

충진층식 세정집진기의 집진특성 실험

유 경 훈[†], 노 희 환, 최 은 수^{*}, 김 종 균^{**}

한국생산기술연구원 에어로졸·필터연구실, ^{*}명지대학교 기계공학부, ^{**}(주)백륜

An Experiment on the Particle Collection Characteristics in a Packed Wet Scrubber

Kyung-Hoon Yoo[†], Hee-Hwan Roh, Eunsoo Choi^{*}, Jong-Kyoon Kim^{**}

Aerosol and Filtration Technology Laboratory, KITECH, Cheonan-Si 330-825, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Myoungji University, Yongin 449-728, Korea

^{**}Baek Ryun Co., Seoul 135-100, Korea

(Received October 28, 2002; revision received March 12, 2003)

ABSTRACT: DOP aerosol particles with geometric mean diameter of 0.5~3.0 μm , geometric standard deviation of 1.1~1.3 and total number concentration of 1,500~8,000 particles/cm³ were used to determine collection efficiencies of a packed wet scrubber with respect to particle size. The tested operating variables included air velocity and water injection rate. It was shown from the experimental results that the collection efficiencies increased with increasing water injection rate and decreasing air velocity. Meanwhile, as for the particle size variation, all of the collection efficiency curves increased rapidly between 0.57~1.41 μm for the range of water injection rate above 30 L/min. It was also seen that the collection efficiency of a packed wet scrubber is mainly governed by the mechanism of inertial impaction.

Key words: Packed wet scrubber(충진층식 세정집진기), Particle collection efficiency(입자 집진 효율), DOP particles(디옥틸프탈렌산 입자), Water injection rate(주수량), Air velocity(공기속도)

기 호 설 명

C_{inlet} : 세정집진기 입구에서의 총입자수 농도
[particles/m³]

C_{outlet} : 세정집진기 출구에서의 총입자수 농도
[particles/m³]

D : 수액적의 지름 [μm]

d_p : 입자크기 [μm]

L : 유효집진길이 [ft]

V : 세정집진기 입구 공기속도 [ft/s]

그리스 문자

α : 주수량과 공기유량의 비 [L/m³]

η : 입자수농도기준 집진효율

1. 서 론

세정집진기는 액체를 분사시켜 분진을 수반하는 유해가스를 청정하게 하는 장치이며 전기집진기나 여재필터 등의 건식 필터와는 달리 분진과 가스를 동시에 제거할 수 있는 이점을 가지고 있

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-5898-354; fax: +82-41-5898-330

E-mail address: khyoo@kitech.re.kr

다. 그러나, 세정집진기는 분진제거 메커니즘이 관성충돌(*inertial impaction*)에 크게 의존하기 때문에 입자 크기가 $1\ \mu\text{m}$ 에 근접하게 되면 집진효율이 급격히 감소하여 서브마이크론 입자를 거의 제거하지 못하는 단점을 가지고 있다.⁽¹⁻³⁾

본 연구에 고려된 충전층식 세정집진기는 이러한 단점을 개선하기 위하여 고안한 것이며 철망을 다중겹층으로 제작한 데미스터를 충전층으로 사용하고 이 충전층에 세정수를 분사시켜 유해가스와 액적의 접촉시간을 증가시켜 부유분진의 처리를 증진시킨 장치이다. 이 충전층은 압력손실이 적을 뿐만 아니라 자동세정이 가능하므로 사후의 유지관리가 용이하여 기존의 여재필터 방식의 장시간 사용에 따른 효율저하 및 잦은 교체의 문제점을 극복할 수 있다.

한편, 통상적인 세정집진기인 살수탑(*spray tower*)형과 벤츨리형 세정집진기에 대한 연구는 일부 문헌상에 보고되고 있으나 아직까지 충전층식 세정집진기의 입자크기별 집진효율 특성에 대한 실험결과는 거의 전무한 형편이다.⁽⁴⁾ 본 연구에서는 기하평균지름(GMD)이 $0.57\ \mu\text{m}$, $0.74\ \mu\text{m}$, $1.0\ \mu\text{m}$, $1.41\ \mu\text{m}$, $2.94\ \mu\text{m}$ 이고 기하표준편차(GSD)가 1.1~1.3인 DOP 에어로졸을 사용하여 처리공기속도와 주수량(물분사량)에 따른 입자크기별 집진효율과 압력강하에 관한 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치에 대한 전체적인 개략도이다.⁽⁵⁾ 실험장치는 크게 청정풍동, 에어로졸 발생부, 에어로졸 측정부, 그리고 세정

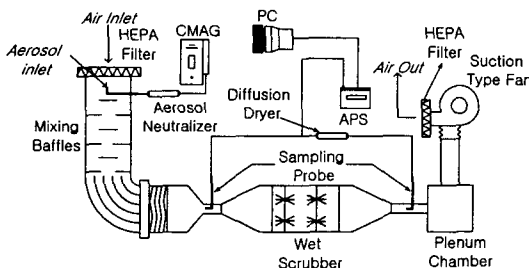


Fig. 1 Schematic diagram of the present experimental apparatus.

집진기로 나누어진다. 에어로졸의 발생부에서 발생한 에어로졸은 청정풍동 안으로 유입되고, 세정집진기에서 포집된 후에 에어로졸 측정부에서 입자크기분포가 측정된다.

청정풍동은 세정집진기가 설치된 부분으로부터 먼 하류에 설치된 원심송풍기에 의해 작동되는 흡입형 풍동이다. 원심송풍기의 팬은 3마력의 전기모터로 구동되며 팬에 의한 기계적인 진동 및 유동의 교란이 상류로 전달되는 것을 최소화하기 위하여 원심송풍기와 이와 연결된 덕트 사이에 완충부를 두고 이 원형덕트와 시험부 사이에 플레넘챔버를 설치하였다. 대기중의 공기는 풍동으로 흡입되는 순간 $15\ \text{cm}$ 두께의 고성능 HEPA 필터를 통과하면서 대기중의 입자들이 제거되고 청정상태로 유입된다. 입자 발생시는 필터로부터 하류 방향으로 약 $30\ \text{cm}$ 떨어진 곳에서 외경 $0.5\ \text{in}$ 의 스테인레스관을 통하여 유동의 역류 방향으로 주입되는 DOP 에어로졸과 혼합되고 발생지점으로부터 $10\ \text{cm}$ 하류에 설치된 차폐판들을 통과하면서 더 좋은 혼합이 발생하도록 하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용하고 있는 시험 에어로졸 발생장치의 구성도를 보여주고 있다. 단분산의 DOP 에어로졸을 발생시키기 위하여 Condensation Monodisperse Aerosol Generator(이하 CMAG; Model 3470, TSI, Inc., St. Paul, MN, USA)를 채택하였고 이는 LaMer-sinclair 타입의 용축형 단분산 입자발생기를 수정한 것이다. 이 장치는 기하표준편차 1.1 근처의 고체나 액체 형태의 입자를 발생시킬 수 있다. 질소가스는 우선 $20\ \text{mg/L}$ 의 NaCl 수용액이 담겨 있는 분무관(nebulizer)을 통과하고 분무기에서 형성된 액적은 에어로졸에 남아 있는 수증기를 증발시키는 미스트 제거기(mist arrestor)와 확산건조기를 통과한

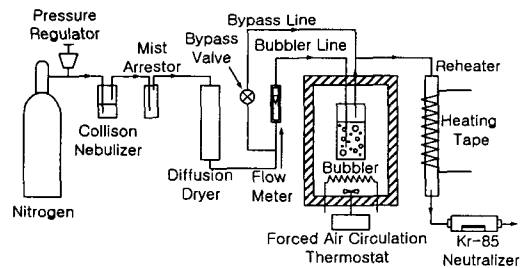


Fig. 2 Schematic diagram of the DOP aerosol generating system.

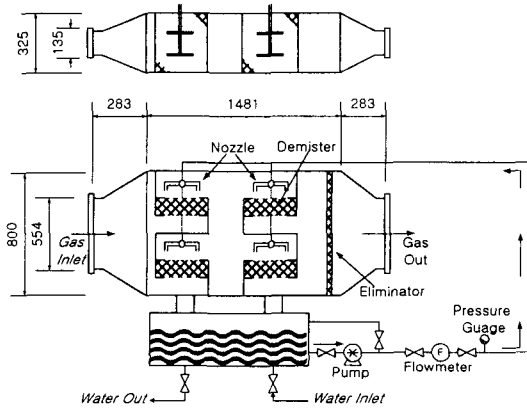


Fig. 3 Schematic diagram of the present packed wet scrubber.

다. 이 NaCl 입자는 나중에 응축핵이 된다. 이 응축핵 유동은 바이패스 밸브에 의해 두 흐름으로 나뉘게 되는데 한 흐름은 유량계와 가열된 버블러(bubbler)를 지나 재열관(reheater)으로, 다른 한 흐름은 바이패스관, 버블러를 지나 바로 재열관으로 간다. 버블러는 입자 생성원 물질인 DOP를 저장하고 있어 응축핵 유동이 가열된 버블러를 통과하면서 DOP로부터 증발기체를 얻는다. 이 유동은 재열관을 통과하면서 증발이 완료되고 이후에 냉각되어 응축핵 주위에 일정하게 증발기체가 응축되고 단분산 에어로졸이 생성된다. CMAG에서 발생한 입자는 에어로졸 중화기를 지나면서 전기적으로 중화되어 청정풍동의 상류로 유입된다. 생성되는 입자 크기는 버블러의 온도조절을 통해 각 응축핵에 응축 가능한 증발기체의 양으로 결정된다.

Fig. 3은 본 연구에서 고안한 충진층식 세정집진기의 개략도를 보여주고 있다. 이 세정집진기는 총 4개의 충진층을 2단 2층으로 설치할 수 있도록 제작되었으며 차후에 충진층의 교체를 위하여 충진층이 위치하는 측면에 개폐장치를 만들어 놓았다. 공기유동의 흐름은 차례로 1단에서는 향류(counter-current), 2단에서는 동류(co-current)가 되도록 배치하였는데 이는 향류와 동류에 대한 충진층식 세정집진기의 집진성능 연구가 현재 전무한 형편에서 평균적인 효과를 발휘하도록 하기 위한 것이다. 세정집진기의 하부에 위치한 저수조는 드레인된 세정수의 분진들은 아래에 침전되고 걸러진 세정수만이 순환되도록 설계하였다. 각 충진층당 4개씩 총 16개의 노즐을 장착하여

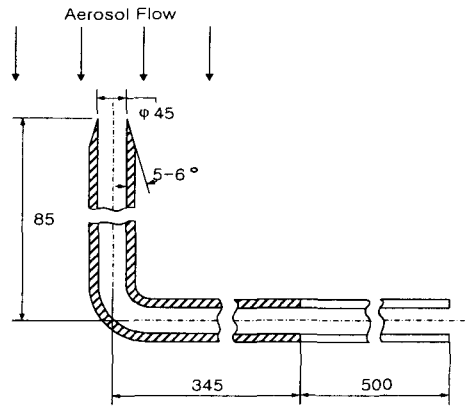


Fig. 4 Schematic diagram of the sampling probe.

충진층 전면에서 세정수가 고루 분사되도록 하였다. 에어로졸 내에 부유하는 입자들의 수농도를 정확히 측정하기 위해서는 먼저 공기유동 내의 입자들을 Fig. 1에 도시된 샘플링 프로브로 정확히 샘플링하고 샘플링 입자들을 샘플링 튜브 벽면으로의 침착 없이 그대로 입자수농도 측정장치로 수송하는 전달장치의 확립이 필요하다. 본 실험에서는 Okazaki and Willeke⁽⁵⁾의 설계에 근거하여 Fig. 4에 도시된 Willeke-type 샘플링 프로브를 제작하였고 샘플링 라인상의 샘플링 프로브 및 샘플링 튜브의 전달효율이 모두 보장되었다.⁽⁶⁾

2.2 실험방법

세정집진기에서의 입자의 집진효율을 측정하기 위하여 Fig. 1에 도시한 것처럼 세정집진기를 통과하기 전과 후의 입자수 농도를 Aerodynamic Particle Sizer(이하 APS ; Model 3310A, TSI, Inc., St. Paul, MN, USA)를 사용하여 측정하고 집진효율을 다음과 같이 산출하였다.

$$\eta_{exp} = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \quad (1)$$

여기서 η_{exp} 는 입자수 농도기준에 의한 집진효율이고, C_{inlet} 는 세정집진기 통과전의 총입자수 농도이고, C_{outlet} 는 세정집진기 출구에서의 총입자수 농도이다.

세정집진기의 집진효율에 대한 변수로 풍동 내 유동속도와 노즐에서 나오는 물분사량(주수량)을

선정하고 이러한 변수들의 변화에 따른 입자크기별 집진효율의 변화특성을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 에어로졸의 발생특성

Fig. 5와 Fig. 6은 청정풍동 내의 공기유속이 각각 1 m/s와 3 m/s일 때 세정집진기 입구에서 측정된 DOP 에어로졸의 입자크기분포를 각각 나타내고 있다. 그리고, Table 1은 유속이 1 m/s와 3 m/s인 Fig. 5와 Fig. 6에 대한 입자크기분포 특성인 기하평균지름(GMD), 총입자수농도(TNC), 기하표준편차(GSD)와 입자발생장치 CMAG의 버블러 및 재열관의 온도조건을 각각 수록하고 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 살펴보면 청정풍동 내의 유속이 1 m/s에서 3 m/s로 증가했을 때 입자수 농도가 감소하는 경향을 볼 수 있는데 이는 에어로졸의 발생량은 일정하지만 혼합되는 청정공기의 양이 증가하여 희석된 결과이다. 다만, Table 1에서 1

m/s일 때의 총입자수 농도가 3 m/s의 경우에 비해 3배가 아닌 2~3배인 것은 풍동의 상류부에서 이상적으로 완벽한 혼합이 달성되지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러나, 풍동 내의 유속이 증가하여도 총입자수 농도만 감소할 뿐 기하평균지름과 기하표준편차는 일정함을 알 수 있다. 한편, 총입자수 농도는 전체적으로 1,000 particles/cm³ 이상의 범위에 있으며 이는 총입자수 농도가 1 particles/cm³ 이하로 제어된 청정풍동 내의 배경농도를 훨씬 상회하는 수준이므로 배경농도에 의한 오차는 무시될 수 있다.

3.2 압력강하

Fig. 7은 충전층의 장작과 비장착시의 청정풍동 내의 풍속에 따른 세정집진기에 의한 압력손실을 보여주고 있다. 풍동 내 유속이 빨라질수록 압력손실의 차가 커지는 경향을 보이거나 전 속도에 걸쳐 그 차이는 2 mmAq 이내로 유지되고 있어 충전층으로 인한 압력강하는 매우 미미함을 알 수 있다.

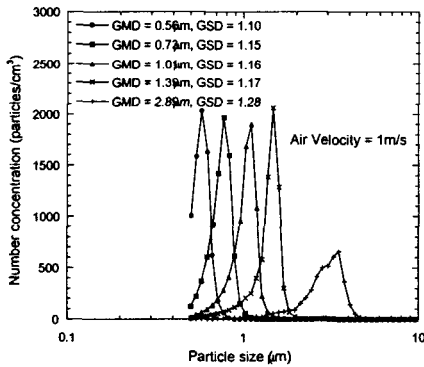


Fig. 5 Particle size distributions for 1 m/s at the inlet of the packed wet scrubber.

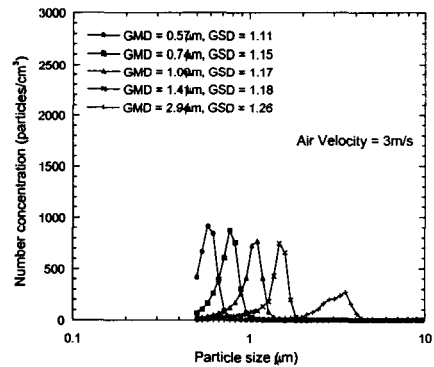


Fig. 6 Particle size distributions for 3 m/s at the inlet of the packed wet scrubber.

Table 1 Geometric mean diameter, total number concentration and geometric standard deviation with bubbler and reheater temperatures

Bubbler and reheater temp.	GMD (μm)		TNC (particles/cm ³)		GSD	
	1 m/s	3 m/s	1 m/s	3 m/s	1 m/s	3 m/s
T _b =160℃, T _r =130℃	0.56	0.57	7161.7	3362.9	1.10	1.11
T _b =170℃, T _r =150℃	0.74	0.74	8106.9	3618.1	1.15	1.15
T _b =180℃, T _r =160℃	1.01	1.00	7870.2	3283.8	1.16	1.17
T _b =200℃, T _r =160℃	1.39	1.41	7219.7	2845.1	1.17	1.18
T _b =250℃, T _r =210℃	2.89	2.94	4524.1	1731.3	1.28	1.26

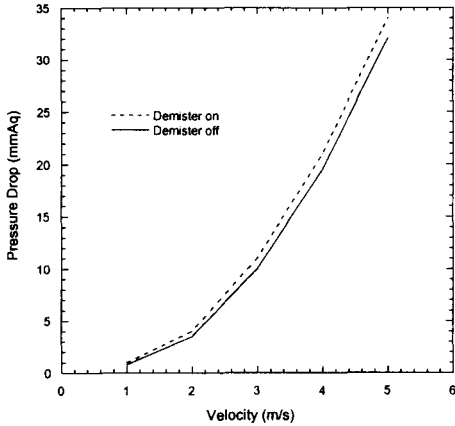


Fig. 7 Pressure drop across the wet scrubber.

3.3 주수량에 따른 집진효율

Fig. 8은 주수량(물분사량)에 따른 입자크기별 집진효율의 변화에 대한 실험결과를 보여주고 있다. 이때, 세정집진기의 입구에서의 공기속도는 3 m/s이다. 집진효율 실험결과와 x축상의 입자크기는 차례로 0.57 μm , 0.74 μm , 1.0 μm , 1.41 μm , 2.94 μm 이며 Table 1에 수록한 기하평균지름(GMD)을 나타낸다. 주수량이 0 L/min인 경우는 충진층에 의한 구조적인 집진효율을 나타내며 전 입자크기에 걸쳐 10% 미만의 집진효율을 보여주고 있다. 주수량이 20 L/min까지는 입자크기에 상관없이 집진효율의 변화가 거의 없고, 20% 미만의

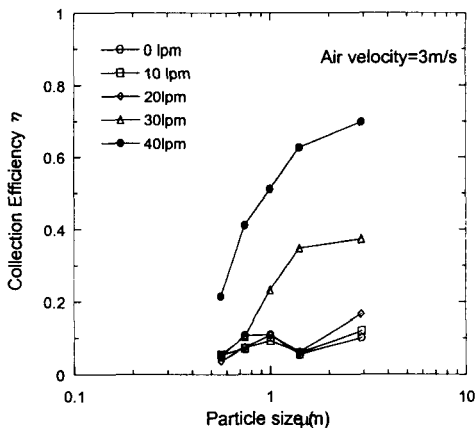


Fig. 8 Variations of the collection efficiencies with respect to particle size for various water injection rates.

집진효율을 보여주고 있다. 주수량이 30 L/min이 되면 집진효율이 급격히 증가하여 전형적인 세정집진기의 집진효율 특성곡선형태⁽⁷⁾가 얻어짐을 알 수 있다. 즉, 입자크기 1.0 μm 에서 집진효율이 크게 증가하기 시작하여 2.94 μm 에서 포화거동을 보여주며 최대 집진효율은 약 40%로 국한되고 있음을 알 수 있다. 이때의 분사노즐당 주수량은 1.875 L/min이다. 분사노즐당 주수량이 2.5 L/min이 되는 40 L/min가 되면 집진효율은 더욱더 증가되어 입자크기 0.57 μm 에서부터 크게 증가하고 2.97 μm 에서 포화거동을 보여주기 시작하며 최대 집진효율이 약 70%에 이르게 됨을 알 수 있다.

3.4 유동속도에 따른 집진효율

Fig. 9는 주수량이 40 L/min(노즐당 2.5 L/min)일 때 청정풍동 내 공기속도에 따른 입자크기별 집진효율의 변화를 보여주고 있다. 실험결과와 x축상의 입자크기는 차례로 0.57 μm , 0.74 μm , 1.0 μm , 1.41 μm , 2.94 μm 이다. 실험결과들은 모든 공기속도에서 0.57 μm 에서 1.41 μm 까지 집진효율이 급격히 증가하다가 2.94 μm 에서는 증가폭이 둔화되어 포화거동을 보이는 집진효율 특성곡선형태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 Crawford⁽⁷⁾가 언급한 것처럼 세정집진기에서의 주 분진제거 메커니즘이 확산보다는 관성충돌이라는 이론과 일치하는 것이다. 따라서, 충진층식 세정집

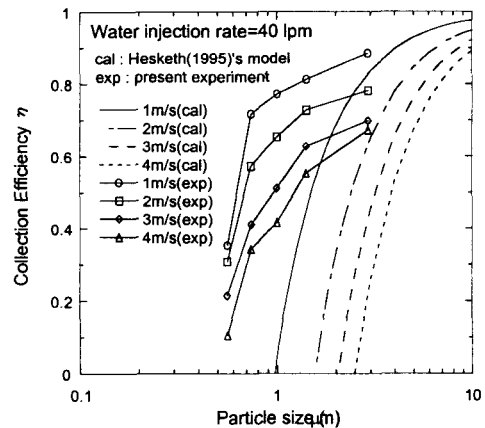


Fig. 9 Variations of the collection efficiencies with respect to particle size for various air velocities.

진기에서 $0.5\mu\text{m}$ 와 $1\mu\text{m}$ 사이에서 입자크기가 증가할 때 집진효율이 급격히 증가하는 것은 관성충돌의 영향이 커지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 풍동 내 공기속도가 증가할수록 집진효율이 감소됨을 알 수 있다.

한편, 실험과의 비교를 위하여 Hesketh⁽⁸⁾가 충전층이 없는 전형적인 살수탑(spray tower)형 세정집진기에서 동류(co-current)인 경우에 대해 제안한 아래의 집진효율 이론모델의 계산결과들도 Fig. 9에 함께 도시하였다.

$$\eta_{the} = 1 - \frac{0.025 D^{0.574} V^{0.69}}{d_p^{1.60} [\alpha L]^{0.393}} \quad (2)$$

여기서, D 는 수액적의 크기(μm), V 는 공기속도(ft/s), d_p 는 입자크기(μm), α 는 주수량과 공기유량의 비(L/m^3), L 은 유효집진길이(ft)이다. 식(2)의 유도에 있어 브라운 확산은 무시하고 이동하는 수액적의 궤적이 그리는 체적 내에서 관성충돌에 의해 입자들이 제거되는 스위핑(sweeping) 효과가 고려된 이론식을 기존 실험결과들과 상관시켜 구하였다. 식(2)의 계산에 요구되는 수액적의 크기는 $1,000\mu\text{m}$ 로 가정되었고 본 연구에서 L 은 1.96ft 이고 참고로 α 는 $3\text{m}/\text{s}$ 의 경우 $2.97\text{L}/\text{m}^3$ 이다.

Fig. 9로부터 본 연구의 충전층식 세정집진기에 대한 실험결과가 운전조건이 동일한 살수탑형 세정집진기에 대한 계산결과보다 $1\mu\text{m}$ 이하의 서브마이크론 입자에 대해 집진효율이 훨씬 개선되었음을 알 수 있다. 이는 본 실험의 경우 이론모델에서는 배제된 충전층으로 인한 입자와 세정수의 접촉시간의 증가와 수막의 형성에 크게 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

기하표준편차가 $1.1\sim 1.3$ 이고 기하평균지름이 $0.57\mu\text{m}$, $0.74\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, $1.41\mu\text{m}$, $2.94\mu\text{m}$ 인 다섯가지의 DOP 에어로졸을 사용하여 철망을 다중접촉층으로 제작한 데미스터를 충전층으로 채용한 세정집진기의 입자크기에 따른 집진특성 실험을 공기속도 $1\sim 3\text{m}/\text{s}$, 노즐당 주수량 $0\sim 2.5\text{L}/\text{min}$ 에 대해 수행하고 다음과 같은 사항들을 관찰하였다.

(1) 공기속도 $3\text{m}/\text{s}$ 에서 노즐당 주수량이 $1.875\text{L}/\text{min}$ 이상이 되면 집진효율이 급격히 증가하여 관성충돌이 지배적인 전형적인 세정집진기 집진효율 특성곡선이 얻어진다.

(2) 주수량이 노즐당 $2.5\text{L}/\text{min}$ 일 때, 모든 공기속도에서 $0.57\mu\text{m}$ 에서 $1.41\mu\text{m}$ 까지 집진효율이 급격히 증가하고 $1.94\mu\text{m}$ 에서 포화거동을 보인다. 한편, 공기속도가 증가할수록 집진효율은 감소된다.

(3) 본 충전층식 세정집진기는 충전층의 영향으로 인해 운전조건이 동일한 살수탑형의 경우보다 입자크기가 $1\mu\text{m}$ 이하인 서브마이크론 입자에 대해 집진효율이 개선되었다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 청정생산기술개발사업 '다기능 충전층식 세정집진장치의 개발' 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 대해 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Ebert, F. and Buttner, H., 1996, Recent investigation with nozzle scrubbers, Powder Technology, Vol. 86, pp. 31-36.
2. Peukert, W. and Wadenpohl, C., 2001, Industrial separation of fine particles with difficult dust properties, Powder Technology, Vol. 118, pp. 136-148.
3. Agranovski, I. E. and Whitcombe, J. M., 2001, Case study of the practical use of wettable filters in the removal of submicron particles, Chem. Eng. Technol., Vol. 24, pp. 513-517.
4. Lanzerstorfer, C., 2000, Solid/liquid-gas separation with wet scrubbers and wet electrostatic precipitators: a review, Filtration and Separation, June, pp. 30-34.
5. Okazaki, K. and Willeke, K., 1987, Transmission and deposition behavior of aerosols in sampling inlets, Aerosol Science and Technology, Vol. 7, pp. 275-283.
6. Yoo, K. H., 1996, Study on particle charging and collection in two-stage parallel-plate

- electrostatic precipitators, Ph.D. Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
7. Crawford, M., 1976, Air Pollution Control Theory, McGRAW-HILL, New York, pp. 362-419.
 8. Hesketh, H. E., 1995, Predict particle collection in spray tower, Chemical Engineering Progress, pp.98-100.