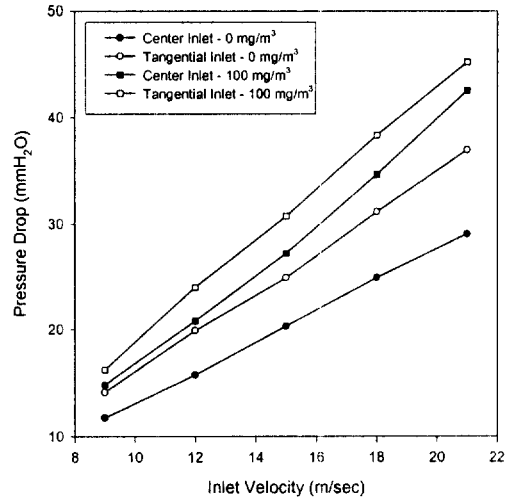
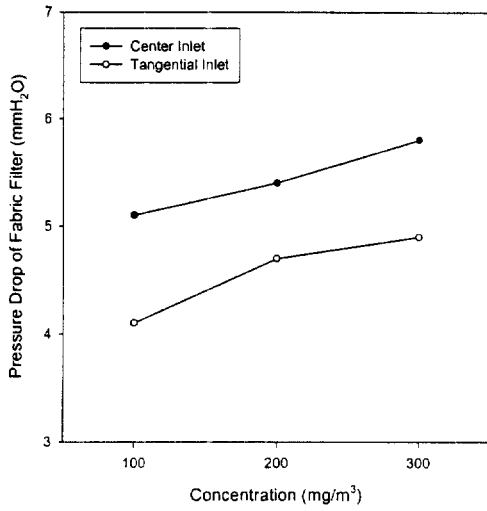


Fig. 7. Pressure drop vs. inlet velocity with inlet types and dust loadings(large bag).

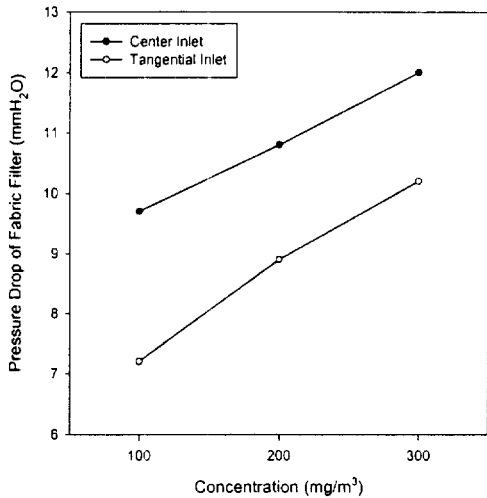
력손실 특성에 관한 결과인데 반해 Fig. 8은 접선유입시 원심력 효과에 의해 장치 벽면에 1차 집진되는 효과를 간접적으로 평가하기 위해 여과포에 누적되는 분진 부하량에 의존되는 여과포의 압력손실만을 나타낸 그림이다. 즉, Fig. 8(a), (b)는 선회영역이 좁은 경우(large bag)의 유입방식, 유입농도 및 유입유속 12, 18 m/s에서 여과포에 부가되는 압력손실을 나타낸 것이다.

유입유속 12 m/s에서 유입농도별 여과포 압력손실은 접선유입인 경우 중앙유입에 비해 최소 0.8  $\text{mmH}_2\text{O}$  이상 낮게 나타나며, 농도 증가에 따른 여과포 압력손실 증가 구배도 접선유입시 상대적으로 다소 둔화됨을 알 수 있다. 이는 접선유입시 선회류에 의한 원심력 효과와 유입농도가 높아지면서 입자간의 coagulation에 의해 1차 집진효과가 증대되기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 유입유속 18 m/s에서도 (a)의 경우와 유사한 경향을 나타내는데, 유입 방식에 따른 여과포 압력손실의 차이는 최소 2  $\text{mmH}_2\text{O}$ 로 중앙유입이 높게 나타나는데, 이는 유입유속 12 m/s인 경우에 비해 2배 이상의 차이를 보이며 유입유속이 증가될 때 위의 현상은 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다. 즉, 이런 현상은 전술한 바와 같이 유입유속 증가에 의해 접선유입의 경우 선회강도가 증가되는 것과 식(3)에서 언급된 여과속도 증가 효과가 복합되어 나타난 결과로 추정할 수 있다. 여





(a)  $V_i = 12$  m/sec



(b)  $V_i = 18$  m/sec

Fig. 8. Pressure drop of fabric filter vs. dust loading with inlet types (large bag, inlet velocity  $V_i=12, 18$  m/s).

과재의 압력손실은 Darcy 식에 의해,<sup>21)</sup>

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

로 표현될 수 있다. 식(3)의 우변 첫째 항은 청정 여재에 의한 압력손실이며, 둘째 항은 포집 분진층에 의한 압력손실을 의미한다. 여기서,  $K_1$ ,  $K_2$ 는 여재 및 분진층의 저항계수,  $V_f$ 는 여과속도,  $C_i$ 는 여과재 분진부하농도,  $t$ 는 여과시간을 의미한다.

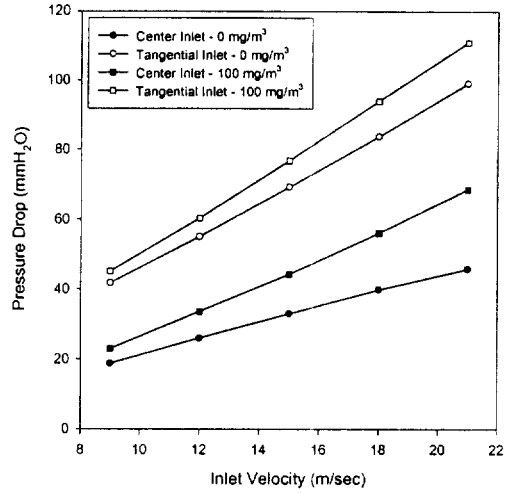


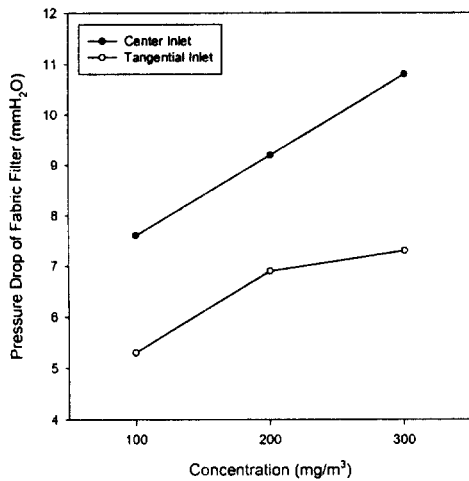
Fig. 9. Pressure drop vs. inlet velocity with inlet types and dust loadings (small bag).

위 식의 우변 2항에서 보듯이 유입유속(여과속도)이 증가할 때 접선유입시 원심력 효과에 의해 장치 내벽에 1차 집진되는 분진량이 증가함으로써 여과재 포집 분진층이 얇아져 중앙유입에 비해 분진층에 의한 저항이 감소되며, 이에 의한 중앙유입과 접선유입의 압력손실 차이는 여과속도의 2승의 order에 비례하여 나타남을 알 수 있다.

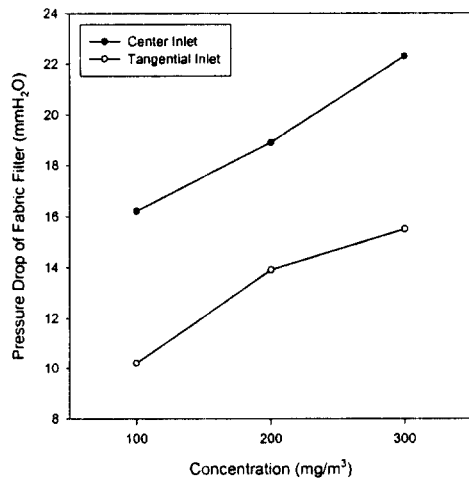
Fig. 9, 10은 집진장치 내에 small bag을 장착하여 선회영역 증가가 압력손실에 미치는 영향을 비교, 분석하기 위한 것으로, Fig. 9는 유입농도 0, 100 mg/m<sup>3</sup>일 때 유입방식 및 유입유속(여과속도)에 따른 집진장치가 가지는 압력손실을 나타낸다. Small bag을 사용한 Fig. 9의 유입유속에 따른 압력손실의 증가는 Fig. 7의 경우와 유사한 경향을 나타내지만, 선회영역이 좁은 경우에 비해 두 가지 유입방식 모두 높은 압력손실을 나타내며, 특히 접선유입의 경우 더욱 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 장치 내에 small bag을 사용하여 동일 유입유속(유량)에 대해 식(3)에서 보듯이 여과속도가 증가하였기 때문이다. 유입농도 0, 100 mg/m<sup>3</sup>에 따른 유입방식별 압력손실을 비교하면, 유입농도가 0 mg/m<sup>3</sup>에서 100 mg/m<sup>3</sup>으로 증가될 때 중앙유입시 압력손실 증가율은 접선유입의 경우에 비해 크게 나타나며, 이런 경향은 선회영역이 좁은 경우와 비교할 때 더욱 크게 나타남을 볼 수 있다. 특히, 유입유속

21 m/s인 경우 유입농도 0 mg/m<sup>3</sup>에서 100 mg/m<sup>3</sup>으로 증가될 때 압력손실 증가치는 중앙유입에 비해 접선유입시 12 mmH<sub>2</sub>O 정도로 작게 나타나며, Fig. 7과 비교할 때 7 mmH<sub>2</sub>O 정도 더 감소함을 알 수 있다. 이는 large bag의 경우에 비해 여과속도가 증가하여 압력손실 차이가 더 증가한다 하더라도 선회영역의 증대에 의해 선회류에 의한 영향이 커짐을 의미한다.

Fig. 10(a), (b)는 small bag을 사용한 경우의 유입방식에 따른 유입농도별 여과포에 부과되는 압



(a)  $V_i = 12$  m/sec



(b)  $V_i = 18$  m/sec

Fig. 10. Pressure drop of fabric filter vs. dust loading with inlet types (small bag, inlet velocity  $V_i = 12, 18$  m/s).

력손실만을 유입유속 12, 18 m/s에 대해 나타난 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입 방식별 Fig. 8의 large bag을 사용한 경우와 비교하여 여과포 압력손실의 차이는 현저하게 높게 나타나며, 유입농도가 300 mg/m<sup>3</sup>으로 높아지면서 더욱 뚜렷한 증가를 보인다. 또한 유입유속에 대해서도 12 m/s에서 18 m/s로 증가될 때 압력손실 차이는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 유입속도 및 유입농도 증가시 원심력 효과(입자 coagulation 효과 포함)에 의한 장치 벽면에서의 1차 집진을 향상과 large bag에 비해 small bag을 장착한 경우 집진장치 내벽에 형성된 선회영역이 증가됨으로써 입자에 추가되는 원심력 효과의 증대로 인해 1차 집진되는 양이 증가되기 때문이다. 또한 식(3)에서 보듯이 여과속도(유입유속) 및 여과포 분진부하(식(3)의  $C_i$ )와 관련된 유입농도 수치의 증가에 의한 것으로 판단된다. 따라서, 식(3)의 여과속도 및 유입농도의 수치 증가에 의한 것을 제외하고 단지 선회류 형성에 의한 원심력 효과에 의해 여과포 압력손실에 미치는 영향을 규명하기 위해, 다음 section의 식(4)를 도입하여 해석할 수 있다. 또한, 접선유입시 유입농도 300 mg/m<sup>3</sup>인 경우의 여과포 압력손실은 중앙유입의 100 mg/m<sup>3</sup>의 경우보다 오히려 낮게 나타남을 볼 수 있다. 즉, 동일 압력손실에서 일반 여과집진장치(중앙유입)에 비해 원심 여과집진장치(접선유입)의 경우 처리농도를 3배 이상 증대시킬 수 있음을 나타낸다.

### 3.4. 압력손실 감소율(PDRR : Pressure Drop Reduction Ratio)

압력손실 감소율은 중앙유입과 접선유입의 압력손실 변화율을 비교하기 위한 것으로 Greiner<sup>22)</sup>에 의한 압력손실 감소율에 관한 식을 변형하여 다음과 같이 정의한다.

$$PDRR = \frac{(\Delta P_C - \Delta P_{C'}) - (\Delta P_T - \Delta P_{T'})}{(\Delta P_C - \Delta P_{C'})} \times 100 \quad (4)$$

식(4)에서  $\Delta P_C$ 는 중앙유입에서 유입유속에 따른 압력손실,  $\Delta P_{C'}$ 는 중앙유입에서 탈진 후 유입유속에 따른 압력손실,  $\Delta P_T$ 는 접선유입에서 유입유속에

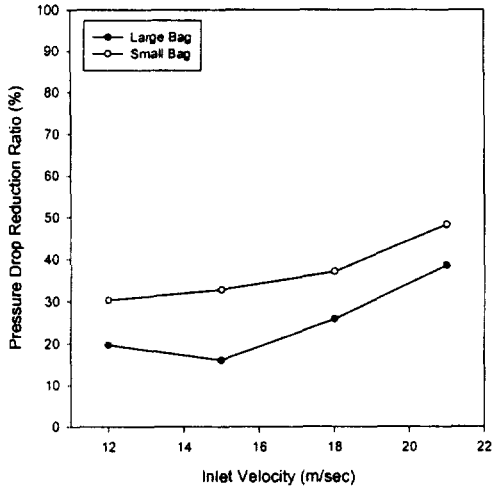


Fig. 11. Pressure drop reduction ratio vs. inlet velocity with bag types( $M_p = 100 \text{ mg/m}^3$ ).

따른 압력손실,  $\Delta P_{Tr}$ 는 접선유입에서 탈진 후 유입 유속에 따른 압력손실을 나타낸다.

Fig. 11은 유입유속에 따른 압력손실 감소율을 유입농도  $100 \text{ mg/m}^3$ 에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 PDRR(압력손실 감소율)은 small bag의 경우 최소 30%(유입유속 12 m/s), 최고 48%(유입유속 21 m/s)이며, large bag의 경우는 최소 15%(유입유속 15 m/s), 최고 38%(유입유속 21 m/s)로 나타나고 있어, small bag을 장착한 경우가 large bag의 경우보다 압력손실 감소율이 전반적으로 10% 이상 높음을 알 수 있다. 이는 Fig. 7, 9 및 식(4)로부터 예측할 수 있듯이, small bag의 사용에 의한 선회영역의 증가에 의해 처리가스에 포함된 분진이 집진장치 내벽에서 다량 제거되어 여과포에 부가되는 압력손실이 감소하였기 때문이다.

또한 일반적으로 여과속도가 높아질 때 여과집진 효율은 감소하는 경향을 나타내는데, small bag의 경우 large bag에 비해 1.6배 정도 여과속도가 높음에도 불구하고, 접선유입시 중앙유입에 비하여 압력손실 감소율(PDRR)이 상대적으로 높게 나타나는 것은 선회영역 증가의 효과가 더욱 확연하게 나타남을 반증하는 것으로 판단된다. 더욱이 식(3)의 우변 2번째 항에서 보는 바와 같이 여과속도 증가 자체가 여과포 압력손실을 증대시키는 사실은 식(4)에서 보듯이 압력손실 감소율(PDRR)을 계산하는 데는 고

려되지 않으며, 단지 여과포에 누적되는 분진량에 의해 의존될 수 있음을 알 수 있다. 유입유속이 증가함에 따라 small bag 및 large bag의 경우 PDRR이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이런 경향은 유입유속이 증가하면서 접선유입시 분진에 부가되는 원심력 효과를 증대시키는 선회강도가 증가하기 때문이며, 식(3)의 여과속도(유입유속)의 수치증가에 의한 것은 고려되지 않는다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 여과집진장치와 원심력 집진장치의 결합형태인 원심 여과집진장치의 특성을 파악하기 위해 유입유속, 유입농도 및 선회영역의 변화 등의 변수에 따른 실험을 통하여 집진효율 및 압력손실 특성에 대한 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 입경  $2 \mu\text{m}$  이하의 미세입자에 대한 입경별 집진효율에서 접선유입의 경우 일반 여과집진장치에 준하는 중앙유입의 경우보다 집진효율이 더 높게 나타났다.
- 2) 두 유입방식 모두 99% 이상의 높은 총괄집진 효율을 보이며, 접선유입의 경우 중앙유입에 비해 다소 높게 나타난다.
- 3) Small bag을 장착한 경우 유입유속 12, 18 m/s에서 유입농도별 여과포 압력손실은 접선유입시 중앙유입에 비해 최소 2.4, 4.5 mmH<sub>2</sub>O 이상 각각 낮게 나타나며, 유입농도 증가에 따른 압력손실 증가 구배는 매우 둔화됨을 알 수 있다.
- 4) 유입유속, 유입농도 및 선회영역 증가에 따라 접선유입 및 중앙유입의 여과포 압력손실 차이는 더욱 커지며, 접선유입의 경우 중앙유입에 비해 동일 압력손실에서 처리 농도를 3배 정도 증대시킬 수 있다.
- 5) 유입농도  $100 \text{ mg/m}^3$ 에서 압력손실 감소율은 small bag의 경우 30~48%이고, large bag의 경우 15~38%의 감소율을 보임으로써 집진장치 내에 선회영역 증가에 의한 원심력 효과의 증대로 장치 내벽으로의 1차 집진율이 10% 이상 높아짐을 알 수 있다.

## 참고 문헌

1. 대기 환경 보전법 시행규칙(개정 1992. 8. 8. 총리령 404호, 환경처(1993).
2. Jaime Beitez, Process engineering and design for air pollution control, PTR Prentice Hall, pp. 331~369, pp. 414~449 (1993).
3. 김동술, 대기오염방지공학, 신광문화사(1993).
4. 田森行男, "여과집진 기술의 최근의 동향," 첨단 환경기술, **1**(2), 2~9(1993).
5. C. B. Sheperd and C. E. Lapple, "Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collector," *Industrial and Eng. Chem.*, **131**(8), 972~984(1939).
6. V. B. Vedernikov, "Dust collecting efficiency of a cyclone as a function of gas velocity," *Rissian J. of Appl. Chem.*, **68**(2), 760~762(1995).
7. M. A. Silva and S. A. Nebra, "Numerical simulation of drying in a cyclone," *Drying Technology*, **15**(6~8), 1731~1741(1997).
8. H. P. Chen, Z. J. Lin, D. C. Liu, X. S. Wang and M. J. Rhodes, "A down-exhaust cyclone separator," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**(4)(1999).
9. R. L. Salcedo and M. A. Coelho, "Turbulent dispersion coefficients in cyclone flow: An empirical approach," *The Canadian J. of Chem. Eng.*, **77**, Aug.(1999).
10. Bag Filter Hand Book, 대광서림(1993).
11. H. F. George and G. W. Poehlein, "Capture of aerosol particles by spherical collectors," *Envi. Sci. & Tech.*, **8**(1), 46~49 (1974).
12. 임정환, 김홍용, 구철오, 박영옥, 양승목, 박영성, "여과포에 의한 Coke먼지 및 폐기물 유동층 소각먼지의 포집특성," 대한환경공학회지, **20**(5) (1998).
13. R. W. K. Allen, H. G. D. Goyder, K. Morris, "Modelling media movement during cleaning of pulse-jet fabric filters," *Trans. IChemE.*, **77**, Part A, May(1999)
14. H. C. Lu and C. J. Tsai, "Influence of design and operation parameters on bag-cleaning performance of pulse-jet baghouse," *J. of Env. Eng.* Jun(1999).
15. A. K. Coker, "Understand cyclone design," *Chemical Engineering Progress*, Dec., 51~55(1933).
16. D. G. Sloat, R. P. Gaikwad, R. L. Chang, "The potential of pulse-jet bag house for utility boilers part 3: comparative economics of pulse-jet bag house, precipitators and reverse-gas bag houses," *Air & Waste*, **43**, 120~128(1993).
17. M. S. El-Shobokshy, S. A. Al-Sanea, A. M. Adnan, "Computer simulation of mono-dispers aerosol collection in fibrous filters," *Aerosol Sci. and Tech.*, **20**, 149~160 (1994).
18. L. Gradon, P. Grzybowski, W. Pilacinski, "Analysis of motion and deposition of fibrous particles on a single filter element," *Chem. Eng. Sci.*, **43**(6), 1253~1259(1988).
19. P. W. Dietz, "Collection efficiency of cyclone separators," *AIChE J.*, **27**(6), 888~892(1981).
20. L. X. Zhou and S. L. Soo, "Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator," *Powder Technology*, **63**, 45~53 (1990).
21. 김종석, 조병환, 대기오염방지기술, 동화기술 (1990).
22. G. P. Greiner, D. A. Furlong, D. W. Van Osdell and L. S. Hovis, "Electrostatic stimulation of fabric filtration," *J. Air Pollut. Cont. Assoc.*, **31**, 1125~1130 (1981).