PTFE membrane이 코팅된 여과백의 off-line 탈진시 미세먼지 집진 특성

Filtration Characteristics of Particulate Matter at Bag Filters Coated with PTFE Membrane During Off-Line Pulsing

김정훈 · 문일식* · 황민영 · 김량균 · 고대권[†]

Joung-Hun Kim · Il-Shik Moon* · Min-Young Hwang · Ryang-Gyoon Kim · Daekwun Ko[†]

포항산업과학연구원 · *순천대학교 화학공학과

Research Institute of Industrial Science and Technology

*Department of Chemical Engineering, Sunchon National University

(Received January 12, 2017; Revised May 14, 2017; Accepted June 15, 2017)

Abstract : Particulate matter becomes an important issue in the environmental society recently so that it is necessary to evaluate that the commercial application of baghouse systems for effective control of fine particulates is viable. A laboratory-scale baghouse experimental apparatus with filter bags made of PTFE felt or PTFE felt coated with PTFE membrane is used to investigate the filtration performances of fine particulates. Experiments by changing filtration velocity, inlet dust concentration, and average dust particle size show that the dust collection efficiency becomes higher at lower filtration velocity, higher inlet dust concentration and larger average dust particle size. The total pressure drop through the filter media and dust layer becomes higher at higher filtration velocity and higher inlet dust concentration. The dust collection efficiency is higher and the pressure drop is lower at a baghouse with filter bags coated with PTFE membrane than that without membrane coating. From the result that the dust collection efficiency of PM_{2.5} in a reasonable filtration velocity range during off-line pulsing at a baghouse with PTFE felt bag filters coated with PTFE membrane is as high as 99.99%, it is confirmed that the use of baghouse is an effective measure to control the fine particulates.

Key Words : Particulate Matter, PTFE Membrane, Baghouse, Collection Efficiency, Pressure Drop

요약 : 근래에 미세먼지가 대기환경 관련하여 이슈가 되고 있으며, 초미세먼지의 효과적인 집진을 위하여 대용량화가 용이한 여과집진기가 상업적으로 사용될 수 있는지에 대한 평가가 필요하다. 실험실 규모의 여과집진 장치를 제작하여, PTFE 재질의 부직포 여과백 또는 PTFE membrane이 코팅된 PTFE 재질의 부직포 여과백에서의 미세먼지 집진특성을 파악하기 위하여 집진실험을 수행하였다. 실험 변수로 여과속도, 투입 먼지 농도, 입도분포가 다른 먼지 종류 등을 사용한 실험에서, 여과속도가 낮을수록, 먼지 투입농도가 높을수록, 평균입도가 클수록 집진효율이 높았으며, 여과속도가 높고, 먼지 투입농도가 높을수록 압력손실이 높게 나타났다. Pore size가 상대적으로 작은 PTFE membrane이 코팅된 여과백을 사용한 경우, 코팅이 되지 않은 여과백을 사용한 경우에 비하여 집진효율이 높고, 표면여과에 따른 포집 먼지층 저항계수가 낮아져 압력손실이 낮게 나타났다. PTFE membrane이 코팅된 여과백을 사용하여 off-line 탈진을 수행할 경우, 적정 여과속도 범위 내에서 PM_{2.5}에 대한 집진효율이 99.99% 이상으로 매우 높게 유지됨에 따라, 여과집진기를 사용하여 초미세먼지를 효과적으로 집진할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 미세먼지, PTFE membrane, 여과집진기, 집진효율, 압력손실

1. 서론

최근 우리나라에서 대기 관련 가장 대표적인 환경 이슈는 초미세먼지(Particulate Matters < 2.5 μm , PM_{2.5})라 할 수 있으며,¹⁾ 주요 발생원은 굴뚝에서 먼지 형태로 배출되는 것과 대기 중에서 합성되는 연 형태의 것이다. 우리나라의 대기 환경기준 항목 중 먼지에 관련한 것으로 총부유먼지(TSP) 기준치는 1983년에 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (연평균)으로 설정되었고, 2015년에는 PM_{2.5}에 대한 기준치가 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (연평균)으로 설정되어 관리되고 있다. 이러한 대기환경기준을 달성하기 위하여, 배출원에 대한 규제인 배출허용기준도 점차적으로 강화되고 있다. 예를 들어 고체연료를 사용하는 발전시설의 경우에 그 용량에 따라 차이는 있으나, 2004년 50(6) mg/Sm³이었던 것이 2015년 이후에는 20(6) mg/Sm³로 강화되었다.²⁾

산업발달에 따라 불가피하게 생성되며, 주요 대기 오염물질의 하나인 먼지 입자는 산업체의 유류 및 화석 연료 보일러, 자동차, 제철/제강 공정, 시멘트 제조공정 및 폐기물소각 공정 등의 각종 연소, 생산 및 제조공정에서 발생되고 있다. 산업공정에서 발생하는 배가스 중 먼지를 처리하는 집진장치에서 대부분의 먼지가 제거되며, 여기에서 배출되는 최소한의 먼지의 많은 부분이 미세먼지이다. 이 미세먼지 중에서도 입경 1 μm 이하의 먼지들은 침강 속도가 작아 거의 gas와 동일한 거동을 하기 때문에 기관 또는 폐포에 침착하여 호흡기에 영향을 미칠 수 있으므로 그 발생량과 화학적 성상이 문제화 되고 있는 추세이다.³⁾

먼지를 고효율로 처리하는 장치로는 여과집진기와 전기집진기, 혹은 하이브리드집진기 등이 사용되고 있으며, 이 중 여과집진기는 산업체에서 배출되는 입자상 오염물질을 포집

[†] Corresponding author E-mail: kod@rist.re.kr Tel: 061-799-2714 Fax: 061-799-2736

제거하는 장치의 하나로서, 초기 투자비가 타 집진기에 비하여 다소 높기는 하나, 집진효율이 높을 뿐만 아니라, 기후 조건 및 작업공정에 관계없이 먼지 포집 성능이 안정적이고, 대형화 및 운전이 용이하다는 점 때문에 현재 가장 널리 사용되고 있는 집진기 형태중 하나이다. 여과집진기에 사용되는 백필터의 성능을 평가할 때 집진효율과 압력손실이 고려되며, 운전 시 일정한 압력손실 이하의 조건이 요구되며, 여과된 후 배출되는 배가스에 잔존하는 먼지농도를 최소화해야 한다. 환경규제 강화에 따라 특수섬유나 굵기가 미세한 섬유를 첨가하거나, 기공의 크기가 미세한 멤브레인 구조로 복합화하고, 또한 코팅이나 캘린더링 등 다양한 후가공으로 여과성능을 향상시키는 연구가 진행되고 있다.⁴⁻⁶⁾

여과집진기를 운영하기 위하여 여과포 표면에 부착되는 입자 층에 의하여 발생하는 압력손실로 인해 동력비가 많이 소요되며, 여과포에 부착된 먼지 층을 제거하기 위하여 수행하는 주기적인 탈진에 의하여 주로 발생하는 여과포 손상에 따른 여과포 교체 등으로 유지·보수비가 상대적으로 크다는 단점도 있다. 그러나 필요에 따라 여과속도를 낮게 설계하여, 압력손실을 낮게 유지하며, 탈진효율을 높이고, 탈진 주기를 짧게 하여, 여과포 수명을 증대함으로써 여과 집진장치의 운전 및 유지 보수비를 절감시킬 수도 있다.

여과집진기의 성능 향상 및 압력손실 감소를 위하여 polytetrafluoroethylene(이하 PTFE) membrane으로 laminating된 여과포에 대한 관심이 증대되어 다양한 연구가 진행되어 왔다. 기존 여과포에 의한 침중여과와 PTFE membrane filter에 의한 표면여과 방식의 차이점, 내화학적 및 내고온성과 같은 물리적 화학적 특성, 제조 및 시장현황에 대한 고찰이 이루어졌다.⁷⁾ 폴리에스터 재질의 부직포에 PTFE 수용액으로 코팅한 사각판형의 여과포를 사용한 집진실험에서 코팅이 되지 않은 여과포에 비하여 압력손실은 증가하였으나, 집진효율이 향상되는 결과를 보여주었다.⁸⁾

평균입경이 약 4 μm 인 탈컴(talcum) 파우더와 나노크기의 CaCO_3 파우더를 사용하여 뿔모양의 PTFE membrane filter와 PP 부직포에서의 압력손실 특성과 집진효율을 고찰하였으며, 이 연구는 역세를 수행하면서 실험을 수행하였다는 점과 여과포 형상이 다른다는 점이 본 연구와의 주요한 차이점이다.⁹⁾ PTFE membrane이 코팅된 filter에서 나노 입자의 집진특성에 대한 실험적 고찰을 위하여 3가지의 평판형 filter를 사용한 실험에서는 입자크기 변화에 대한 집진효율의 변화가 v자 형태로 나타났으며, 집진효율에 대한 모델을 제시하여 실험결과와 잘 일치하는 결과를 보여주었다.¹⁰⁾

본 연구에서는 공정에서 배출되는 총부유물질 TSP, 미세 먼지 PM_{10} 및 초미세먼지 $\text{PM}_{2.5}$ 와 같은 입자상 대기오염 물질을 여과집진기에서 제거할 때, 여과포 전후단의 압력변화 및 집진효율과 같은 여과성능을 다양한 조건에서 비교하기 위하여 소형 여과집진실험장치를 이용하여 실험을 off-line 탈진 조건에서 수행하였다. 실험에서는 PTFE 재질의 부직포와 이 부직포에 PTFE membrane이 코팅된 원통형의 여과포를 사용하였으며, 먼지의 종류, 집진기로 공급되는 공기

유량, 먼지 공급량 등의 변화에 따른 영향을 고찰하였다. 이를 통하여 초미세먼지의 상업적인 집진에 여과집진기를 효과적으로 활용할 수 있는지에 대하여 평가하고자 한다. 본 연구에서는 상업적으로 판매되고 있는 여과포를 구매하여 사용하였으며, 통상적으로 제조사에서 판매하는 여과포 자체에 대한 기본 사양 및 특성은 제공하나, 본 연구에서는 원통형 여과백을 사용할 경우, 대상 먼지 종류, 먼지 입도 등의 변화에 따른 집진효율 및 압력손실에 미치는 영향을 추가적으로 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험실 규모의 소형 여과집진기를 제작하여, 다양한 운전 조건에 따른 집진성능 및 집진기 유지보수에 미치는 영향을 파악하기 위하여 집진실험을 수행하였다. 여기에서 제작한 실험장치의 구성, 사용한 여과백의 특성, 사용 먼지의 특성, 집진효율 및 압력손실을 계산하기 위하여 사용한 식 등 실험과 관련된 제반사항을 설명하였다.

2.1. 실험장치의 구성

여과백의 종류, 집진기로 공급되는 가스 유량, 입구 먼지 농도 등의 다양한 운전조건이 집진 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 여과 집진 장치를 제작하였으며, 그 구성도를 Fig. 1에 나타내었고, 여과 집진 장치는 크게 3부분, 공기 및 먼지 공급부, 여과 집진기 본체, 배출가스 먼지농도 측정부로 구성되어 있다. 공기 및 먼지 공급부는 집진기 본체로 공급되는 공기 유량 및 먼지 투입량을 필요에 따라 제어하는 기능을 하며, 인버터가 장착된 suction blower를 이용하여 집진기로 공급되는 공기 유량을 조절하며, 먼지 투입기(제품명: ROVO Feeder 모델명: SBseal, 제조사: (주)화인테크닉스, Korea)를 이용하여 통과 공기에 먼지를 공급하여, 여과집진기 본체로 공급되는 공기 중 먼지농도를 필요한 정도로 유지시킨다. 본 장치 설계시 기준이 되는 표준 공기 유량은 $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 이며, 최대 공기 유량 $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ 범위 내에서 실험을 수행하였다. 유입되는 공기의 습도와 온도를 측정하기 위하여 습도센서와 온도센서를 설치하였다.

여과 집진기 본체의 집진실은 가로 290 mm, 세로 160 mm, 높이가 500 mm인 육면체 하부에 깔대기 모양이 부착된 형태이며, 스테인레스 재질로 제작되었다. 집진실 내부에는 2개의 여과백이 설치되어 있으며, 표준 공기 유량 $0.2 \text{ m}^3/\text{min}$ 에서의 여과속도가 $1 \text{ m}/\text{min}$ 이하가 될 수 있도록, 직경이 95 mm, 길이가 380 mm인 원주형으로 제작하였다. 공기가 여과백을 통과할 때 발생하는 여과백 전, 후단의 압력손실을 측정하기 위하여 차압센서를 설치하였다.

배출가스 먼지농도 측정부는 여과 집진기 본체에서 정화된 후 배출되는 가스내에 미포집 먼지를 얼마나 함유하고 있는지를 측정하기 위한 것으로, 먼지농도 측정기(제품명: DUST TRAK DRX Aerosol Monitor 모델명: Model 8533, 제조사:

Fig. 1. Schematic diagram of baghouse system.

TSI, USA)를 사용하였으며, 배출되는 먼지 입도별 농도를 측정할 수 있으며, 이 농도로부터 주어진 운전조건에서의 집진효율을 계산할 수 있다.

2.2. 사용 먼지 시료 입도

본 연구에서는 반도체 제조 공정에서 배출되는 미량의 가스상 실리콘(Si) 화합물의 연소 처리 과정에서 생성되는 실리카(silica 이하 SiO_2)와 동일한 성분으로 시약용으로 판매되는 파우더,공업용으로 판매되는 파우더 및 탈황공정에서 탈황제로 투입되나 후단으로 일부 배출될 수 있는 탄산수소나트륨(sodium bicarbonate 이하 NaHCO_3) 성분으로 공업용으로 판매되는 파우더를 집진장치에 투입되는 먼지로 사용하였다. 사용한 파우더 시료의 입도분포는 건식 입도분석기(제품명: Laser Diffraction Spectrometry, 모델명: HELOS + RODOS + VIBRI, 제조사: Sympatec, Germany)를 사용하여

측정하였으며, 연구에서 사용한 실험용 먼지의 입자 크기에 대한 밀도분포와 누적분포를 Fig. 2에 나타내었다. 시약용 SiO_2 , 공업용 SiO_2 , 공업용 NaHCO_3 의 체적평균입도(volume mean diameter), 진밀도(net density) 및 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 입도 분포율은 Table 1에 나타내었으며, 이로부터 입자의 크기가 집진효율에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

Table 1. Particle size of used dust powders

Dust type	Volume mean diameter (μm)	Particle size distribution (%)					Net density (g/cm^3)
		PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	PM_4	PM_{10}	TSP	
Industrial SiO_2 powder	8.2	8.5	25.5	36.3	58.2	100	2.67
Reagent SiO_2 powder	13.6	5.1	12.1	19.2	43.9	100	2.08
Industrial NaHCO_3 powder	16	7.1	15.8	21.5	47.9	100	2.59

Fig. 2. Size distributions of dust.

Fig. 3. SEM images of the filter surface.

2.3. SEM image 이용 여과백 기공 분석

본 연구에 사용되는 여과백(제품명1: PTFE felt filter bag, 제품명2: PTFE felt with PTFE membrane filter bag, 제조사: Shanghai Lingqiao E.P.E.W. Co., Ltd, China)은 불소나 염소와 같이 부식도가 높은 산가스를 함유한 반도체 제조 공정이나 산가스 처리공정에서도 사용이 가능하도록 내화학을 가지며, 내열온도가 상대적으로 높은 PTFE 재질을 사용하였다. 여과백의 pore size를 확인하기 위하여 전자현미경(SEM)으로 촬영하였으며, Fig. 3에 그 이미지를 나타내었다. SEM image로부터 PTFE 재질의 부직포 여과백의 pore size는 약 21 μm 이며, PTFE 재질의 부직포에 PTFE membrane이 코팅된 여과백의 Pore size는 약 0.6 μm 정도로 1 μm 미만임을 확인하였다. 이러한 pore size 분석으로부터, 공극이 작은 PTFE membrane 코팅 여과백이 PTFE 부직포 여과백에 비해 집진효율이 높을 것으로 예상할 수 있다.

2.4. 먼지투입량에 대한 상관관계식

먼지 투입기를 통하여 공기로 투입되는 먼지량은 먼지특성과 먼지 투입기의 Screw 회전수에 의하여 결정되며, 대상 먼지에 대한 먼지 투입량(g/min)과 Screw 회전수(rpm)와의 상관관계식을 calibration을 통하여 얻었으며, 다음의 Table 2에 상관관계식을 요약하였다.

Table 2. Correlation between screw speed and dust feed rate.

Dust type	Dust feed rate (g/min)
Industrial NaHCO_3 powder	0.00015 * Screw speed
Reagent SiO_2 powder	0.00020 * Screw speed
Industrial SiO_2 powder	0.00070 * Screw speed

Table 3. Experimental conditions

Variables (unit)	Range
Test filter	PTFE felt, PTFE felt with PTFE membrane
Test dust	Reagent SiO_2 powder, Industrial SiO_2 powder, Industrial NaHCO_3 powder
Filtration velocity (m/min)	0.83, 1.25, 1.67, 2.08, 2.50
Filtration area (m^2)	0.24
Flow rate (m^3/min)	0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
Inlet dust concentration (g/m^3)	0.15, 0.3, 0.45, 0.6
Pulse air pressure (kgf/cm^2)	5
Pulse interval (min)	20
Pulse time (sec)	0.5

2.5. 실험 방법

본 연구에서 수행한 실험의 변수로 여과백 종류, 집진기로 공급되는 공기유량, 사용 먼지 종류, 먼지 농도 등이 있으며, 각 변수와 그 값들은 Table 3에 요약하였다. 신규 여과백을 사용한 실험에서 여과백 전후 압력손실과 집진효율이 점차 증가하는 경향을 보임에 따라, 신규 여과백설치 후 초기 실험과 일정시간이 경과한 후 정상상태에서의 실험으로 구분하여 실험을 진행하였다. 탈진에 의한 압력손실 변화 측정은 초기 실험과 정상상태 실험에서 수행하였으며, 집진효율 측정은 정상상태 실험에서 수행하였다.

2.6. 집진효율 및 압력손실 식

집진기에서의 먼지 제거 성능을 평가하기 위하여, 집진기로 공급되는 공기 유량, 먼지 투입량 및 배출가스 중 먼지 농도로부터 집진효율을 계산하며, 계산을 위하여 다음 식 (1)

을 사용하였다.

$$\eta(\%) = \frac{C_{raw} - C_{clean}}{C_{raw}} \times 100\% \quad (1)$$

여기에서, η 는 집진효율(%), C_{raw} 는 다량의 먼지가 유입되는 집진기 입구에서의 먼지 농도, C_{clean} 은 정화된 공기 속에 소량의 먼지가 함유되어 있는 집진기 출구에서의 먼지 농도이다.

여과백 전후 압력손실은 여과백 자체에 의한 압력손실과 여과백 표면에 부착된 먼지층에 의한 압력손실의 합으로 나타난다. 여과백 전후 압력손실을 검토하기 위하여 Darcy's law를 사용하였으며, 필터 자체의 압력손실은 식 (2)로, 먼지 층의 압력손실은 식 (3)으로 나타내었다.

$$\Delta P_f = k_1 V_f \quad (2)$$

$$\Delta P_d = k_2 V_f W = k_2 V_f (C V_f t) = k_2 C t V_f^2 \quad (3)$$

식 (2), (3)에서 ΔP_f 는 필터 자체의 압력손실(mmH₂O), ΔP_d 는 필터 표면에 형성된 먼지 층의 압력손실(mmH₂O), k_1 은 여과재의 저항계수(mmH₂O/(m/sec)), k_2 는 포집 먼지층의 저항계수(mmH₂O/(g/m²·sec)), W (areal dust density)는 먼지부하(g/m²), V_f 는 걸보기 여과속도(m/min), C 는 포집된 먼지 농도(g/m³), t 는 탈진 주기(min)을 나타낸다. Filter bag에서 총 압력손실은 필터 자체의 압력손실 식 (2)와 먼지 층의 압력손실 식 (3)의 합으로 정의하고 있으며, 식 (4)로 나타내었다.

$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_d = k_1 V_f + k_2 C t V_f^2 \quad (4)$$

여기서 ΔP_t 는 총 압력손실(mmH₂O)이다.¹¹⁾

3. 결과 및 고찰

소형 여과집진기를 사용하여 수행한 실험에서 얻은 결과

값으로부터, 여과백의 종류, 집진기로 공급되는 공기 유량, 먼지 종류, 먼지 농도 등의 운전조건이 여과백에서의 압력손실 및 집진효율에 미치는 영향에 대한 결과를 정리, 고찰하였다.

3.1. 여과백 종류에 따른 탈진 특성 및 압력손실

실험장치에 PTFE felt 여과백 또는 PTFE felt with PTFE membrane 여과백을 설치하여 on-line 탈진실험을 수행하여 여과백의 종류에 따른 영향을 검토하였다. 본 실험은 시약용 SiO₂ 파우더를 0.6 g/m³의 농도로 투입하고 여과속도를 2.5 m/min으로 유지시킨 상태에서 탈진 압력 5 kgf/m², 탈진 시간 0.5초, 탈진 주기 20분의 운전조건에서 on-line 탈진 실험을 수행하였으며, 먼지 투입 초기와 정상상태에 도달 시점에서의 압력손실 변화를 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 정리하였다.

Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이 먼지 투입 초기에 여과백에서의 압력손실은 PTFE felt 여과백과 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백 모두 먼지 층의 퇴적에 따라 증가하는 경향을 보였다. 먼지 투입 후 5시간까지는 PTFE membrane이 코팅된 여과백이 코팅되지 않은 여과백에 비해 약간 높은 압력손실 값을 보였으나, 5시간이 경과한 이후에는 코팅되지 않은 여과백의 압력손실이 더 커짐을 일부 보여주었다. Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이 정상상태에 도달할 경우, PTFE membrane이 코팅된 여과백에서의 압력손실이 약 36 mmH₂O 인 반면, 코팅되지 않은 여과백에서의 압력손실이 약 160 mmH₂O로 확연히 높게 나타났다. 이 결과로부터 PTFE membrane이 코팅된 여과백을 사용할 경우, 압력손실이 약 112 mmH₂O만큼 감소함을 알 수 있다. Fig. 5는 여과백 표면에 퇴적된 먼지층의 상태를 관찰하기 위하여, PTFE felt 여과백과 PTFE felt with PTFE membrane 여과백의 필터 표면을 SEM으로 촬영한 사진이다. Fig. 5(b)는 PTFE felt 여과백의 외부 표면 사진으로, 많은 양의 먼지 입자들이 부직포의 빈 공간을 막고 있는 것을 보여주며, 이로부터 PTFE felt 여과백의 경우 침층 여과 방식에 의하여 먼지를 포집함에 따라 높은 압력손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(d)는

Fig. 4. Differential pressure of PTFE felt and PTFE felt with membrane filter bag at pulse air jet cleaning system

Fig. 5. SEM images of the used filter surface.

PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백의 외부 표면 사진으로, $1\ \mu\text{m}$ 정도의 아주 작은 먼지 입자 만이 membrane 층 내부로 들어가 초기 차압 압력손실 증가를 유발하나, 대부분의 먼지들은 여과표면에서 부착과 탈락을 반복함에 따라 여과백에서의 차압 압력손실이 상대적으로 작으며, 이로부터 PTFE membrane이 코팅된 여과백에서는 표면 여과 방식으로 먼지가 포집되고 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 5(a)와 (c)는 여과백 내부 표면 사진으로 여과백 안쪽에 매우 미세한 먼지들이 부착되어 있는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 PM₁₀ 먼지들이 일부 침투한 후 정전기에 의하여 섬유에 부착되어 있는 것으로, 탈진 등의 교란에 의하여 집진장치 외부로 배출될 수 있다.

Fig. 6은 먼지를 투입한 적이 없는 새 여과포에서 여과속도 변화에 따른 PTFE felt 여과백과 PTFE membrane이 코

팅된 PTFE felt 여과백의 여과재 자체에 의하여 발생한 압력손실 측정 결과를 정리한 것이다. 앞에서 제시한 식 (2)의 상관관계에서 여과속도에 따른 여과재 자체의 압력손실 그래프에서 그 기울기가 여과재의 저항계수 k_1 이다. PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백의 저항계수는 약 $8.7\ \text{mmH}_2\text{O}/(\text{m}/\text{sec})$ 이며, PTFE felt 여과백의 저항계수는 약 $1.7\ \text{mmH}_2\text{O}/(\text{m}/\text{sec})$ 로 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백이 PTFE felt 여과백에 비해 약 $7\ \text{mmH}_2\text{O}/(\text{m}/\text{sec})$ 만큼 높은 저항계수를 갖는다. 여과재의 저항계수는 여과재 두께나 투과성과 같은 여과재의 특성에 의해 결정되는데, 실험에 사용된 PTFE felt 여과백과 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백의 두께가 약 $0.94\ \text{mm}$ 로 동일하나, 매우 얇고 기공의 크기가 작은 membrane에 의하여 그 차이가 발생된다.

시약용 SiO_2 파우더를 사용하여, PTFE felt 여과백 또는 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에서 on-line 탈진실험을 수행하여, 식 (4)에서 나타난 바와 같이 여과재와 포집 먼지층에서의 총 압력손실을 측정하였으며, 총 압력손실에서 여과재 자체의 압력손실을 뺀 포집 먼지층에 의한 압력손실을 구하였다. 포집 먼지층의 압력손실에 대한 저항계수 k_2 를 계산하기 위하여, 앞에서 제시한 식 (3)을 먼지 농도와 탈진 주기로 나누어 식 (5)로 나타내었다.

$$\Delta P_d / Ct = k_2 V_f^2 \quad (5)$$

Fig. 7은 식 (5)의 좌변인 $\Delta P_d / Ct$ 와 여과속도 V_f 의 관계를 나타낸 그림으로, 2차함수의 상수인 k_2 값을 최소자승법으로 구하였다.

Fig. 6. Differential pressure through filter media.

Fig. 7. Variations of the ratios ($\Delta P_d/(C \cdot t)$) with filtration Velocity.

여과백의 포집 먼지층 저항계수는 약 0.0038 ($\text{mmH}_2\text{O}/(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sec})$)로 PTFE felt 여과백의 포집 먼지층 저항계수가 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에 비하여 약 10배 높아, PTFE felt 여과백의 포집 먼지층에 의한 압력손실이 훨씬 크게 나타남을 확인할 수 있었으며, 이는 PTFE felt 여과백의 경우 먼지 입자가 여과재의 빈 공간 깊은 곳까지 먼지가 침투하여 채워짐에 따라 높은 압력손실이 발생하기 때문이다.

Fig. 6과 Fig. 7에 정리된 결과로부터, PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백의 코팅층의 작은 기공으로 인하여 여과재 자체의 저항계수가 큰 반면, PTFE felt 여과백의 경우 여과재의 깊은 곳까지 침투된 먼지에 의하여 포집 먼지층 저항계수가 훨씬 크게 나타남에 따라, PTFE felt 여과백의 총압력손실이 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

3.2. 운전인자에 따른 집진성능 비교

3.2.1. 여과백 및 입구농도에 따른 압력손실

여과집진기의 입구에서의 먼지농도 변화가 압력손실에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 먼지 공급기에서 투입하는 먼지

의 양을 변화시키며 실험을 수행하였다. PTFE felt 여과백 또는 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백을 여과집진기에 설치하여, 시약용 SiO_2 파우더의 농도를 0.15~0.6 g/m^3 까지 증가시키며, 여과속도를 0.83~2.5 m/min 로 변화시키며, 집진 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 토대로 여과속도에 따른 압력손실 그래프로 Fig. 8에 정리하였다.

PTFE felt 여과백과 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에서 입구 먼지농도를 4배로 증가시키면서 압력손실을 측정할 결과, 투입먼지 농도 증가에 따라 압력손실이 소폭 증가하였으나, 큰 차이는 없었다. 그러나, 두 여과백 모두에서, 여과속도 증가에 따라 압력손실은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. Fig. 8(a)와 (b)를 비교해볼 때, PTFE felt 여과백과 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에서의 압력손실 특성은 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 심층 여과가 일어나는 PTFE felt 여과백에서의 총 압력손실이 표면 여과가 일어나는 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에서의 총 압력손실에 비하여 확연히 높게 나타남을 보여주고 있다.

Fig. 8. Differential pressure through PTFE felt and PTFE felt with PTFE membrane filter at different inlet dust concentration.

3.2.2. 집진효율 특성

다양한 먼지 입도로 구성된 시약용 SiO_2 파우더를 사용하여 집진실험을 수행하여, 여과백의 종류, 입구 먼지농도, 먼지입도 및 여과속도가 집진효율에 미치는 영향을 고찰하였다. 입도별 집진효율을 Fig. 9~11에 정리하였으며, Fig. 9에는 총 부유입자 TSP, Fig. 10에는 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 입자 PM_{10} , Fig. 11에는 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 입자 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 집진효율을 정리하였다. TSP에 대한 실험결과를 보여주는 Fig. 9에서 집진효율은 모두 99.99% 이상으로 매우 높게 나타났으며, 본 실험은 off-line 탈진 조건에서 수행한 실험으로, 집진이 되고 있는 동안에는 탈진을 하지 않아, 퇴적 먼지층이 그대로 유지되면서 미세한 먼지까지 잘 포집함에 따라, 매우 높은 집진효율을 보여주고 있다. 모든 입구농도 조건에서, 두 가지 여과백 사용시 모두, 여과속도 $0.83\sim 2.1\ \text{m/min}$ 구간에서 여과속도가 증가함에 따라 집진효율이 미미하게 감소하지만, 여과속도 $2.5\ \text{m/min}$ 에서 집진효율이 크게 감소하는 것을 확인하였으며, 이는 여과속도도 과도하게 증가하는 경우 공극을 통과하는 미세 입자의 양이 많이 증가하기 때문이다. 또한 모든 입구농도 조건에서, PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백을 사용한 실험에서 PTFE felt 여과백을 사용한 실험보다 높은 집진효율을 보여주었으며, 이는 PTFE membrane의 공극의 크기가 약 $0.6\ \mu\text{m}$ 로, 공극의 크기가 약

$21.3\ \mu\text{m}$ 인 PTFE felt 여과백에 비하여 공극의 크기가 작아 미세먼지가 통과하기 어렵기 때문이다. 두 여과백의 공극의 크기 차이에 비하여 집진효율의 차이가 상대적으로 적은 것은 off-line 탈진에 의하여, 집진 중 탈진을 수행하지 않음에 따라, 퇴적 먼지층이 그대로 유지되면서, 이 퇴적층에 의한 집진이 지배적이기 때문으로 판단된다. 상기 실험에서 PTFE membrane 코팅 여부에 상관없이 두 가지 여과백 모두, 입구 먼지농도가 증가함에 따라, 집진효율이 다소 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 이는 입구 먼지농도가 증가할수록 여과백 외부 표면에 퇴적되는 먼지층의 두께가 두꺼워짐에 따라 집진성능이 개선되는 것으로 보인다. 상기 실험 중 여과속도가 가장 낮은 $0.83\ \text{m/min}$ 에서, 먼지 투입 농도가 가장 높은 $0.6\ \text{g/m}^3$ 에서, 공극의 크기가 가장 작은 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백 사용시 가장 높은 99.9997%의 집진효율을 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 실험에서 PM_{10} 에 대한 집진효율을 나타낸 것으로, PM_{10} 에 대한 집진효율이 모두 99.98% 이상으로 높게 나타났으며, TSP와 유사하거나 약간 낮은 수준이다. 실험변수에 따른 PM_{10} 에 대한 집진효율 결과는 TSP에 대한 결과와 매우 유사하여, 여과속도가 증가함에 따라 미미하게 감소하다가 여과속도 $2.5\ \text{m/min}$ 에서 급격히 감소하며, 입구농도가 증가함에 따라 집진효율이 다소 증가하며,

Fig. 9. Collection efficiency of TSP at PTFE felt and PTFE felt with PTFE membrane filter.

Fig. 10. Collection efficiency of PM_{10} at PTFE felt and PTFE felt with PTFE membrane filter.

Fig. 11. Collection efficiency of $PM_{2.5}$ at PTFE felt and PTFE felt with PTFE membrane filter.

PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에서의 집진효율이 코팅이 없는 PTFE felt 여과백에서의 집진효율이 높아지는 경향을 보이거나, 먼지 입경이 작아지는 PM_{10} 에 대한 집진효율이 TSP에 대한 집진효율보다 낮아짐을 보여준다. PM_{10} 에 대한 집진실험에서 가장 높은 집진효율은 TSP에서와 동일한 조건인 여과속도가 가장 낮은 0.83 m/min에서, 먼지 투입 농도가 가장 높은 0.6 g/m³에서, 공극의 크기가 가장 작은 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백 사용시에 99.9994%로 나타났다.

Fig. 11은 Fig. 9와 동일한 실험에서 $PM_{2.5}$ 에 대한 집진효율을 나타낸 것으로, $PM_{2.5}$ 에 대한 집진효율이 모두 99.94% 이상으로 나타났으며, TSP 및 PM_{10} 에 비하여 낮아졌다. 실험변수에 따른 $PM_{2.5}$ 에 대한 집진효율 결과는 TSP 및 PM_{10} 에 대한 결과와 유사하여, 여과속도가 증가함에 따라 미미하게 감소하다가 여과속도 2.5 m/min에서 급격히 감소하며, 입구농도가 증가함에 따라 집진효율이 다소 증가하며, PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에서의 집진효율이 코팅이 없는 PTFE felt 여과백에서의 집진효율이 높아지는 경향을 보이거나, 먼지 입경이 더 작아지는 $PM_{2.5}$ 에 대한 집진효율은 TSP와 PM_{10} 에 대한 집진효율보다 더 낮아짐을 보여준다. $PM_{2.5}$ 에 대한 집진실험에서 가장 높은 집진효율은 TSP와 PM_{10} 에서와 동일한 조건인 여과속도가 가장 낮은 0.83 m/min에서, 먼지 투입 농도가 가장 높은 0.6 g/m³에서, 공극의 크기가 가장 작은 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백 사용시에 99.9978%로 나타났다.

상기 결과로부터 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백을 사용하고, 적정 운전조건을 유지할 경우, 초미세먼지인 $PM_{2.5}$ 에 대한 집진효율을 99.99% 이상으로 유지할 수 있음을 보여주었으며, 이는 여과포를 이용한 건식집진도 초미세먼지에 대해 충분히 높은 집진성능을 달성할 수 있으므로, 초미세먼지 집진의 상업적인 적용을 위하여 여과집진기를 사용할 수 있음을 확인하였다.

상기한 Fig. 12는 PTFE felt 여과백과 PTFE membrane이

코팅된 PTFE felt 여과백을 사용하였을 때, 여과속도에 따른 집진효율의 변화를 먼지 입도별로 나타낸 그래프이다. 두 가지 여과포 모두에서 먼지 입자 크기가 TSP에서 PM_{10} , PM_4 , $PM_{2.5}$, PM_1 으로 감소함에 따라 집진효율이 감소하며, 입자 크기 감소에 따른 집진효율의 감소폭이 더 두드러지게 나타나고 있다. 이는 입자 크기가 작아질수록, 보다 많은 양의 먼지가 여과백 내부로 침투한 후 통과하게 되며, 이에 따라 여과포에서의 포집이 더욱 어려워짐을 보여주고 있다. 두 가지 여과포 중 먼지 입경 감소에 따른 집진효율의 감소가 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백에 비하여 PTFE felt 여과백에서 더 커지는 것을 보여 주고 있으며, 이는 초미세먼지의 집진을 위하여 pore 크기가 작은 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백을 사용하는 것이 보다 바람직함을 보여주고 있다.

3.3. 먼지 종류에 따른 여과성능 실험

입도분포가 유사하나 조금은 다른 입도분포를 보여주는 Fig. 2와 평균입경의 크기를 정리한 Table 1에 나타난 3종의 먼지에 대한 집진실험을 입구 먼지농도 0.15 g/m³, 집진기로 공급되는 유량 0.6 m³/min에서 PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백을 사용하여 수행하였다. 먼지종류에 따른 여과포에서의 압력손실은 Fig. 13에, 먼지종류 및 입도에 따른 집진효율을 Fig. 14에 정리하였다.

PTFE membrane이 코팅된 PTFE felt 여과백을 사용한 경우, 먼지 종류에 따른 압력손실은 Fig. 13에서 보여주는 것과 같이 유사하게 나타났으며, 이는 3종의 먼지의 평균입경이 8.2 μ m, 13.6 μ m, 16 μ m로 다소 차이가 있으나, 표면 여과에 의한 집진으로 인하여 먼지 종류 및 입도에 따른 차이가 상대적으로 적게 나타나기 때문이다.

반면에 먼지 종류 또는 먼지 입도에 따른 집진효율의 변화는 Fig. 14에 나타난 것과 같이 보다 더 두드러지게 나타난다. 먼지 입경이 작은 PM_1 에 비하여 $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP로 입경이 증가함에 따라 집진효율이 증가하며, 동일한 입경에

Fig. 12. Effects of particle size and filter bag type to collection efficiency.

Fig. 13. Differential pressure through PTFE membrane coated filter bag for different dust powders.

Fig. 14. Collection efficiency of different dust powders at PTFE membrane coated filter bag.

대한 집진효율은 평균입경이 8.2 μm인 공업용 쥘리카 파우더, 13.6 μm인 시약용 쥘리카 파우더, 16 μm인 공업용 탄산수소나트륨 파우더로 평균입도가 커질수록 집진효율이 증가함을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구는 대형화가 상대적으로 용이한 여과집진기를 초미세먼지의 상업적인 집진에 활용할 수 있는가에 대한 가능성을 평가하기 위한 것으로, PTFE membrane이 코팅되거나, 코팅되지 않은 여과백을 설치한 집진 실험장치에서 3종의 먼지를 투입하며 다양한 운전조건에서 실험을 수행하여

다음과 같은 결론을 얻었다.

여과백에서 on-line 탈진시 발생하는 압력손실은 여과포 자체에 의한 압력손실과 여과포 표면 퇴적 먼지층에 의한 압력손실의 합으로 나타난다. 여과포에 membrane 코팅 유무에 따른 영향을 검토한 결과, 기공이 작은 membrane이 코팅된 여과백의 자체 압력손실은 코팅이 안된 여과백에 비하여 더 높게 발생하였으며, 이에 따라 membrane이 코팅된 여과백의 자체 저항계수는 코팅되지 않은 여과백보다 높은 값을 갖는다. 퇴적 먼지층에 의한 압력손실을 나타내는 포집 먼지층 저항계수는 membrane이 코팅된 여과백에서 코팅되지 않은 여과백에 비하여 약 10배 낮은 값을 보여주며, 이는 퇴적 먼지층에 의한 압력손실은 표면여과가 일어나는 membrane 코팅 여과백에서 심층여과가 일어나는 코팅 안된 여과백에서 보다 훨씬 낮다는 것을 의미한다. 총 압력손실은 membrane이 코팅된 여과백에서 코팅되지 않은 여과백보다 낮게 나타났으며, 이 낮은 압력손실로 인하여, membrane 코팅 여과백을 사용할 때 동력비가 적게 소요되며, 보다 안정적인 운전이 가능하다.

여과백에서의 집진효율은 PM_{2.5}, PM₁₀, TSP 순으로 입도가 큰 먼지일수록 높아진다. 여과속도가 증가함에 따라 집진효율이 미미하게 감소하다가 여과속도가 과도하게 높아질 때 집진효율이 급격히 감소하므로, 적정 집진효율 유지를 위하여 적절한 여과속도를 유지하여야 한다. 입구 먼지농도가 증가할 경우, 퇴적된 먼지층에 의한 추가 집진으로 인하여 집진효율이 다소 증가한다. 기공이 작은 membrane이 코팅된 여과백에서의 집진효율은 코팅되지 않은 여과백에 비하여 집진효율이 높아진다. PTFE membrane이 코팅된 여과백을 사용하고, 적정 운전조건을 유지할 경우, 초미세먼지인 PM_{2.5}에 대한 집진효율을 99.99% 이상으로 유지할 수 있었으며, 이는 여과포를 이용한 건식집진에서도 초미세먼지에 대하여 충분히 높은 집진효율을 달성할 수 있어, 상업적인 적용이 가능한 것으로 판단된다.

PTFE membrane이 코팅된 여과백 사용시, 먼지의 입도 변화에 의한 압력손실의 변화는 상대적으로 작으나, 작은 입도 변화에도 집진효율의 변화는 뚜렷하게 나타나며, 평균 입도가 큰 먼지에서 집진효율이 높게 나타난다.

Acknowledgement

본 연구는 Non-CO₂ 온실가스저감기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호 2013001690015).

KSEE

References

- Lim, Y. B., Lee, S. B., Kim, H., Kim, J. Y. and Bae, G. N., "Review of Recent Smog Chamber Studies for Secondary Organic Aerosol," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **32**(2),

- 131~157(2016).
2. Kim, H. G., Kim, H. J., Lee, M. H. and Kim, J. H., "Experimental study on the enhancement of particle removal efficiency in spray tower scrubber using electrospray," *Asian J. Atmos. Environ.*, **8**(2), 89~95(2014).
3. Ryu, J. Y., Suh, J. M., Park, J. H., Jeon, B. K., Choi, K. C. and Son, Y. I., "Study on Filter Drag Due to the Change of Operation Conditions in a Pulse Air Jet-type Bag Filter[1]," *The Korean Environ. Sci. Soc.*, **16**(4), 449~458(2007).
4. Kim, H. J., Kim J. H. and Kim, J. H., "Evaluation of Particle Collection Efficiency in a Wet Electrostatic Precipitator Using an Electrosprayed Discharge Electrode," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**(6), 530~537(2015).
5. Piao, C. X., Kim, T. H., Li, X. Y., Ha, H. C. and Jung, J. H., "Experimental study on the optimum pulse jet cleaning conditions of a rectangular bag-filter system," *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, **18**(3), 189~203(2008).
6. O, W. C., "Special Feature : Recent Trends in Filtration Technology in Industrial Dust Collection Systems - PTFE membrane filter bag technology trends in incinerators," *Air Clean. Technol.*, **25**(3), 1~7(2012).
7. Lee, C. W., "Special Feature : Fabrication technology of high performance air filter for air purification - High performance filter characteristics using PTFE membrane composite laminating technology," *Air Clean. Technol.*, **26**(4), 21~25(2013)
8. Yeo, S. Y., Kim, S. R. and Jeong, S. H., "Filtration Performance and physical Properties of Bag Filter Media with Polytetrafluoroethylene Coating Treatments," *Textile Sci. and Eng.*, **42**(5), 329~335(2005).
9. Jiang, D., Zhang, W., Liu, J., Geng, W. and Ren, Z., "Filtration and regeneration behavior of polytetrafluoroethylene membrane for dusty gas treatment," *Korean J. Chem. Eng.*, **25**(4), 744~753(2008).
10. Liu, J., Pui, D. Y. and Wang, J., "Removal of airborne nanoparticle by membrane coated filters," *Elsevier Sci. B. V., Amsterdam.*, **409**(22), 4868~4874(2011).
11. Cooper, C. D. and Alley, F. C., "Air pollution control: a design approach, second ed., Waveland Press, Inc., Long Grove, pp. 182~185(2002).