

소결금속섬유필터의 기초 성능 특성

박영옥[†] · 김상도 · 서정민 · 박석주 · 최호경 · 박현설 · 임정환 · 손재익

한국에너지기술연구원 에너지환경연구부
(2001년 4월 20일 접수, 2001년 5월 26일 채택)

Basic Filtration Characteristics of Sintered Metal Fiber Filter

Young-Ok Park[†], Sang-Do Kim, Jeong-Min Seo, Sang-Do Kim, Seok-Ju Park,
Ho-Kyoung Choi, Hyun-Sul Park, Jeong-Hwan Lim and Jae-Ek Son

Energy and Environmental Research Department, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea
(Received 20 April 2001; accepted 26 May 2001)

요 약

소결금속섬유필터에 대한 압력손실, 먼지통과율, 부분집진효율 등의 기초 여과성능특성을 수행하였다. 두 종류의 필터가 적용되었고, 두 필터의 공극률 및 두께는 동일하고, 통기도와 여과정밀도는 다른 물리적 특성을 가지고 있다. 기초성능특성은 300×300 mm 크기의 필터를 실험할 수 있는 필터성능실험장치를 가지고 조사하였다. 시험용 먼지로는 AC fine dust가 사용되었다. 압력손실은 여과속도와 먼지부하가 증가함에 따라 증가하였다. 먼지층 형성 초기 단계에는 여과포의 공극내에서 단일섬유 주위에 먼지입자가 응집되어 수지상 형태로 부착형성되었고, 먼지부하가 증가하여 가교형성에 의해 먼지층 형성이 진행된다. 균일먼지층 형성단계는 먼지부하가 계속 증가하여 먼지층 형성에 의해 여과포의 공극이 완전히 채워지고, 여과포 전체표면에 먼지층이 일정하게 포집되는 단계로 진행되었다. 먼지통과율은 먼지부하 초기단계에는 여과속도 증가에 따라 급격하게 증가하였고, 먼지부하가 증가함에 따라 급격하게 감소하였다. 압력손실 및 먼지통과율은 먼지부하 및 여과속도와 같은 운전변수로 상관관계식을 도출하였다. 상관관계식으로부터 계산된 압력손실 및 먼지통과율은 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 부분집진효율은 먼지부하에 따라 증가하였다.

Abstract – Basic filtration characteristics including pressure drop, penetration and fractional collection efficiency were investigated for sintered metal fiber filters. Two filters were applied. It was found that the porosity, weight and thickness were same, the air permeability and filtering accuracy were different. The performance test of fabric filter was investigated using a flat sheet filter testing unit, which can be applied to the filter of 300×300 mm size. The test dust was AC Fine Dust. The pressure drop increased with filtration velocity and dust loading. The initial stage of dust cake formation was a growing process of particle dendrites on a single filament in the pore and the second stage was a bridge formation process with increasing dust loading. The final stage was a process of constant deposition of dust on a fabric surface under heavy dust loading conditions. The penetration sharply increased with filtration velocity in the initial stage of dust loading. It sharply decreased with dust loading, but the rate of decrease gradually diminished under heavy dust loading conditions. The pressure drop and penetration have been correlated in terms of operating variables such as dust loading and filtration velocity. The pressure drop and penetration calculated from the correlation equation have been compared with the experimental data and the agreement between the two data was fairly good. The fractional collection efficiency increased with dust loading.

Key words: Sintered Metal Fiber Filter, Penetration, Fractional Collection Efficiency, Pressure Drop

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 산업활동에 수반되어 발생하는 대기오염물질의 배출량이 증가하였으며 종류도 다양해지고 있다. 특히, 산업의 발전과 더불어 대기중으로 배출되는 먼지의 배출량이 증가하여 대기중에 부유하는 입자상물질은 더욱더 증가할 것으로 예상되어 심각한 대기오염

문제로 대두되고 있다. 대기오염물질을 저감시키기 위하여 여과의 방법이 가장 널리 사용되고 있으며, 그 제질로는 개발 초기에는 먼 또는 양모 등의 천연섬유를 소재로 한 여과재가 주로 사용되었으나 인조섬유의 발명으로 새로운 합성섬유를 바탕으로 한 여과재의 개발이 많이 이루어졌다. 이와 같은 필터는 제조공정이 간단하고 원가가 저렴한 장점이 있으나 폐기과정에서 산업쓰레기 공해로서 문제가 발생되고 있다. 이에 따라 종래의 일반 합성섬유 여과재에 비해 내산성, 내알칼리성, 내열성이 우수할 뿐만 아니라 역세(back wash)에 의하여 재사용이 가능

[†]E-mail: yopark@kier.re.kr

한 금속섬유필터가 점차 각광을 받고 있다.

금속섬유필터는 재료의 형태에 따라 소결분말금속필터(sintered powder metal filter), 금속선메시필터(metal wire mesh filter), 소결금속섬유필터(sintered metal fiber filter) 등으로 구분할 수 있다[1].

소결분말금속필터는 다공성 조절을 위하여 균일한 크기의 구형분말이 사용되고 있으며, 필터의 특성에 따라 분말을 프레스에 의해 성형하거나 또는 금형에 가압하지 않은 상태에서 소결하여 필터를 제조한다. 금속선메시필터는 금속선을 일정한 형태로 직조한 메시를 이용한 필터로서 특성에 따라 메시의 크기가 다르거나 직조방법이 다른 메시를 여러 겹 겹쳐서 사용한다. 소결금속섬유필터는 직경 5-30 μm 인 금속섬유를 사용하여 매트 형태로 성형한 후 이를 소결 및 압연공정에 의해 여과재로 제조한 것이다. 이는 섬유가 일정한 방향성 없이 무질서하게 배열되어 있으며, 기체 혹은 액체 등의 유체가 지그-재그 형태의 경로로 필터를 통과하면서 고체 입자를 여과하는 depth type filter이다. 금속섬유필터의 재료로는 스테인레스강이 일반적으로 사용되고 있으며, 그 외에도 니켈, 티타늄, Inconel, Hastelloy 등이 사용된다. 제조된 금속섬유필터는 재료에 따라 기공도가 최소 30%에서 90%까지 광범위하게 조절되는데, 예로 소결분말금속필터의 경우에는 기공도가 30-40%, 금속선메시필터의 경우 기공도가 50-60%, 소결금속섬유필터의 경우에는 기공도가 70-90%이다. 기공도가 클수록 필터의 저항이 낮아 압력손실이 낮으므로 소결금속섬유필터가 많이 사용되고 있다.

그러나, 지금까지의 일반적인 합성섬유의 필터의 기초적인 포집효율 특성에 대해서는 많은 연구결과가 이루어졌고 보고되었지만[2-5], 금속섬유필터의 기초 포집효율 특성에 대해서는 기초 성능연구가 미비한 편이다.

그 동안의 연구결과에 의하면, 금속선메시필터와 소결금속필터의 구조적인 차이점을 알아보기 위하여 공극률, 통기도, 기공크기분포, 필터 효율, 불순물포집능력 등을 비교·분석하였고[6], 소결금속섬유필터 단면의 섬유수가 증가할수록 공극률 및 통기도 변화, 기공크기 변화 등을 관찰하였는데, 단면의 섬유수가 증가할수록 공극률 및 기공크기는 크게 변화가 없었고, 통기도는 크게 감소하는 것으로 나타났다[7].

본 연구에서는 소결금속섬유필터의 기초 여과성능 특성을 알아보기 위하여 기초 성능실험장치를 가지고 여과속도와 먼지부하량의 변화에 따른 압력손실, 먼지통과율, 부분집진효율의 특성을 알아보고, 여과속도와 먼지부하량이 압력손실 및 먼지통과율에 미치는 상관관계를 고찰하여, 실제 산업체에 설치될 필터의 운전조건 및 설계에 필요한 자료를 제공할 것으로 사료된다.

2. 이 론

2-1. 압력손실

청정 필터의 압력손실은 먼지 퇴적층에 의한 압력손실에 비하여 아주 낮아 문제가 되지 않지만, 압력손실이 비교적 높은 필터는 필터조직이 조밀하여 먼지입자들이 필터의 공극을 막는 현상이 발생하기 쉽다. 이로 인하여 동일한 먼지부하에 대하여 필터 조직이 조밀하지 않고 엉성하게 직조된 필터에 비하여 필터 조직이 조밀한 필터에서는 높은 압력손실이 발생한다. 일반적으로 필터와 먼지 퇴적층을 통과하는 기체는 느린 유속으로 먼지 퇴적층을 구성하는 먼지입자와 입자와 필터사이의 공극을 통과하게 되므로 층류로 된다. 이때 발생하는 압력손실은 통과하는 기체의 유속 혹은 유량에 비례하여 증가한다.

청정 필터에 먼지가 함유되지 않은 기체가 통과할 경우, 이 때 발생하는 압력손실은 직접적으로 여과속도에 비례하므로 Darcy의 법칙에 의거하여 Billing과 Wilder[8]는 다음과 같이 나타내었다.

$$\Delta P_f = K_1 V \quad (1)$$

K_1 은 처리기체의 점도와 필터의 특성, 즉 필터의 두께와 공극률의 합

수이며 실제 필터 집진장치에서 필터 자체에 의한 압력손실이 전체 압력손실의 10% 이하인 경우에는 무시한다[8].

Williams 등[9]과 Matteson과 Orr[10]는 필터 위에 퇴적된 먼지층에 의해 발생하는 압력손실은 여과속도 및 먼지부하와 관련하여 상수인 비저항계수로 취급하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\Delta P_d = K_2 V W \quad (2)$$

필터와 필터 위에 퇴적된 먼지층을 통과할 때 발생하는 전체 압력손실은 식 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_t = \Delta P_f + \Delta P_d = K_1 V + K_2 V W \quad (3)$$

비저항계수는 실험에 의해서 결정되며, 이 값은 필터 집진장치를 설치하기 위해 중요한 설계자료로써 여과속도와 먼지부하와 관련하여 탈진시간 및 탈진간격의 결정에 필요한 중요한 인자이며, 압력손실을 예측하기 위해 필요하다.

2-2. 먼지층의 형성

함진기체에 포함된 먼지를 필터에 의해 포집할 때 압력손실과 포집효율은 여과시간이 경과함에 따라 증가함을 실험적으로 입증한 바 있다[11-13]. 이러한 현상은 필터 섬유표면에 먼지층이 형성되어 먼지층에 의한 포집이 지배적으로 이루어지기 때문이다. 그러나 필터 표면에 형성된 수직상구조를 형성하는 먼지 입자수와 크기 및 형태가 시간과 장소에 따라 변하기 때문에 포집효율에 미치는 퇴적된 먼지입자들의 영향을 예측할 수가 없었다. Payatakes 등[14-15]은 먼지입자가 단일 섬유표면에 직접차단에 의한 포집이 지배적인 영역에서 미분방정식 해법을 이용하여 먼지입자가 수직상으로 형성되는 성장과정에 대한 결정론적 표현식을 개발하였다. Wang 등[16]은 필터에 의한 먼지포집에서 먼지포집 과정이 무작위하다고 가정하여 단일 섬유형상이 구형이고 2차원적 원통형상인 단일 섬유주위에 먼지입자의 수직상 형성의 성장과정을 모사하였다.

단일 섬유 표면에서 먼지입자들이 관성충돌과 직접차단에 의해 포집되어 먼지입자들의 부착 형성과정이 수직상 형태로 성장하면서 필터의 공극을 막히게 한다. 이와 같이 먼지입자들의 부착상태가 수직상 형태로 성장이 계속되면서 필터의 섬유와 섬유사이에 먼지층을 형성하게 된다. 이와 같은 먼지층의 형성을 가교형성이라고 하며, 함진기체에 함유된 먼지를 필터에 의한 포집에서 필터 표면 위에서 가교형성이 되는데 소요되는 시간은 짧으며 입구 먼지농도에 따라 좌우된다.

2-3. 먼지통과율

여과포에 의한 먼지입자의 초기 포집 메카니즘은 직포와 부직포에 따라 다르게 나타난다. 즉 직포에서는 pore 사이의 단일섬유에 먼지입자가 부착하여 가교를 형성하여 먼지층이 형성되어 포집효율을 상승시킨다. 부직포는 단일섬유에 입자가 부착하여 먼지층이 성장하는데 여과포 내부에 먼지입자가 침입하게 되는 내부여과의 경향이 있다. 그러므로 여과포에 의한 먼지입자 포집 초기에는 관성충돌, 직접차단 및 확산의 3종류의 중요한 포집 메카니즘의 작용이 있다고 생각되며, 이밖에 정전기력 및 중력침강의 영향도 작용할 경우도 있다.

단일섬유에 먼지층이 형성되었을 경우 단일섬유에 의해 먼지입자가 포집되는 메카니즘은 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\eta_f = \frac{S_w}{D_{fm}} \quad (4)$$

이때 D_{fm} 은 먼지층이 형성되었을 경우 겉보기 섬유 대표직경이고, S_w 은 D_{fm} 에 의해 먼지를 포집하는 함진기체의 흐름폭이다.

단위부피당 섬유의 길이를 l 이라고 하면 섬유층전층의 미소두께 dL_f

에 있어서 함진기류내의 먼지농도변화 dC_d 는 다음처럼 나타낼 수 있다.

$$-\frac{dC}{dL_f} = C_d S_w / l = C_d D_{fm} \eta_f / l \quad (5)$$

먼지부하가 낮은 경우에 있어서는 D_{fm} 의 변화가 적지만, 일단 D_{fm} 의 변화가 먼지부하에 의한 포집효율의 증가분 $\Delta\eta_f$ 이 포함된다고 고려하여 식을 다음처럼 표현할 수 있다.

$$-\frac{dC}{dL_f} = C_d D_f (\eta_{fo} + \Delta\eta_f) / l \quad (6)$$

$L_f=0$ 이면 $C_d=C_i$, $L_f=L_f$ 이면 $C_d=C_o$ 의 경계조건을 적용하여 먼지층이 단일섬유 주위에 형성되었을 경우 먼지층에 의한 단일섬유와 포집효율 증가분 $\Delta\eta_f$ 는 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\Delta\eta_f = \frac{\pi D_f}{4(1-\epsilon_f)L_f} \left\{ 2.303 \log \frac{(1-E_o)}{(1-E)} \right\} \quad (7)$$

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험용 필터

금속섬유필터를 제조하기 위해서는 우선 원재료인 섬유를 제조해야 한다. 스테인레스 섬유를 제조하기 위하여 만들어진 복합관은 내부에 스테인레스강 선재가 다발(bundle) 형태로 구성되어 있으며, 각각의 스테인레스강 선재는 탄소강 외피로 둘러 쌓여 있다. 금속선을 양쪽으로 잡아당기는 인발 공정에 의해 복합관의 단면이 감소함에 따라 스테인

레스강 선재의 직경이 감소하게 되며, 목표로 하는 인발공정 후 부식액을 사용하여 탄소강 외피를 제거하게 되면 기본적인 금속섬유의 제조가 완료되며, 이때 제조된 금속 fiber의 직경은 5-30 μm 가 된다. 인발공정을 거쳐 제조된 형태를 tow라하며, 이를 솜처럼 뭉쳐놓은 것을 sliver라고 한다. 이처럼 제조된 금속섬유를 필터로 제조하기 위해서 웹 상태로 가공해야만 한다. 웹은 강섬유를 적당한 길이로 절단하여 개집 공정을 거쳐 스펀지 형태의 면상으로 가공한 것이다. 보통 웹은 유연하고 가벼우므로 본래 스테인레스강의 우수한 성질을 응용하여 고온단열재, 소음재, 필터의 중간재료 이용할 수 있다. 이와 같은 면상의 웹을 압축하여 필터로서의 균일한 통기성 및 상품성을 확보하기 위하여 카렌더링이라는 공정을 거쳐서 최종 필터 재료로 제조된다. 이때 면상의 웹층을 1,000-1,300 $^{\circ}\text{C}$ 의 고온에서 압축 소결하게 되면 소결금속섬유필터의 제조가 완료된다.

본 실험에서는 B사에서 제조한 두 종류의 소결금속섬유필터를 가지고 기초성능실험을 실시하였다. Fig. 1은 두 종류의 소결금속섬유필터의 직조형태 및 단일섬유의 형상을 나타낸 것이다. 필터의 재질은 SUS 316L로 되어 있으며, 섬유의 직경은 5-10 μm 정도이다. Table 1은 각 필터의 물리적 성질을 나타내었는데, 필터의 두께, 중량, 공극률은 동일하며, 필터정밀도 및 통기도는 SMF-2가 더 크다. 필터정밀도는 필터를 통과하는 최대 glass bead의 크기를 기준한 것으로 동일 공극률을 갖고 있더라도 공극을 통과하는 입자크기가 작아지게 되면 더 많은 저항을 갖게 되며, 따라서 통기도는 작아지게 된다. 반대로 공극을 통과하는 입자크기가 커지면 적은 저항을 갖게 되며, 통기도는 커지게 된다.

3-2. 실험용 먼지

본 실험에 사용된 먼지종류는 Arizona Test Dust(AC Fine Dust)로써 일반적으로 필터의 기초성능 평가실험에 많이 이용되고 있으며, 입자크기는 1-80 μm 까지 다양하게 분포되어 있고, 평균입자크기는 9.046 μm 이다. Table 2는 AC Fin dust의 화학적 조성분포를 나타낸 것이며, Fig. 2는 실험용 먼지의 형상을 보여주고 있다.

3-3. 실험장치 및 방법

실험용먼지는 고온건조기에서 110 $^{\circ}\text{C}$ 로 12시간 동안 가열건조한 후 상온건조기 내에서 실험실내의 온도와 같도록 24시간 냉각하여 사용하였다.

Table 1. Physical characteristics of test fabrics

Physical characteristics	SMF-1	SMF-2
Filtering accuracy(μm)* ¹	5	7
Mean air permeability ($\text{l}/\text{dm}^2/\text{min}$ at 200 Pa)	27	45
Thickness(mm)	0.40	0.40
Weight(g/m^2)	900	900
Porosity(%)	72	72

*¹Maximum glass bead particle passed through the filter media

Table 2. Composition of test dust

Chemical	Percentage of mass
SiO ₂	68-76
Al ₂ O ₃	10-15
Fe ₂ O ₃	2-5
Na ₂ O	2-4
CaO	2-5
MgO	1-2
TiO ₂	0.5-1
K ₂ O	2-5

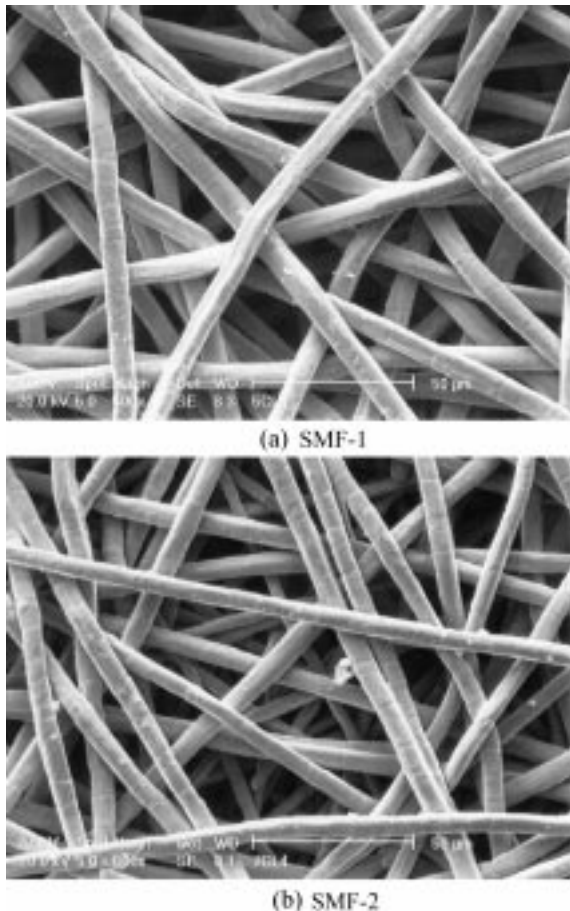


Fig. 1. SEM photograph of sintered metal fiber filter.

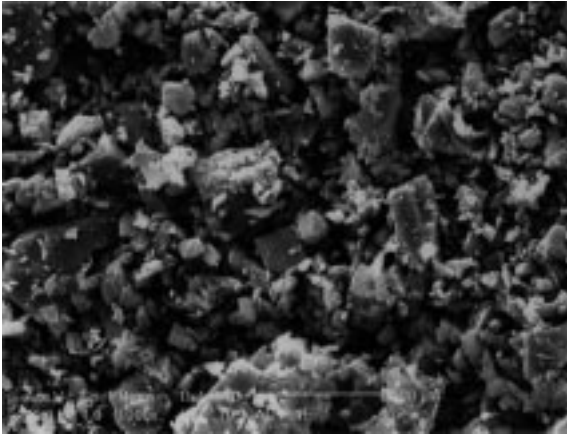


Fig. 2. SEM photograph of AC Fine Dust(1,000×).

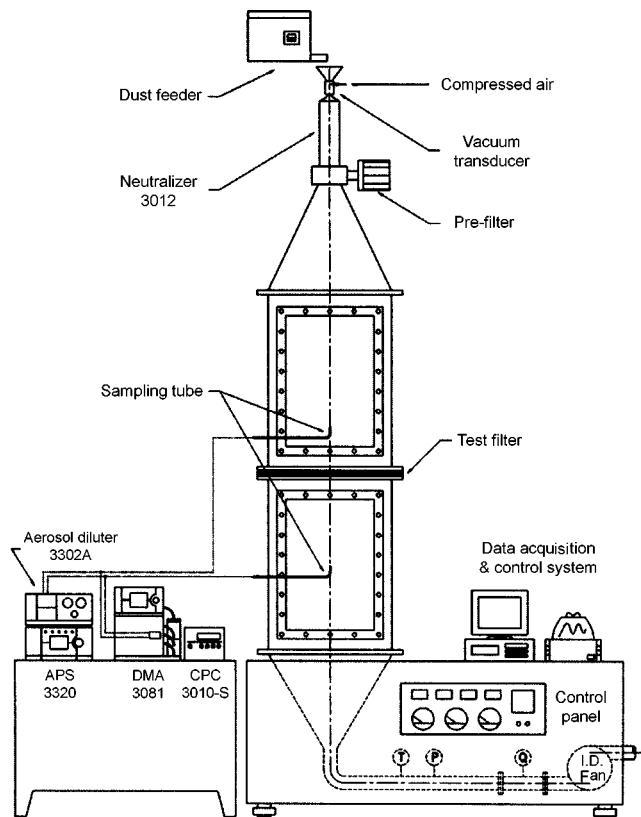


Fig. 3. Schematic diagram of flat sheet filter testing unit.

소결금속섬유필터의 포집효율 특성을 측정하기 위한 실험장치로 Fig. 3과 같은 기초성능실험장치가 사용되었다. 본 장치는 필터의 기초적인 성능을 평가하기 위하여 필터의 초기 집진효율, 초기압력손실, 먼지부하조건에서의 압력손실, 먼지 통과율 등을 측정할 수 있다.

기초성능실험장치를 간단히 설명하면, 고정밀도의 먼지 공급기에서 발생된 먼지는 분산기를 거쳐 입자중화기(Kr-85 Aerosol Neutralizer, TSI, Model 3012)를 통과하게 된다. 입자중화기는 마찰대전 등으로 발생되는 먼지입자의 전하량을 제거하여 이로 인한 먼지입자의 손실을 줄이고, 보다 안정된 조건에서 실험이 가능하도록 한다. 중화기를 통과한 먼지입자는 확산부를 거쳐 실험용 여과포에서 대부분 포집된다. 실험에 사용된 여과포의 크기는 300×300 mm이고, 여과포의 포집효율을 구하기 위하여 입·출구 먼지농도를 Aerodynamic Particle Sizer(TSI, Model

Table 3. Experimental conditions

Filtration velocity	1-5 m/min
Inlet dust feed rate	1.0 g/m ³ (0 °C, 760 mmHg)
Filtration area	0.09 m ²
Dust loading	1-200 g/m ²

3310A)를 이용해 측정하였고, 필터 전·후의 압력손실을 측정하기 위하여 차압센서가 부착되어 있다. 실험에 사용된 운전범위는 Table 3과 같다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 압력손실

필터에 의하여 먼지가 포집되어 필터 위에 먼지층이 형성되면 압력손실이 증가하게 되므로 집진 조작을 중지하고 퇴적된 먼지층을 필터에서 털어 내는 탈진을 하게 되는데, 산업체에 운전되고 있는 여과집진장치의 경우 평균 150 mmH₂O 정도로 운전되고 있다. 압력손실이 150 mmH₂O 이상에서는 필터의 강도저하와 눈막힘(pore blinding) 현상이 발생하여 송풍기의 소요 동력이 많이 소요되며, 이를 방지하기 위해서는 필터 위에 퇴적된 먼지층에 의한 압력손실이 여과속도 및 먼지부하의 변화에 따른 실험결과를 토대로 예측할 필요가 있다.

4-1-1. 여과속도의 영향

통기도는 필터매체에 의한 공기의 흐름저항의 역수로 표현된다. 따라서 높은 통기도는 공기의 흐름 저항이 낮음을 의미하며, 낮은 통기도는 공기의 흐름 저항이 높다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 먼지를 투입하지 않은 청정 소결금속섬유필터의 경우에 있어 여과속도의 변화에 따른 압력손실을 나타낸 것이다. 여과속도가 증가함에 따라 압력손실도 직선적으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. Table 1의 통기도에서 볼 수 있듯이 SMF-1의 경우 27 l/dm²/min이고, SMF-2의 경우 45 l/dm²/min로 SMF-2의 공기 흐름저항이 SMF-1에 비하여 작기 때문에 압력손실이 더 작게 나타난다는 것을 예측할 수 있다.

4-1-2. 먼지부하량의 영향

Noll[17] 등과 Spaite[18] 등은 여과포의 직조방식에 따른 성능실험결과에 의하면 먼지층형성 초기단계에서는 먼지포집이 진행되면서 여과포의 pore내에서 단일섬유 주위에 먼지입자가 응집되어 수지상 형태로 부착형성되고, 먼지부하가 증가하면 먼지입자의 응집에 의한 가교가 형성되기 때문에 압력손실이 급격히 증가하다가 어느 정도의 먼지층이 형성되면 압력손실이 일정하게 증가한다고 보고한 바 있다.

Fig. 5는 여과속도의 변화와 먼지부하의 증가에 따른 압력손실의 변화를 나타낸 것이다. 먼지부하가 증가함에 따라 압력손실 증가 기울기는 여과속도가 느린 경우에는 크게 증가하지 않았으나, 여과속도가 증가하

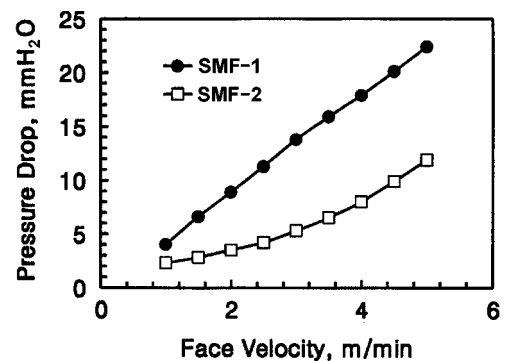


Fig. 4. Pressure drop vs. face velocity.

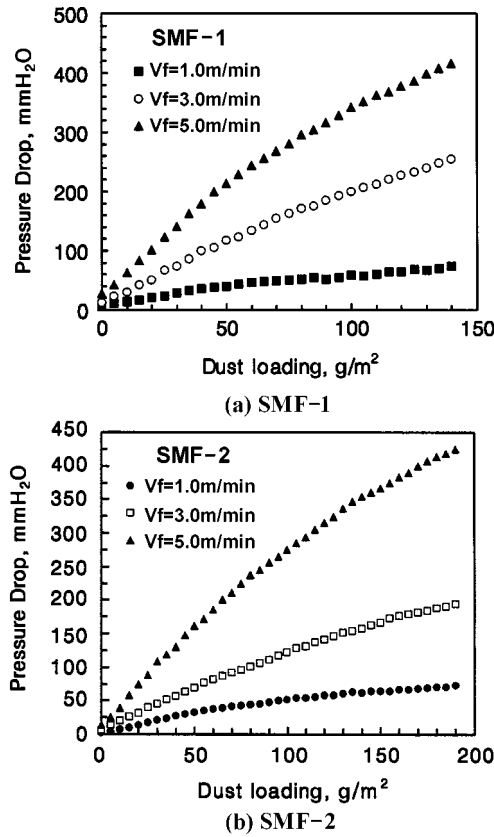


Fig. 5. Effects of dust loading on the pressure drop at different face velocity.

먼서 크게 증가하였다. 또한 먼지층의 형성에 의한 수지상 형성 및 입자의 가교 형성이 진행되는 초기단계에서는 여과속도의 증가에 따라 압력손실 증가 기울기가 크게 증가하였으며, 먼지부하가 증가함에 따라 점차적으로 증가기울기가 감소하였다. SMF-1의 경우 초기 먼지층형성 단계는 40 g/m^2 이하로 추정되며, SMF-2의 경우 초기 먼지층형성단계는 60 g/m^2 이하로 추정된다. 이 이상의 먼지부하 조건에서 균일 먼지층 형성단계로 추정되며, 이 이상의 먼지부하 조건에서 SMF-1은 여과속도 3-5 m/min 범위에서 압력손실 증가 기울기가 거의 비슷하게 나타났다. SMF-2의 경우에는 여과속도가 커질수록 균일 먼지층 형성 이상 범위에서의 압력손실 증가기울기는 더 커지는 것으로 나타났다. SMF-1의 경우 여과속도가 1 m/min에서는 $0-140 \text{ g/m}^2$ 범위까지 증가하는데 압력손실은 $5-74 \text{ mmH}_2\text{O}$ 까지 증가하였으며, 여과속도가 5 m/min일 경우에는 $28-417 \text{ g/m}^2$ 로 크게 증가하였다. SMF-2에 있어서는 여과속도가 1 m/

min인 경우 $0-140 \text{ g/m}^2$ 까지 증가하는데 압력손실은 $2.5-62 \text{ mmH}_2\text{O}$ 까지 증가하여 SMF-1과 비슷하게 증가하는 것으로 나타났고, 여과속도가 5 m/min의 경우 압력손실은 $13.3-354 \text{ mmH}_2\text{O}$ 까지 증가하였다.

4-1-3. 상관관계식

Ikemori와 Kosakai[19]는 부직포 필터(felt fabric)에 의한 먼지포집 실험결과를 토대로 총 압력손실에 대한 청정 필터의 압력손실비는 먼지부하와 지수함수 관계에 있다고 가정하여 다음과 같은 상관관계식을 제시하였다.

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_j} = \exp(C_1 W^k) \quad (8)$$

본 실험에서는 소결금속섬유필터인 SMF-1, SMF-2를 사용하였을 경우 먼지부하의 변화에 따라 압력손실을 측정 한 결과를 Ikemori와 Kosakai [19]가 제시한 방법을 토대로 Table 4 처럼 여과속도 및 먼지부하량에 따라 식 (9)부터 (16)까지의 상관관계식을 도출할 수 있었고, Table 4의 우측에 표시된 표준편차를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 SMF-1 및 SMF-2에 대한 실험치와 상관관계식으로부터 계산된 계산치를 비교하여 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 실험 결과 상관관계식이 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 소결금속섬유필터에 먼지층이 형성되었을 경우 압력손실을 먼지부하와 연관지어 지수함수로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

4-2. 먼지통과율

필터 집진장치에서 먼지통과율의 예측은 다른 집진장치와 달리 매우 복잡하지만 포집먼지의 물성과 조업조건을 정확히 파악한다면 이에 대한 실험결과를 토대로 포집효율의 예측이 가능하다. 그러므로 실험실 규모의 필터 성능실험에서 필터 집진장치의 설치계획에 필요한 자료를 획득하기 위해서는 포집할 먼지와 필터를 선정하여 넓은 범위의 운전 범위에서 실험을 수행하여 그 결과를 토대로 실제장치의 계획에 응용해야만 한다.

4-2-1. 여과속도의 영향

초기 먼지통과율은 먼지통과율과 먼지부하의 관계에 대한 실험자료를 토대로 그린 그래프에서 여과속도에 따라 그려진 곡선을 외삽법에 의해 연장시켜 먼지부하가 0인 점의 값을 읽어서 구한 값과 먼지부하가 약 1.0 g/m^2 조건에서 각 여과속도에 따라 측정 한 실험값을 이용하는 방법이 있다. 본 실험에서는 후자의 방법으로 먼지부하가 약 1.0 g/m^2 의 값에 거의 근접한 조건에서 측정 한 실험값을 이용하였다.

Fig. 7은 SMF-1 및 SMF-2로 AC Fine Dust를 포집할 때 여과속도의 변화에 따른 초기 먼지통과율을 나타낸 것이다. 여과속도가 증가함에 따라 초기 먼지통과율은 증가하였으며, SMF-1의 경우 여과속도가 느린 조건인 1.0 m/min에서는 초기 먼지통과율이 8.7%이었고, 여과속도가 빠

Table 4. Correlation equation of pressure drop

Face velocity	Dust loading	Correlation equation	Standard deviation
SMF-1			
$V_f=1.0 \text{ m/min}$	$W < 40 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(0.5288W^{0.3815})$	0.07043
	$W > 40 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(1.0387W^{0.2061})$	0.02801
$V_f=3.0-5.0 \text{ m/min}$	$W < 40 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(0.2W^{0.6528})$	0.12263
	$W > 40 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(0.7083W^{0.2845})$	0.07638
SMF-2			
$V_f=1.0 \text{ m/min}$	$W < 40 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(0.202W^{0.7072})$	0.14767
	$W > 40 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(1.265W^{0.1933})$	0.02942
$V_f=3.0-5.0 \text{ m/min}$	$W < 60 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(0.5099W^{0.4169})$	0.0871
	$W > 60 \text{ g/m}^2$	$\Delta P_f = \Delta P_j \exp(1.0919W^{0.2288})$	0.02028

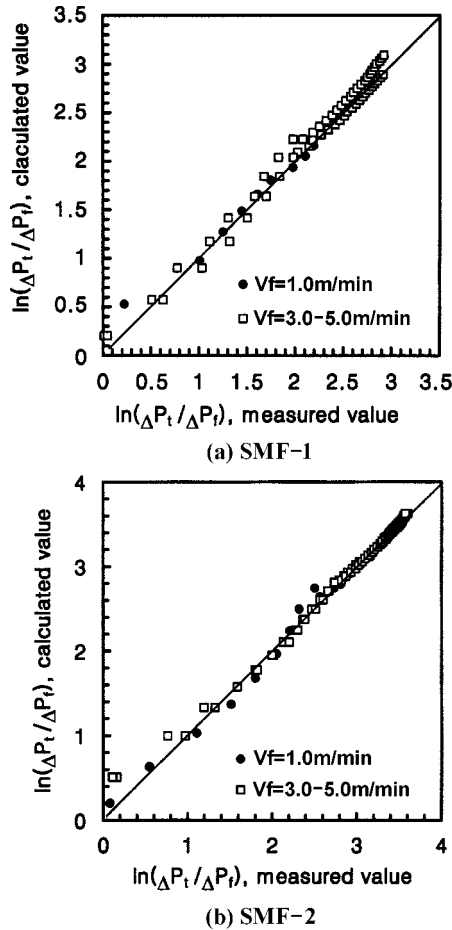


Fig. 6. Comparison of pressure drop between experimental results and calculated values.

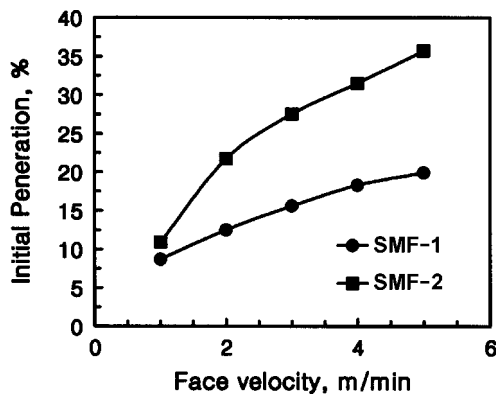


Fig. 7. Initial penetration as a function of face velocity.

른 조건인 5.0 m/min에서는 초기 먼지통과율이 19.9%로 느린 여과속도 조건에 비해 약 2.3배정도 높게 나타났다. 이러한 현상은 여과속도가 빠르면 여과속도가 느린 조건에 비해 먼지입자가 필터에서 포집되지 않고 많은 양이 필터의 공극을 통과한다는 것으로 추정할 수 있다. 또한 SMF-1에 의해 AC Fine Dust를 포집할 경우 먼지포집 초기단계이고 여과속도가 1.0 m/min 조건에서 먼지 포집효율은 91.3%로 추정되고, 여과속도가 5.0 m/min 조건에서는 먼지 포집효율은 80.1%로 추정할 수 있다.

SMF-2의 경우에는 SMF-1의 경우에 비하여 초기 먼지통과율이 크게

나타났고, 여과속도가 1.0 m/min 조건에서는 초기 먼지통과율이 10.9% 이었고, 여과속도가 5.0 m/min 조건에서는 35.7%로 나타나 느린 여과속도 조건에 비해 약 3.3배정도 높게 나타났다. 따라서, SMF-2의 먼지포집 초기단계에서는 여과속도가 1 m/min인 경우 먼지 포집효율이 89.1%이며, 여과속도가 5 m/min인 경우 포집효율이 64.3%인 것으로 나타났다.

이처럼 SMF-1과 SMF-2의 초기 먼지통과율이 차이가 있는 것은 통기도 차이 및 pore size 차이 등에 의하여 쉽게 알 수 있다.

Mekenna 등[20]과 Peterson 등[21]은 입자크기가 0.1-10 μm 인 NBS (National Bureau of Standards) 석탄회를 실험용 먼지로 사용하여 유리섬유 필터의 먼지통과율을 실험한 결과에 의하면, 먼지통과율은 여과속도가 증가할수록 증가한다는 것을 확인하였다. 또한 Leith와 First[22]는 입자크기가 0.5-40 μm 인 석탄회를 실험용 먼지로 사용하여 polyester needled felt 필터의 먼지통과 특성에 대한 실험결과, 빠른 여과속도 조건에서 먼지통과율은 느린 여과속도 조건에서 먼지통과율에 비해 약 4 배 높게 나타났다. 이와 같이 여러 연구자들의 실험결과를 요약해 보면 직포나 부직포에 의해 먼지를 포집할 경우 먼지포집 초기단계에서는 먼지통과율은 여과속도가 증가함에 따라 증가한다는 것으로 밝혀졌으며, 본 실험결과도 같은 현상이 나타나는 것을 확인하였다.

4-2-2. 먼지부하의 영향

AC Fine Dust를 SMF-1, SMF-2로 포집할 경우 여과속도와 먼지부하의 증가에 따라 먼지통과율에 미치는 영향을 측정하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 어느 필터나 먼지층이 형성되는 초기단계에서는 먼지부하의 증가에 따라 먼지통과율은 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 먼지입자 필터 자체에 포집되지 않고 필터 위에 형성된 퇴적층에 의해 지배적으로 이루어지고 있다는 것을 추정할 수 있다.

두 종류의 필터에서는 먼지통과율과 먼지부하와의 관계를 보면 먼지부하가 30-40 g/m^2 이하의 범위에서는 먼지통과율이 급격히 감소하였

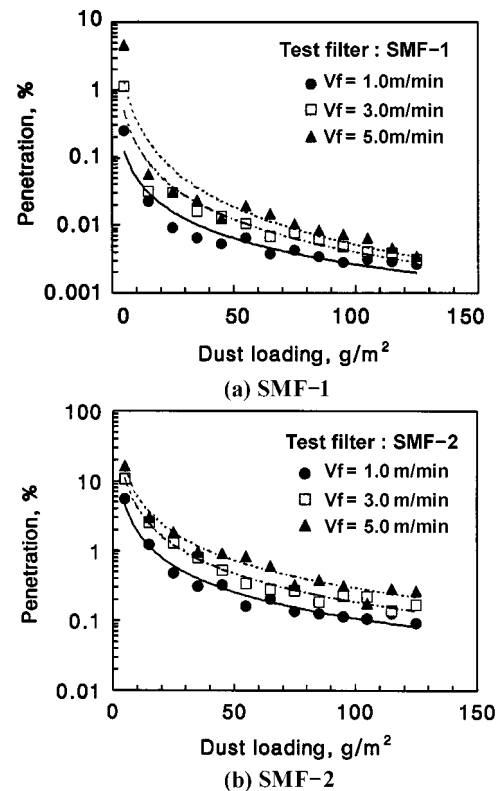


Fig. 8. Effects of dust loading on the penetration at different face velocities.

고, 먼지부하가 40 g/m^2 이상 조건에서는 먼지통과율의 감소경향이 거의 일정하게 나타났다. 이는 여과포위에 퇴적된 먼지층이 어느 정도 두께가 형성되면 먼지통과율에 먼지부하의 영향이 크게 미치지 않음을 알 수 있으며, 이러한 실험결과를 토대로 보면 실제 여과포집장치에서 어느 정도 먼지부하에서 여과포위에 퇴적된 먼지층을 털어 내야 할 것인지 예측이 가능하게 된다.

Viner 등[23]과 Dennis[24]는 미분탄 연소방식의 용량 40 MW의 Kramer (USA) 화력발전소에서 배출되는 석탄회를 실험용 먼지로 사용하여 Teflon B로 표면처리된 유리섬유 필터의 먼지통과율에 대한 실험결과에 의하면, 필터 위에 먼지퇴적층이 형성되기 시작되는 초기단계에서는 대부분의 먼지입자들이 필터를 통과하여 먼지통과율이 낮게 나타났지만, 여과시간이 경과하여 필터 위에 먼지퇴적층의 두께가 어느 정도 형성 되면 먼지통과율은 지수함수적으로 급격히 감소한다고 보고하였다. 이와 같은 결과는 본 실험에서도 확인되었는데, 필터에 의한 먼지포집은 필터 자체만으로는 포집효율을 증가시키지 못하고, 먼지퇴적층에 의한 먼지포집이 대부분 일어나 포집효율 증가에 크게 영향을 미치는 것으로 추정되며, 실제 필터 집진장치의 운전에서 중요하게 취급해야 할 요소이다.

Fig. 8은 SMF-1과 SMF-2에 의한 AC Fine Dust의 포집에서 여과속도가 $1.0\text{--}5.0 \text{ m/min}$ 범위의 조건에서 먼지부하의 증가에 따라 먼지통과율의 실험결과를 나타낸 것이다. SMF-1의 먼지통과율은 SMF-2의 먼지통과율에 비해 낮게 나타났으며, SMF-1의 경우에 여과속도의 영향이 더욱 뚜렷하게 나타났다.

SMF-1은 여과속도 1.0 m/min 에서 먼지부하가 15 g/m^2 에서 125 g/m^2 까지 증가하는데 먼지통과율은 0.02% 에서 0.002% 로 감소하였으며, SMF-2의 경우에는 1.24% 에서 0.09% 까지 감소하였다. 즉 여과속도가 느린 조건에서 SMF-2는 먼지부하가 증가하여도 포집효율은 99.9% 이상은 증가하지 않지만, SMF-1은 99.998% 정도의 포집효율을 유지가 가능한 것으로 판단된다. 여과속도가 3 m/min 일 경우에는 SMF-1의 경우 먼지부하가 15 g/m^2 에서 125 g/m^2 까지 증가하는데 먼지통과율은 0.02% 에서 0.003% 로 감소하였으며, SMF-2의 경우에는 2.57% 에서 0.16% 까지 감소하였다. 여과속도가 5 m/min 일 경우에는 SMF-1의 경우 먼지부하가 15 g/m^2 에서 125 g/m^2 까지 증가하는데 먼지통과율은 0.06% 에서 0.004% 로 감소하였으며, SMF-2의 경우에는 3.01% 에서 0.27% 까지 감소하였다. 따라서 SMF-2의 경우에 있어 여과속도가 3 m/min 이하로 커지게 되면 먼지부하가 증가하여도 99.8% 정도의 포집효율을 얻지 못하므로 여과속도를 낮게 해야지 고효율의 포집효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

SMF-1은 먼지부하의 증가에 대한 여과속도가 느린 조건과 빠른 조건에서 먼지통과율의 차이가 SMF-2에 비해 뚜렷하게 나타났다. 이것은 SMF-1가 SMF-2 보다 섬유 짜임새가 더 정교하고 필터의 공극크기가 작아 필터 전체면에 일정하게 형성되어 퇴적먼지층이 균일한 분포를 가지므로 여과속도 변화에 따라서 먼지층에 의한 먼지입자의 포집기구가 뚜렷하게 이루어지는 것으로 추정된다.

4-2-3. 상관관계식

Ikemori와 Kosakai[19]는 부직포 필터에 의한 먼지포집 실험결과를 토대로 먼지통과율에 대한 다음과 같은 실험식을 제시하였다.

$$P_n = P_{n_0} \exp(-C_2 W^m) \quad (9)$$

또한 초기먼지통과율 P_{n_0} 는 여과속도와 다음과 같은 관계가 성립되는 것을 제시하였다.

$$P_{n_0} = C_3 V^n \quad (10)$$

식 (9) 및 (10)에서 제시된 C_1 , C_2 , m , n 등의 상수값은 먼지부하량

및 먼지통과율의 실험결과를 토대로 구해지는 실험값이다.

본 실험에서도 부직포인 소결금속섬유필터에 의한 AC Fine Dust의 포집에서 먼지통과율은 Ikemori와 Kosakai[19]가 제시한 유사한 방법으로 먼지부하와 지수함수 관계가 있다고 가정하여 AC Fine Dust를 SMF-1, SMF-2로 포집하였을 때 여과속도와 먼지부하의 변화에 따라 먼지통과율을 측정 한 결과를 토대로 다음과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었다.

SMF-1에서는

$$P_n = 8.72 V^{0.523} \exp(-4.211 W^{0.1409}) \quad (11)$$

과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었고, 표준편차는 0.00157 로 나타났다.

SMF-2에서는

$$P_n = 11.746 V^{0.7286} \exp(-1.033 W^{0.3311}) \quad (12)$$

과 같은 상관관계식을 얻을 수 있었고, 표준편차는 0.12901 로 나타났다.

상관관계식의 적용 범위는 평균입자크기가 $9.046 \mu\text{m}$ 인 AC Fine Dust를 SMF-1 및 SMF-2 두 종류의 소결금속섬유필터로 포집할 경우 여과속도는 $1\text{--}5 \text{ m/min}$ 이며, 먼지부하는 $15\text{--}125 \text{ g/m}^2$ 의 운전조건이다.

Fig. 9는 실험에서 얻은 실제 먼지통과율 측정치와 상관관계식에 의해 얻은 계산치와의 비교를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험결과와 상관관계에서 얻은 계산치가 잘 일치함을 알 수 있다. SMF-1의 경우에는 상관계수가 0.9461 로 나타났고, SMF-2의 경우에는 상관계수가 0.9603 로 나타났다. 따라서 본 실험에서 사용된 실험용 필터와 유사한 물리적 특성을 가지고 있는 필터를 집진장치에 적용할 경우 실험

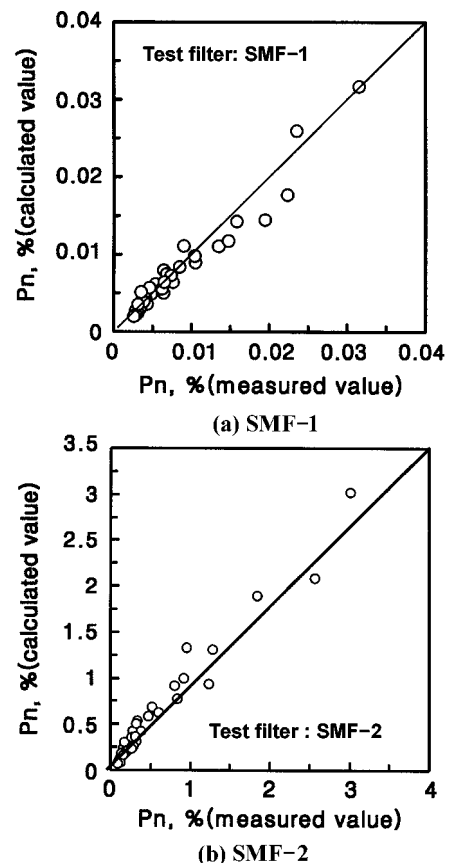


Fig. 9. Comparison of penetration between calculated value and experimental value.

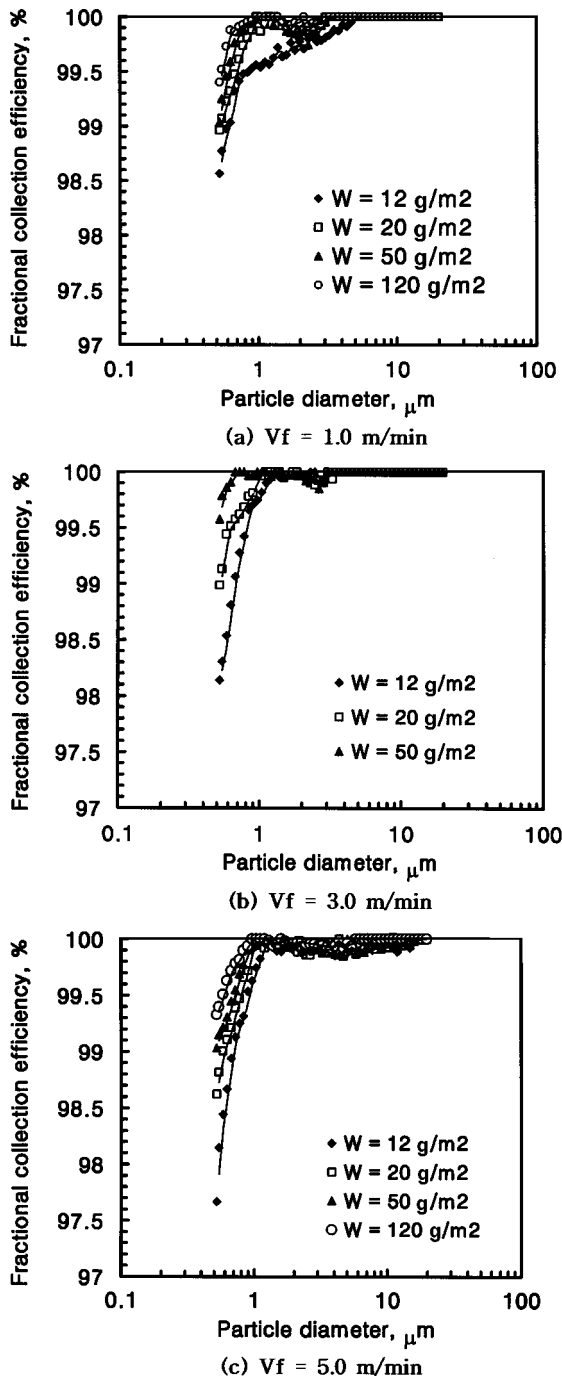


Fig. 10. Fractional efficiency for SMF-1 at face velocities.

결과를 토대로 제시한 상관관계식을 이용하여 포집효율의 추정이 가능할 것으로 사료된다.

4-3. 부분집진효율

필터 집진장치는 매우 미세한 먼지입자까지 포집이 가능한 고성능 집진장치이다. 그러나 먼지입자 크기에 따른 포집효율, 즉 부분집진효율은 필터의 물성, 포집먼지의 특성, 처리기체의 특성 및 운전조건에 따라 다르다. 그러므로 필터의 성능을 알아보기 위하여 필터의 집진장치에 유입되는 함진기체에 함유된 먼지의 입도분포와 필터에 의해 먼지의 포집이 된 후 처리된 기체내에 함유된 먼지의 입도분포 측정이 매우 중요

하다[25-26].

본 실험에서는 0.54-30 μm 범위의 입자크기 측정이 가능한 Aerodynamic Particle Sizer(API, 3320)를 사용하여 여과속도와 먼지부하의 변화에 따라 실험필터의 부분포집효율을 측정하였다.

Fig. 10은 소결금속섬유필터 SMF-1를 사용하였을 경우 여과속도가 1.0 m/min, 3.0 m/min, 5.0 m/min인 조건에서 먼지부하량이 변화에 따라 부분집진효율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 먼지부하가 증가함에 따라 부분집진효율은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

여과속도가 1.0 m/min 조건에서 먼지포집 초기조건인 먼지부하 12 g/m²에서 입자크기가 0.5 μm 인 먼지입자는 약 98.5% 포집되었으나, 먼지부하 50 g/m²이상 조건에서는 99%이상이 포집되는 것으로 나타났다. 또한 먼지입자 크기가 1.0 μm 이상인 경우에는 완전포집이 가능한 것으로 나타났다.

여과속도가 3.0 m/min인 조건에서는 먼지부하가 12 g/m²일 때 0.5 μm 입자의 부분집진효율이 98.1%로 나타났고, 여과속도가 5.0 m/min인 조건에서는 먼지부하가 12 g/m²일 때 부분집진효율이 97.7%로 나타났다.

Fig. 11은 소결금속섬유필터 SMF-2를 사용하였을 경우 여과속도가 1.0 m/min, 3.0 m/min, 5.0 m/min인 조건에서 먼지부하량이 변화에 따라 부분집진효율을 나타낸 것이다. 여과속도가 1.0 m/min 조건에서는 0.5 μm 인 먼지입자가 97.8% 부분포집효율을 나타내었으며, 3.0 m/min에서는 96.5%까지 감소하였고, 5.0 m/min으로 증가하면 부분포집효율이 88.4%까지 크게 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 10 및 11에서 볼 수 있듯이 먼지부하가 낮은 조건과 높은 조건에서 먼지입자크기에 따른 부분포집효율을 비교해 보면 먼지부하가 높은 조건이 먼지부하가 낮은 조건에 비해 부분포집효율이 훨씬 높게 나타났다.

여과속도가 커지면 부분포집효율에 미치는 먼지부하의 영향이 뚜렷하게 나타나고, 여과속도가 증가하므로 통과되는 먼지입자크기는 작아지는 것으로 나타났다.

위와 같은 현상은 필터 위에 먼지층이 균일하게 형성되면 작은 미세한 먼지입자들은 먼지층에 의해 포집되고, 일부분만 통과하는 것으로 추정된다. 특히, 여과속도가 느린 조건에서는 미세한 먼지입자들이 필터 위에 퇴적된 먼지층을 통과하는 시간이 길기 때문에 먼지층을 형성하는 입자들과 서로 가교형성이 용이하여 대부분이 포집된다고 추정할 수 있으나, 여과속도가 빠르면 먼지층 내를 통과하는 시간이 짧아 미세한 먼지입자들은 먼지층에 의해 포집되지 않고 그대로 통과하는 것으로 볼 수 있다.

First와 Leith[22]는 polyester needle felt 필터에 의한 석탄회 포집 실험에서 석탄회 입자가 퇴적먼지층과 필터를 통과하는 기구를 규명한 보고에 의하면, 여과속도가 3.0 m/min인 조건에서 필터 위에 퇴적된 먼지층의 두께가 증가함에 따라 직통(straight though)에 의한 먼지통과 기여율이 가장 높게 나타나지만, 불어나감(seepage)에 의한 먼지통과 기여율은 크게 나타나지 않았다고 하였다. 그러나 여과속도가 9.0 m/min인 조건에서는 먼지포집 초기에는 직통에 의한 먼지통과 기여율이 높게 나타나다가 먼지층 두께가 증가하면서 급격히 감소하였으며, 반면에 불어나감에 의한 먼지통과 기여율이 급격히 증가한다고 하였다. 이와 같은 결과를 토대로 본 실험 조건에서는 AC Fine Dust 입자들이 필터와 먼지층을 통과하는 기구는 직통에 의해 거의 이루어진다고 추정된다.

Fig. 10과 11을 비교하여 보았을 때, 여과속도와 먼지부하가 증가함에 따라 SMF-1와 SMF-2의 부분집진효율은 뚜렷하게 차이가 났으며, SMF-2에 비해 SMF-1가 더 높게 나타났다. 이러한 현상은 SMF-1가 SMF-2보다 여과성능이 우수하여 필터 위에 퇴적먼지층이 필터 전체면에 균일하게 형성되어 먼지입자의 포집이 먼지층에 의해 대부분 이루어지기 때문이라고 볼 수 있다.

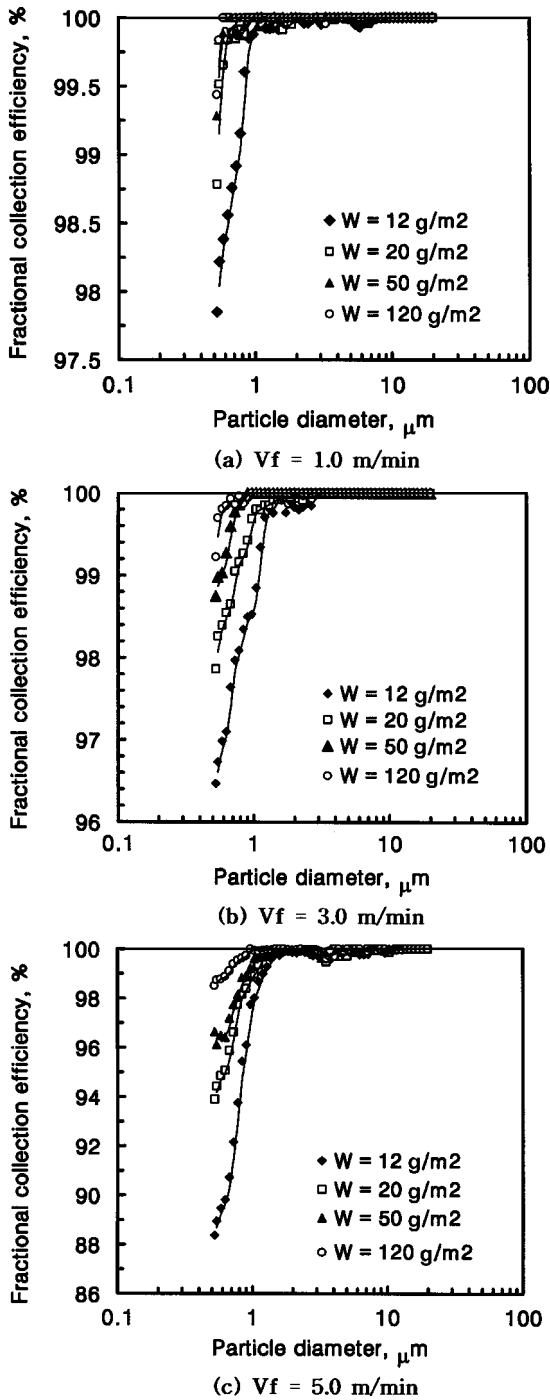


Fig. 11. Fractional efficiency for SMF-2 at face velocities.

5. 결 론

본 연구에서는 내산성, 내알칼리성, 내열성이 우수할 뿐만 아니라 역세에 의하여 재사용이 가능한 소결금속섬유필터에 대한 기초여과성능 특성을 조사하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 여과속도 및 먼지부하 변화에 따른 압력손실 변화를 알아보고, 초기 먼지층 및 균일 먼지층이 형성됨을 확인할 수 있었다.
- (2) 먼지부하의 변화에 따른 압력손실을 계산할 수 있는 상관관계식

을 도출하였고, 압력손실 실험치와 상관관계식에 의한 계산치를 비교하여 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

(3) SMF-1 및 SMF-2의 금속섬유필터에 대한 먼지부하가 40 g/m^2 이상 조건에서는 먼지통과율의 감소경향이 일정한 것으로 나타났고, 여과속도를 3 m/min 이하로 해야지 99.9% 이상의 먼지포집효율 유지가 가능하였다.

(4) 여과속도 및 먼지부하의 변화에 따른 먼지통과율을 계산할 수 있는 상관관계식을 도출하였고, 먼지통과율 실험치와 계산치를 비교하여 보았을 때 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

(5) SMF-1의 경우 먼지부하가 낮고 여과속도가 높은 경우에도 $1 \mu\text{m}$ 이하의 미세먼지입자의 부분집진효율이 97.5% 로 비교적 성능이 우수한 것으로 나타났지만, SMF-2의 경우에는 먼지부하가 낮고 여과속도가 높은 경우에는 $1 \mu\text{m}$ 미세먼지입자의 부분집진효율이 95% 이하로 낮게 나타나 가능한 여과속도를 낮게 유지해 주어야 한다.

감 사

본 연구는 환경부 선도기술개발사업인 환경기술연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

사용기호

- D_f : single fiber diameter [μm]
- D_{fm} : apparent diameter of single fiber with dust loading [μm]
- C, C_d : dust concentration of dust laden gas [g/Sm^3]
- C_i, C_o : dust concentration of inlet and outlet, respectively [g/Sm^3]
- C_1, C_2, C_3, k, m, n : experimental values
- E : collection efficiency [%]
- E_o : initial collection efficiency [%]
- K_1 : resistance of filter media [$\text{mmH}_2\text{O/m-min}$]
- K_2 : specific resistance coefficient [$\text{mmH}_2\text{O/m-min}$]
- l : fiber length [m]
- L_f : filter thickness [mm]
- P_n : penetration [%]
- P_{no} : initial penetration [%]
- ΔP_d : pressure drop through dust layer [mmH_2O]
- ΔP_f : pressure drop through filter media [mmH_2O]
- ΔP_t : total pressure drop [mmH_2O]
- S_w : fluid streamline width of dust laden gas [m]
- V_f : face velocity [m/min]
- W : dust loading [g/m^2]

그리스 문자

- ϵ_f : porosity of filter
- η_f : collection efficiency of single fiber [%]
- η_{fo} : collection efficiency of clean filter [%]

참고문헌

1. Dickenson, T. C.: "Filters and Filtration Handbook," 4th ed, Elsevier Advanced Technology, Oxford OX5 1GB(1997).
2. Park, Y. O., Koo, C. O., Lim, J. H., Kim, H. R., Son, J. E. and Rhee, Y. W.: *Energy Engg. J.*, **7**, 57(1998).
3. Park, Y. O., Koo, C. O., Lim, J. H., Kim, H. R., Son, J. E. and Rhee, Y. W.: *Energy Engg. J.*, **7**, 103(1998).

4. Kil, I. S., Rhee, Y. W. and Park, Y. O.: *J. Korea Solid Wastes Eng. Society*, **14**, 861(1997).
5. Choi, E. M., Rhee, Y. W., Kil, I. S. and Park, Y. O.: *J. of Korean society Env. Engg.*, **21**, 753(1999).
6. Tao, L.: *Filtration & Separation*, **April**, 265(1997).
7. Tao, L.: *Advance in Filtration and Separation Technology*, **11**, 119(1997).
8. Billings, C. E. and Wilder, J. E.: GCA/Technology Division, Bedford, Mass., EPA-APTD0690, 1.1-2.219(1970).
9. Williams, C. E., Hatch, T. and Greenburgs, L.: *Heating, Piping and Air Conditioning*, **12**, 259(1940).
10. Matteson, M. J. and Orr, C.: "Filtration Principles and Practices," 2nd ed, Marcell Deker, Inc., 1(1987).
11. Kimura, N. and Inoya, K.: *Kagaku Kogaku*, **23**, 792(1959).
12. Billings, C. E.: Ph. D. Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, USA(1966).
13. Yoshioka, N., Emi, H., Yasumami, M. and Sato, H.: *Pollution Chemical Engineering*, **33**, 1013(1969).
14. Payatakes, A. C. and Tien, C.: *J. Aerosol Sci.*, **7**, 85(1975).
15. Payatakes, A. C.: *AIChE J.*, **23**, 192(1977).
16. Wang, C. S., Beizaie, M. and Tien, C.: *AIChE J.*, **23**, 879(1977).
17. Noll, K. E., Davis, W. T. and La Rosa, P. T.: 68th Annual Meeting of APCA., Boston, June 15-20(1975).
18. Spaite, P. W. and Walsh, G. W.: *Ind. Hyg. J.*, 357(1963).
19. Ikemori, K. and Kosakai, Y.: *J. Japan Air Cleaning Assoc.*, **16**, 1(1978).
20. Mckenna, J. D., Mycock, J. C. and Lipscomb, W. O.: *JAPCA*, **24**, 1144(1974).
21. Peterson, C. M. and Whitby, K. T.: *ASHRAE J.*, 42(1965).
22. Leith, D. and First, M.: 68th Annual APCA Meeting, Boston, 1(1975).
23. Viner, A. S., Donnvan, R. P. and Ensor, D. S.: *JAPCA*, **34**, 872(1984).
24. Dennis, R.: *JPACA*, **24**, 1156(1974).
25. Lamb, G. E., Costanza, P. and Miller, B.: *Textile Research Journal*, 452(1974).
26. Dennis, R. and Bubenick, D.V.: *Filtration and Separation*, 143(1983).