

# 다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 집진 특성 Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System

김일규 · 여석준

I. K. Kim and S. J. Yoa

(접수일 : 2010년 4월 28일, 수정일 : 2010년 6월 30일, 채택확정 : 2010년 9월 17일)

**Key Words** : Multi-layer Multi-stage Porous Plate(다층다단다공성 플레이트), Pressure Drop(압력손실), Collection Efficiency(집진효율), Stage Number(단 수)

**Abstract** : The main object of this study is to investigate the collection characteristics of multi-layer multi-stage porous plate system experimentally. The experiment is carried out to analyze the characteristics of pressure drop and collection efficiency for the present system with the experimental parameters such as inlet velocity, tube diameter, inlet concentration, and stage number, etc. In results, the pressure drop becomes 22 to 115mmH<sub>2</sub>O with increment of stage number (1 to 5) of porous plate system at tube velocity 15 m/s and tube diameter  $\Phi 8$ . In case of fly ash and 5 stage, the collection efficiency becomes 90.5 to 95.7 % increasing the tube velocity 12 to 15 m/s at inlet concentration 3g/m<sup>3</sup> and tube diameter  $\Phi 8$ . Additionally, it is estimated that the collection efficiencies of 5 stage are 94.3, 95.6 and 99.1 % for fly ash, steel dust and based power, respectively ( $\Phi 8$  tube,  $V_t = 12$  m/s, inlet concentration 3g/m<sup>3</sup>).

## 1. 서 론

대기오염의 심각성으로 인해 대기오염물질 배출 규제가 더욱더 강화되어짐에 따라 각 산업체에 설치되어 있는 대기오염방지시설의 교체 및 보관을 위한 저비용·고효율 집진장치의 개발이 절실히 요구되고 있으며, 이에 따른 연구개발이 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다. 현재 사용되고 있는 고효율 집진장치로는 여과 집진장치와 전기 집진장치가 있으나 각각 장·단점을 가지고 있어 이를 개선하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 이 중 전기 집진장치는 압력의 현저한 손실 없이 대량의 배기를 처리할 수 있고 구조적으로 매우 단순하여 유지 및 보수가 용이한 장점이 있다. 특히 광폭 전기 집진장치는 대유량 처리에 효과적인 집진장치이나, 99% 이상의 높은 고효율을 유지하기 위해 집진 면적을 확보하기 위한 장치규모의 증대가 요구되는 단점이 있다.

여과 집진장치는 집진 효율이 높고 적용범위가 광범위한 반면 낮은 여과속도에 의해 처리유량이 한정되어 장치의 규모가 커지고, 결로 현상 등에 의해 발생하는 filter의 눈막힘 현상에 의한 과도한 압력 손실 및 이로 인한 유지·관리의 문제점 때문에 이를 개선하기 위한 새로운 집진 시스템의 연구·개발이 절실히 필요한 실정이다.

본 연구에서 수행하는 다층 다단 다공성 플레이트 시스템은 분진을 함유한 가스가 튜브를 통과하면서 높은 속도의 분사류를 형성하여 다음 단의 집진면의 블랙홀을 향하게 되며, 이때 높은 관성력의 분진입자는 기류를 이탈하여 집진면의 블랙홀을 통해 다층의 블랙 상자 내에 포집된다. 포집되지 않은 입자는 기류를 따라 다음 단으로 이동하게 되며, 이때 일부 미세입자는 재순환 유동에 의한 난류확산에 의해 plate 후면에 부착·집진된다.<sup>1~5)</sup> 본 연구실의 선행연구로서 단층 다단 다공성 플레이트 시스템을 연구·개발 하였으나 플레이트 표면에 포집된 입자의 재비산이 중요한 문제로 대두되었다.(Fig. 1-(a))

따라서, 본 연구에서는 이러한 다층(복층)의 다공

여석준(교신저자) : 부경대학교 환경공학과  
E-mail : sjyoa@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6526  
김일규 : 부경대학교 환경공학과

성 플레이트를 2단 이상 배열하여 반복되는 관성력 및 난류확산에 의해 높은 집진효율을 가지며 재비산 문제를 해결할 수 있는 다층(복층) 다단 다공성 플레이트 시스템의 특성을 분석하였다.(Fig. 1-(b))

즉, 본 연구의 주 목적은 Fig. 1-(a)의 단층 다단 다공성 플레이트 시스템의 포집된 분진의 재비산에 의한 집진효율의 저하를 해결하기 위해 Fig. 1-(b)에서 보는 바와 같이 전단의 강한 기류에 의한 임팩션효과에 의해 기류를 이탈한 분진을 블랙홀을 통해 블랙박스에 누적시켜 재비산에 의한 효율의 감소를 방지하여 안정적 고효율을 유지할 수 있는 다층(복층) 다단 다공성 플레이트 시스템을 개발하는 것이다.

본 시스템은 구조적인 단순함과 높은 처리 유속에 의한 대유량 처리, 고효율 및 집진면에 포집된 입자의 재비산을 방지할 수 있는 장점을 가질 것으로 판단된다. 이의 특성분석을 위해 유입유속, 튜브 직경, stage 수, 유입농도 및 plate 간격의 실험 변수에 따라 본 시스템의 집진효율 및 압력손실 특성에 대한 실험적 해석을 수행하였다.<sup>6~9)</sup>

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험장치는 입자의 관성력에 의한 impaction 효과를 이용한 집진장치로서 사각형의 다층(복층)의 다공성 plate를 다단으로 교차시켜 첫 단의 튜브를 통과한 분진들이 다음단의 다층으로 구성된 블랙상자 내에 포집되는 형태이다.<sup>10~14)</sup> (Fig.1-(b)참조)

본 장치의 다공성 플레이트는 1mm 두께의 steel plate (15×18 cm)를 사용하였으며, 시스템 유입유속 0.92~2.15 m/s로 처리유량 0.43~1.01 m<sup>3</sup>/min이 되도록 설계하였다. 본 시스템의 특성을 해석하기 위한 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Inlet velocity and tube velocity with tube diameter

Tube diameter (mm)	Inlet velocity (m/s)	Tube velocity (m/s)	Flow rate (m <sup>3</sup> /min)
8	0.92	12	0.43
	1.15	15	0.54
10	1.44	12	0.68
	1.8	15	0.85
	2.15	18	1.01

여기서,

$tube\ velocity$

$$= \frac{Flow\ rate}{\frac{\pi}{4}(tube\ diameter)^2 \times tube\ numbers (N=12)}$$

본 시스템은 실험장치 본체, 다층 다공성 플레이트, 분진 공급장치, 흡입 송풍기 및 계측시스템으로 구성된다. 유입유속과 압력손실은 각각 Anemometer (model 6621, Kanomax LTD.), Micromanometer (FCO 332, Furness Controls LTD.)를 사용하여 측정하였고 집진효율은 중량법을 사용하였다.

Fig. 2는 본 장치의 전체 시스템에 관한 모식도를 나타낸다.

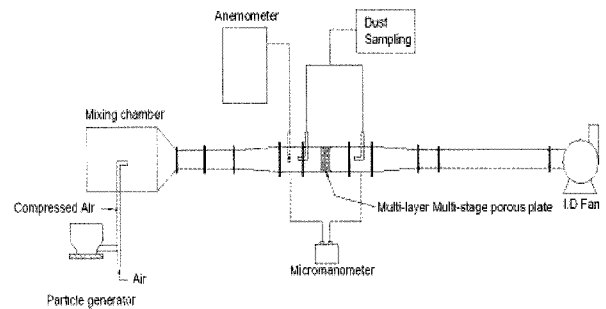
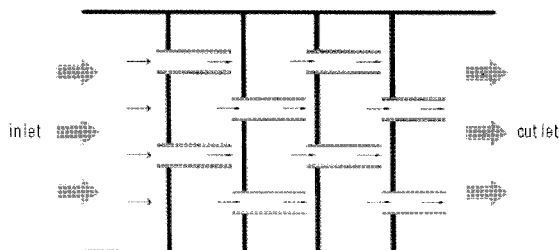
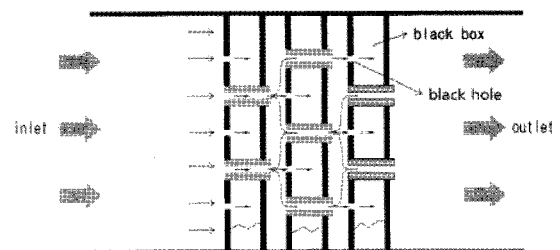


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Multi-stage porous plate

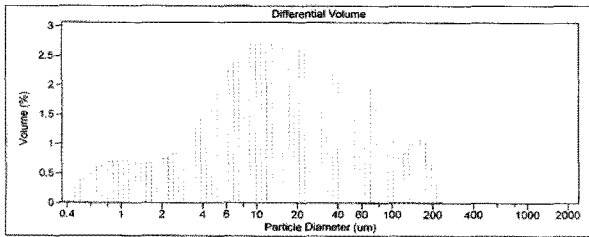


(b) Multi-layer multi-stage porous plate

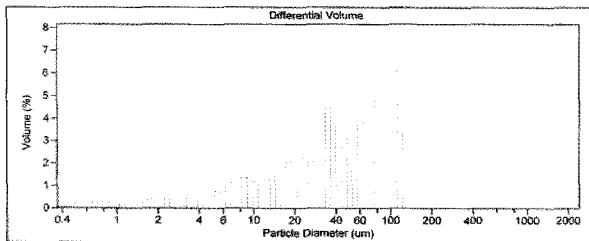
Fig. 1 Schematic diagram of multi-layer multi-stage porous plate system.

장치본체에 장착된 다층 다공성 플레이트는 두께 1.0mm steel plate 및 steel tube (Φ8, Φ10)로 구성 되어 있으며, 다층(복층)의 플레이트를 통과하는 tube는 다음단의 다층(복층) 플레이트 통과 tube와 교차되도록 하였으며, 다층(복층) 플레이트에서 전면의 플레이트에는 전단의 tube를 통과한 분진입자가 포집 및 퇴적 되도록 블랙홀을 형성하였다.

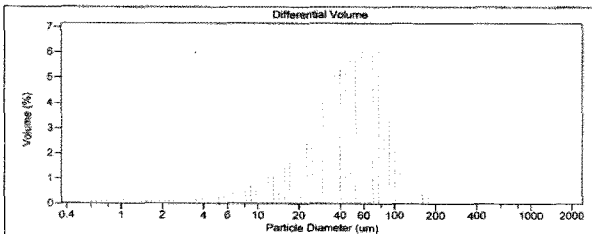
실험용 분진은 fly ash, steel dust, based powder(도료분체)를 사용하였다. Fig. 3은 Laser Diffraction Particle Size Analyzer를 사용하여 본 실험에 사용된 각 분진의 입경분포를 나타낸 것이다. 분진의 입경 범위는 0.4~200 μm의 범위를 가지며, 부피기준으로 fly ash, steel dust, based powder의 평균입경은 각각 30.6, 45.7, 50.5 μm로 based powder가 가장 큰 입경 분포를 나타낸다.



(a) Fly ash



(b) Steel dust



(c) Based powder

Fig. 3 Size distribution of test dust

### 3. 결과 및 고찰

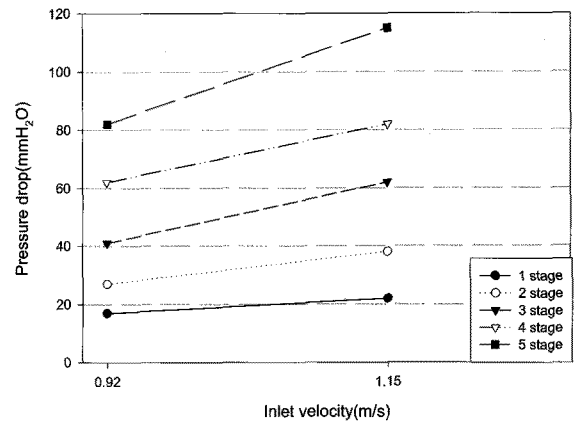
#### 3.1 압력손실 특성

다층 다단 다공성 플레이트 시스템의 stage 수에

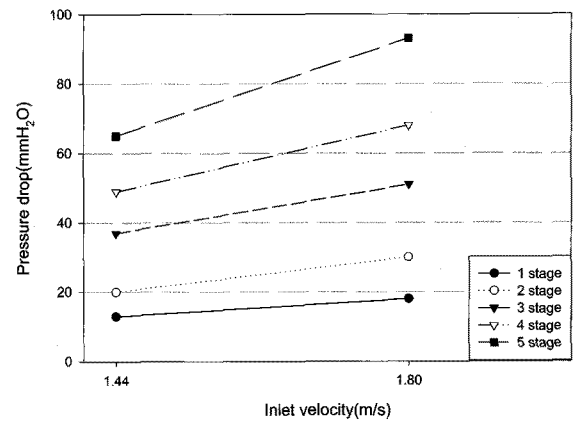
따른 압력손실은 집진 효율과 더불어 시스템 설계의 중요 인자가 된다. 본 시스템의 압력손실에 영향을 미치는 주요 실험변수로 튜브 통과유속, stage 수, 플레이트 간격 등을 들 수 있다. 압력손실은 다음과 같이 표현될 수 있으며, 이들 변수에 따라 압력손실 특성이 변화 될 수 있다.<sup>15)</sup>

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_n - P_{n+1} \\ &= f(\rho v_i^2, d_i, etc) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $P_n$  및  $P_{n+1}$  은 각각 plate 전단부 및 후단부에서의 압력,  $\rho$ 는 가스밀도,  $v_i$ 는 통과유속,  $d_i$ 는 플레이트간의 간격을 의미한다.



(a) Tube diameter 8 mm



(b) Tube diameter 10 mm

Fig. 4 Pressure drop with increasing stage number(plate interval 7 mm)

Fig. 4 (a), (b)는 튜브직경 8, 10mm에서 1~5 stage의 stage 수 증가에 따른 압력손실을 나타내었다.

Fig. 4 (a)는 직경 8mm tube에서 시스템 유입유속  $v_{in} = 0.92, 1.15$  m/s (튜브 통과유속  $v_t = 12, 15$

m/s)에 따른 압력손실 변화를 나타낸다. 튜브 통과 유속 12 m/s의 경우 1~5 stage 수 증가에 따라 17~82 mmH<sub>2</sub>O로 압력손실은 증가하게 되며, 15 m/s의 경우 역시 1~5 stage 수가 증가하면서 압력손실은 22~115 mmH<sub>2</sub>O로 식 (1)에 의해 높게 나타남을 알 수 있다. Fig. 4 (b)의 경우 Φ10 tube에서 시스템 유입유속  $v_{in} = 1.44, 1.80$  m/s (튜브 통과유속  $v_t = 12, 15$  m/s)에 따른 압력손실을 나타내며, 12 m/s의 경우 stage 수 증가 (1~5)에 따라 13~64mmH<sub>2</sub>O, 15 m/s의 경우 18~93 mmH<sub>2</sub>O로 증가됨을 볼 수 있다. 즉, Φ8 tube에 비해 Φ10 tube의 경우 동일 tube 통과유속에서 압력손실은 낮게 나타나며, 이는 tube 내의 반경방향에 따른 tube 벽면에서의 가스 속도구배가 Φ10에서 Φ8보다 작아 벽면 마찰력의 감소에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 plate 간격에 따른 Φ8 tube, 5 stage에서의 압력손실을 나타낸다. tube 통과유속  $v_t = 12$  m/s (시스템 유입유속 0.92 m/s)에서 plate 간격 5, 7, 10 mm 일 때 압력손실은 132, 82, 60 mmH<sub>2</sub>O로 plate간격이 넓어질수록 압력손실이 감소되는 경향을 보이며, 특히 plate 간격 10 mm에 비해 5 mm인 경우 2배 이상의 높은 압력손실을 확인할 수 있다. 이는 plate 간격이 커질수록 전후단 plate 사이의 공간 확대에 의한 유속 감소로 저항력이 감소되기 때문인 것으로 생각된다.

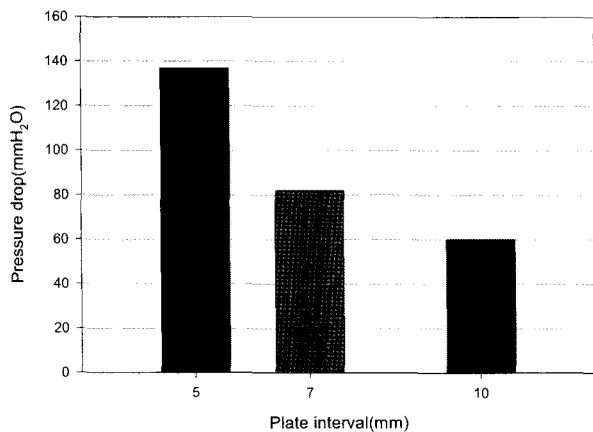


Fig. 5 Pressure drop with various plate interval(5 stage, inlet velocity 0.92 m/s)

### 3.2 집진효율 특성

본 시스템의 집진효율 특성을 파악하기 위해 장치 입·출구에서 중량농도를 측정하고 다음 식에 의해 집진효율을 계산하였다.

$$\eta_t = 1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \quad (2)$$

여기서,  $\eta_t$ 는 총괄 집진효율,  $m_{in}$ 은 입구 중량농도,  $m_{out}$ 은 출구 중량농도를 나타낸다.

본 시스템에서 집진에 영향을 미치는 주요 변수는 유입유속, tube 직경, plate 간격 및 stage 수 등이며, 주 집진 메카니즘은 관성력에 의한 impaction 효과와 미세입자에 대한 난류확산 및 브라운 운동이 될 수 있다.

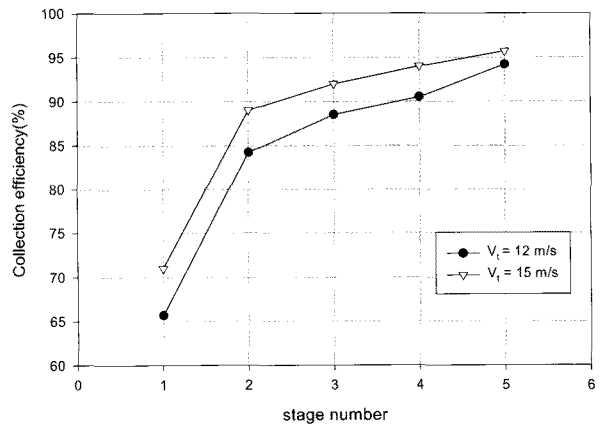


Fig. 6 Collection efficiency with increasing stage number at  $v_t = 12, 15$  m/s (tube diameter 8 mm, plate interval 7 mm, steel dust, inlet concentration 3 g/m<sup>3</sup>)

Fig. 6은 Φ8 tube에서 tube 통과유속  $v_t = 12, 15$  m/s ( $v_{in} = 0.92, 1.15$  m/s)일 때 stage 수 증가에 따른 집진효율 특성을 나타낸다.  $v_t = 12$  m/s 인 경우 1단에서 5단으로 stage 수가 증가 할 때 stage 별 집진효율은 65.7, 84.2, 88.3, 90.5, 94.3 %로 증가되며,  $v_t = 15$  m/s에서는 70.9, 88.9, 92.3, 94.1, 95.7 %로 증가하면서  $v_t = 12$  m/s의 경우보다 높은 집진효율을 나타낸다. (steel dust, 유입농도 3 g/m<sup>3</sup>)

$$\text{impaction parameter } \psi = \frac{v_t \tau}{d} \quad (3)$$

$$\text{momentum relaxation time } \tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$$

여기서, d는 플레이트 간격,  $\rho_p$ 는 분진 밀도,  $d_p$ 는 분진 직경,  $\mu$ 는 가스 점성을 나타낸다.

stage 수 증가에 따른 집진효율 증가 구배는 후단으로 갈수록 낮아지는데 이는 식 (3)에 의해 입경이 큰 입자는 높은 관성력에 의해 전단에서 거의 집진

되고 후단으로 갈수록 포집되지 않은 미세입자의 집진효율이 낮아지기 때문이다.

Fig. 7은 5stage,  $\Phi 8$  tube,  $v_t = 12$  m/s ( $v_{in} = 0.92$  m/s), 유입농도  $3$  g/m<sup>3</sup>에서 steel dust인 경우 plate 간격에 따른 집진효율을 나타낸 것이다.

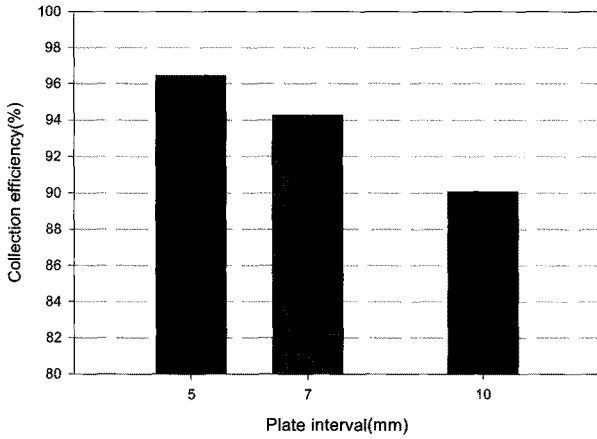


Fig. 7 Collection efficiency with various plate interval(5 stage, inlet velocity 0.92 m/s, tube diameter 8 mm, steel dust, inlet concentration 3 g/m<sup>3</sup>)

Fig. 7에서 보는 바와 같이 plate간격 5, 7, 10 mm 일 때 집진효율은 각각 96.5, 94.3, 90.1 %로 plate 간격이 증가할수록 집진효율은 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 plate 간격이 커질수록 분진입자의 black hole 까지의 이동거리가 길어져 black hole 내로 포집되지 못하고 기류를 따라 배출되는 비율이 높아지기 때문이며, 이러한 현상은 입경이 작아질수록 입자 inertia의 감소에 의해 높게 나타날 것으로 생각된다.

Fig. 8은  $\Phi 8$  tube,  $v_t = 12$  m/s, 5 stage에서 steel 분진입자 유입농도에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 유입농도 3, 5, 7, 10 g/m<sup>3</sup> 일 때 5 stage에서 집진효율은 95.6, 95.7, 97.2, 98.4 %로 유입농도가 높아지면서 집진효율은 증가하는 경향을 보이는데, 이는 유입농도가 높을수록 입자간의 응집효과에 의해 입경이 커질 수 있는 확률이 높아지며, 또한 기체 분자에 의한 drag 힘의 감소를 초래할 수 있기 때문이다.

Fig. 9는 튜브 통과유속  $v_t = 12$  m/s, 5 stage에서 튜브직경  $\Phi 8$ ,  $\Phi 10$  일 때 튜브직경에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 튜브직경 8 mm에서 10 mm로 커질 때 집진효율은 94.3 %에서 92.3 %로 감소

되며, 이는 튜브직경이 커질 때 입자간의 응집효과와 감소와 튜브단면에서의 유속분포의 변화에 따른 것으로 기인된다.

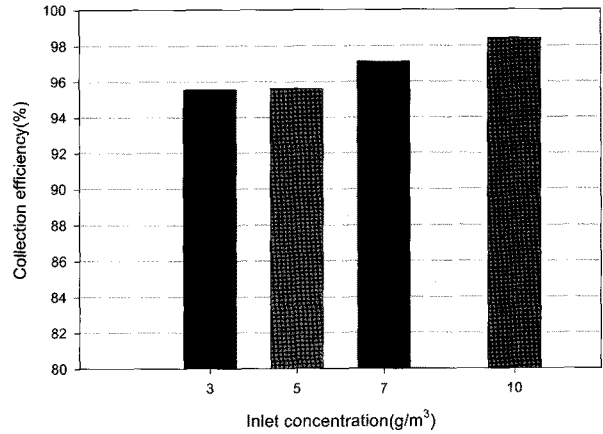


Fig. 8 Collection efficiency with inlet concentration (5 stage, inlet velocity 0.92 m/s, tube diameter 8 mm, plate interval 7 mm, steel dust)

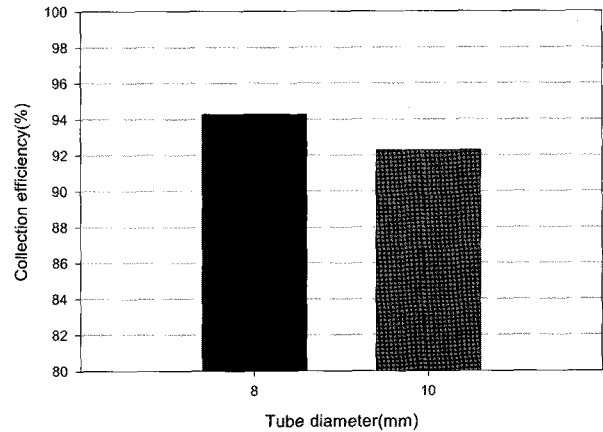


Fig. 9 Collection efficiency with tube diameter (5 stage, plate interval 7 mm, steel dust, inlet concentration 3 g/m<sup>3</sup>)

Fig. 10은 튜브직경  $\Phi 10$ 에서 시스템 레이놀즈 수  $Re = 8551, 10688, 12767$  (튜브 통과유속  $v_t = 12, 15, 18$  m/s) 일 때의 집진효율 변화를 나타낸 것이다.

여기서,  $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$  이며  $V$ 는 시스템 유입유속,  $D$ 는 시스템 덕트 직경이다.  $Re = 8551, 10688, 12767$ 에서 집진효율은 각각 92.3, 93.2, 94.9 %로  $Re$ 수가 높아지면서 집진효율은 증가함을 볼 수 있고 식 (3)에서 보듯이  $Re$ 수 증가 (동일 가스, 시스템에서 유속증가)에 의한 입자 관성력의 증가에 의

한 것으로 알 수 있다.

#### 4. 결 론

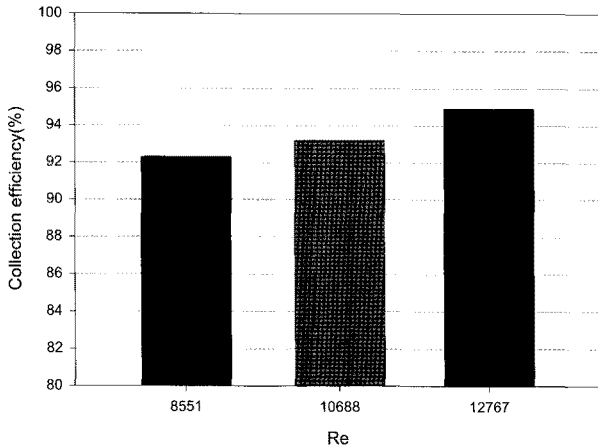


Fig. 10. Collection efficiency with Re (5 stage, tube diameter 10 mm, plate interval 7 mm, steel dust, inlet concentration 3 g/m<sup>3</sup>)

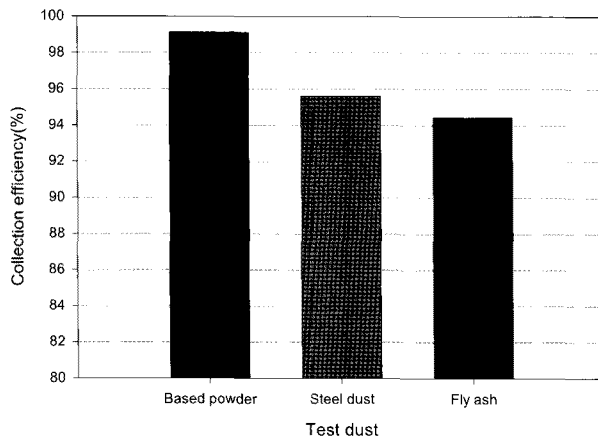


Fig. 11 Collection efficiency with experimental dust(5 stage, inlet velocity 0.92 m/s, tube diameter 8 mm, plate interval 7 mm, inlet concentration 3 g/m<sup>3</sup>)

Fig. 11 은  $\Phi 8$  tube,  $v_t = 12$  m/s, 5 stage에서 분진종류에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 실험용 분진은 fly ash, steel dust, based powder를 사용하였고 Fig. 3에서 보듯이 부피기준 평균입경은 각각 30.6, 45.7, 50.5  $\mu\text{m}$ 이며 분진의 유입농도는 3g/m<sup>3</sup>이다. 집진효율은 식 (3)에서 알 수 있듯이 평균입경이 가장 큰 based powder가 99.1 %로 가장 높고 steel dust, fly ash가 각각 95.6, 94.4 %를 나타내었다.

다층 다단 다공성 plate 시스템의 집진특성을 해석하기 위해 시스템 유입유속(튜브 통과유속), stage수, 튜브직경, plate 간격, 분진농도 및 분진종류 등의 다양한 변수에 따른 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) Stage수가 1~5 단으로 증가할 때 튜브직경  $\Phi 8$ 에서 튜브 통과유속  $v_t = 12$  m/s 인 경우 압력 손실은 17, 27, 41, 62, 82 mmH<sub>2</sub>O,  $v_t = 15$  m/s인 경우 22, 38, 62, 82, 115 mmH<sub>2</sub>O로 증가하였다.
- 2) 5 stage, 튜브 통과유속 15 m/s 인 경우 튜브 직경 8, 10 mm에서 압력손실은 각각 115, 93 mmH<sub>2</sub>O이며 동일 튜브 통과유속에서  $\Phi 8$ 일 때 조금 높게 나타남을 볼 수 있다.
- 3) 집진효율은 튜브직경  $\Phi 8$ 에서 stage 수가 증가할 때 (1단→5단)  $v_t = 12$  m/s 인 경우 65.7, 84.2, 88.3, 94.3, 96.5 %이며,  $v_t = 15$  m/s 인 경우 70.9, 88.9, 92.3, 94.1, 95.7 %로 튜브 통과 유속(유입유속)이 높아지면서 집진효율이 증가함을 알 수 있다. (유입농도 3g/m<sup>3</sup>)
- 4) 튜브직경 8, 10 mm에서 5 stage,  $v_t = 15$  m/s 인 경우 집진효율은 각각 95.7, 92.3 %이며 동일 튜브 통과유속에서 튜브직경이 커질수록 집진효율은 감소하였다. (유입농도 3g/m<sup>3</sup>)
- 5) 분진 종류에 따른 집진효율은 fly ash, steel dust, based powder 인 경우 각각 94.3, 95.6, 99.1 %를 보이며 평균 입경이 가장 큰 based powder의 집진효율이 가장 높게 나타난다. ( $\Phi 8$  tube,  $v_t=12$  m/s, 유입농도 3g/m<sup>3</sup>, 5 stage)
- 6) 유속증대 및 stage 수 증가는 집진효율 증가에 중요한 파라미터가 되지만 상대적으로 시스템의 압력손실 증가(시스템 동력소모 증가)를 초래하므로 이에 대한 심도있는 최적조합이 필요하다고 판단 된다.
- 7) 본 시스템은 고효율 및 높은 처리유량으로 여과 집진장치 및 전기 집진장치에 비해 장치의 소형화가 가능하며 필터 의존도 및 고전압 사용 없이 유지·관리 측면에서 효과적일 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2009년도 누리 사업단 연구과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Bahman A. and Matthew N. G., 1997, "Transport and Deposition of Particles and Fibers in a Virtual Impactor", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 27, pp. 499~506.
2. Daniel M., Pierre P. and Marcel B., 1999, "A Versatile Flat-Deposit Impactor-Type Aerosol Collector, Part 1 : Design and Qualitative Study", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 31, pp. 323~337.
3. Daniel M., Pierre P. and Marcel B., 1999, "A Versatile Flat-Deposit Impactor-Type Aerosol Collector, Part 2 : Calibration and Quantitative Study", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 31, pp. 338~349.
4. Yoshikazu K. et al., 1995, "Improvement of multi-jet low pressure impactor for high collection efficiency of UF5 in the molecular laser isotope separation of uranium", *J. Nucl. Mater.*, Vol. 224, pp. 43~49.
5. Jiro K. et al., 1991, "Separation Efficiency of Particles in Low Pressure Virtual Impactor", *J. Nucl. Mater.*, Vol. 28, pp. 166~169.
6. Tsai C. J. and Cheng Y. H., 1995, "Solid Particle Collection Characteristics on Impaction Surface of Different Designs", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 23, pp. 96~106.
7. Daniel J. R. and Anthony S. G., 1998, "Showerhead-enhanced inertial particle deposition in parallel plate reactors". *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 105~132.
8. Huang C. H. and Tsai C. J., 2001, "Effect of gravity on particle collection efficiency of inertial impactors", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 357~387.
9. Novick V. J. and Alvalez J. L., 1987, "Design of a Multistage virtual Impactor", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 6, pp. 63~70.
10. Benjamin J. and Wang H. C., 1995, "On the shape of impactor efficiency curves", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 26, No. 7, pp. 1139~1147.
11. Annele V. et al., 2001, "Fine particle losses in electrical low-pressure impactor", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 389~401.
12. Marko M. et al., 2000, "Performance evaluation of the Electrical Low-Pressure Impactor (ELPD)", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, No. 2, pp. 249~261.
13. Swanson P. D. et al., 1996, "Numerical analysis of motion and deposition of particles in cascade impactors", *Int. J. Pharm.*, Vol. 142, pp. 33~51.
14. Klaus W., Xuejun L. and Sergey A. G., 1998, "Improved Aerosol Collection by Combined Impaction and Centrifugal Motion", *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 28, No. 5, pp. 439~456.
15. Parcker C. R., 1993, *Aerosol science and technology*, McGraw-Hill Inc., pp. 104~105.