

다공성 필터에서의 여과 분진층 비저항 연구

Specific Resistance (K_2') of Dust Layer Deposited on Porous Media

이 선 회 · 이 경 미 · 조 영 민*

경희대학교, 환경연구센터

(2004년 2월 27일 접수, 2004년 5월 24일 채택)

Sun Hee Lee, Kyung Mi Lee and Young Min Jo*

Center for Environmental Studies, Kyung Hee University

(Received 27 February 2004, accepted 24 May 2004)

Abstract

In the dust separation by using porous filter media, the structure of dust layer deposited on the filter surface of filter medium directly affects the effective filtration. The present study has investigated the specific resistance (K_2') of the dust layer and its porosity (ϵ_c) for three different filters; FA composite filter, metal fiber filter and stainless filter. The specific resistance (K_2') increased and at the same time the cake porosity (ϵ_c) decreased with the increase of filtration velocity, possibly due to the compressible effect of dust layer.

However, under the low dust concentration, subsequent dust particles would block the open channels through the layer resulting in high specific resistance of the layer. The FA composite filter among three filters was shown to be the most effective filter for dust cake filtration at low filtration velocities less than 0.1 m/s for an approximate dust concentration of 5 g/m³.

Key words : Porous medium, Ceramic filter, Specific resistance (K_2'), Porosity (ϵ_c), Dust cake filtration

1. 서 론

생산산업 공정에서 다양하게 발생하는 미세분진은 실내외 환경질을 악화시키는 요인이 되고 있다. 이러한 미세분진을 제거하기 위하여 빈번하게 사용되는

여과집진장치는 높은 효율과 사용의 편리성이 있지만, 집진이 진행됨에 따라 높은 압력 강하가 발생하므로 이에 대한 대안이 다각도로 연구되고 있다. 미세분진 여과가 진행되는 동안 필터 위에 고체상의 입자가 계속 쌓여 분진층이 형성되고, 형성된 분진층은 또 다른 입자 고정층을 이룸으로써 추가적인 여과기능을 한다. 일정한 정도의 여과가 진행됨에 따라 필터의 고유 특성을 넘어 오히려 분진층이 여과 공정 전체를 지배하는 분진층여과 (dust cake filtration)

* Corresponding author
Tel : +82-(0)31-201-2485, E-mail : ymjo@khu.ac.kr

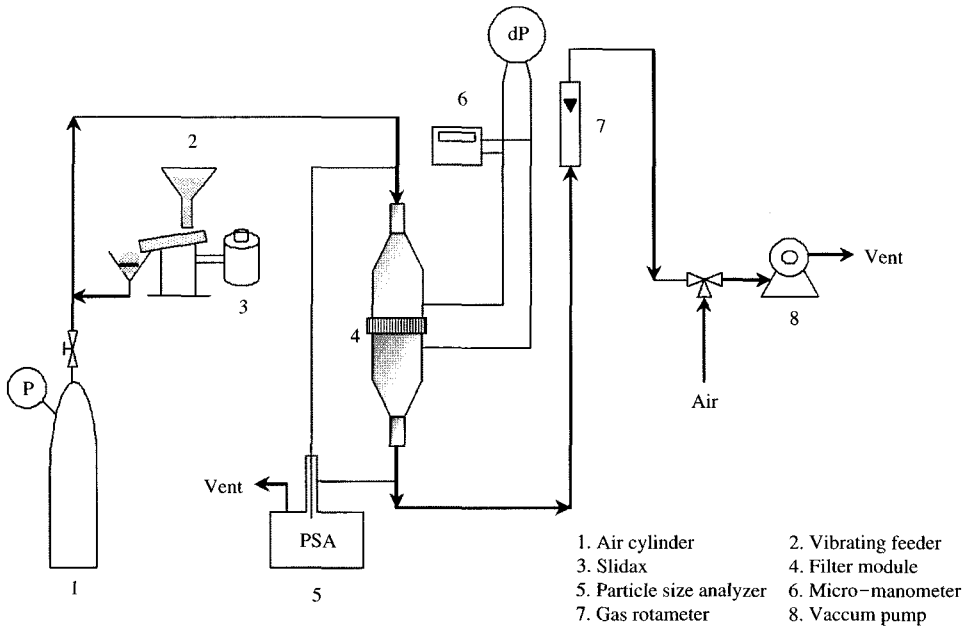


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus used for dust filtration.

효과가 나타난다. 분진층은 궁극적인 분진 여과 성능을 좌우하며, 필터의 구조, 분진의 특성(크기, 형태, 입자간의 상호작용), 여과 운전 조건(여과속도, 분진농도, 여과온도) 등에 의해 영향을 받는다(Jo and Raper, 1997). 특히 필터의 표면 구조나 기공 크기는 여과 초기 단계의 분진층의 구조를 결정하며, 초기 분진층은 여과가 진행됨에 따라 뒤이은 분진층 형성 및 여과 메카니즘에 영향을 끼치므로 궁극적으로는 처음 필터의 구조가 분진여과 과정을 지배하는 요인이 된다(Leith and Allen, 1986). 그러나 분진층 형성에 관한 연구는 주로 섬유상 필터나 fabric 필터에 국한되어 간헐적으로 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 고온가스정화용 무기 필터의 경우, 고온에서도 물질의 변형 또는 물성 특성의 변화가 없도록 특수한 재료와 제조 공법으로 만들어지므로, 구조적 차이가 분명한 바, 이에 적합한 분진층 해석 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 필터매체 (medium) 구조가 서로 상이한 FA (fly ash) 복합 세라믹 필터와 metal fiber 필터, 스텐레스 필터를 실험실 규모의 연구에 적절하게 준비하여 낮은 Reynolds 수의 유체흐름에 대한 분진층의 비저항과 공극률을 분진농도와 여과속도에 따

라 실험과 이론식으로부터 추정하고자 하였다.

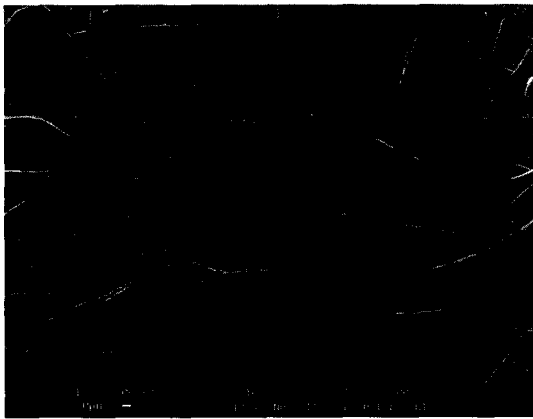
2. 실험방법 및 장치

본 연구에서 사용한 분진여과 실험장치는 그림 1에 도시한 바와 같이 dead-end filtration 시스템으로 설계하였다.

본 연구에서 사용한 세 종류의 필터는 원료 물질이나 제조 방법이 각각 다르기 때문에 필터 매체 표면의 미세 기공 구조 형상은 그림 2에서 볼 수 있듯이 다양한 모습을 보여주고 있다. FA 복합 세라믹 필터는 지지체인 stainless mesh (# 100)에 입자의 형상이 구형에 가까운 폐석탄회를 슬러리 형태로 제조하여 dip-coating한 후 열처리한 것으로 mesh의 wire와 wire 사이에 세라믹 입자들이 충전되어 있는 구조이다(Jo et al., 1996). Metal fiber 필터는 진공상태에서 고온으로 가열하여 철, 알루미늄, 니켈 등의 합금 금속 섬유를 non-woven mat 형태로 직조하여 높은 다공성 구조를 이루고 있다. 마지막으로 스텐레스 필터는 스텐레스 wire를 압착하여 고온에서 진공 소결시켜 제조한 것으로 미세 기공 채널이 전체적으로



FA composite filter



Metal fiber filter



Stainless filter

Fig. 2. Surface observation of three filters implying structural difference.

Table 1. Mean flow pore diameter and porosity of three test filter media.

	FA (Fly ash) composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter
Mean flow pore dia. (μm)	3.37	30.47	1.86
Porosity (%)	54.3	82.4	46.8

고르게 분포하고 있다. 필터 media 자체의 기공 특성을 평가하기 위하여 Capillary Flow Porometer (USA, CFP-1100-AEL, PMI) 장치를 사용하였으며, 필터의 공극률(ε)은 식 (1)과 같이 필터를 이루는 고체질량과 필터와 같은 부피를 가지는 기준 고체물질의 질량을 비교함으로써 구하였다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\text{필터를 이루는 고체질량}}{\text{필터와 같은 부피의 고체질량}} \quad (1)$$

표 1은 세 가지 필터에 대한 평균 기공 크기와 공극률을 나타내었으며, 공극률 계산시 필터 재질인 스테인레스의 밀도는 7.8 g/cm³로 산정하였다.

분진의 입자 크기나 형태, 입자간의 상호작용은 분진층의 기공 분포와 압력강하에 영향을 준다. 본 실험에서 분진시료로 사용한 석탄회(보령화력발전소)는 가장 작은 체 눈의 크기인 26 μm 체 (Tyler # 500)를 vibro sifter (대화기연, DVS-200)에 부착하여 분리 선별한 후 입도분석기(영국 Malvern Mastersizer S, Version 2.19)로 석탄회의 입도분포를 측정하였다. 그림 3은 체분리하여 포집한 석탄회의 다분산 입도분포를 나타낸 것으로 평균 중간직경이 약 8 μm임을 확인할 수 있었다. 분진의 형태 또한 분진층의 기공 분포와 압력강하에 영향을 주므로 SEM을 사용하여 석탄회 입자의 입체적인 형상을 관찰하였으며, 그림 4에서 볼 수 있듯이 대체로 구형을 띠고 있으므로 일반적인 분진여과 메카니즘 해석에 적용되는 조건에 부합될 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 그림 4로부터 선명히 확인할 수 있듯이 입자들의 응집 현상이 거의 눈에 띄지 않는 바, 본 기-고 여과 실험용 분진으로 사용하기에 적절할 것으로 사료된다.

석탄회는 스테인레스 망이 부착된 진동 분진 공급 장치 (2)를 통해 규칙적으로 주입하였다. 스테인레스 망은 비정상적인 크기의 입자나 불순물의 유입을 방

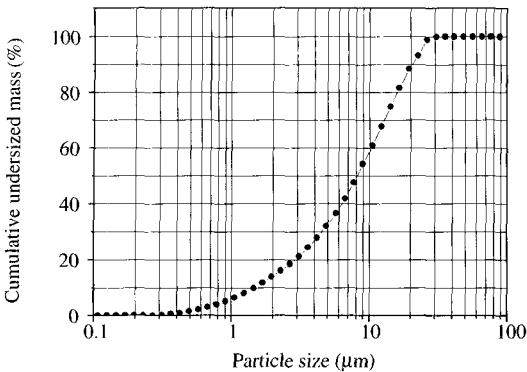


Fig. 3. Cumulative size distribution of classified dust particles.

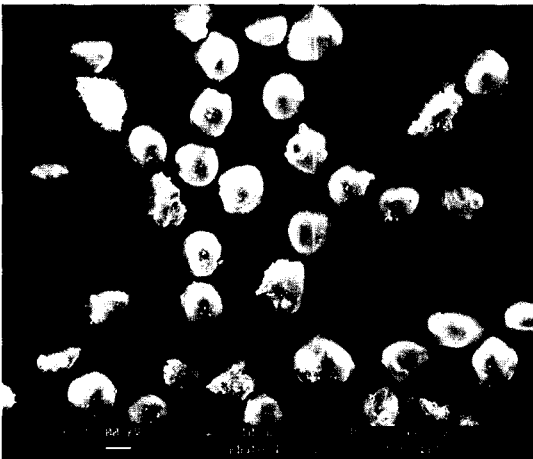


Fig. 4. Shape of ash particles used for aerated dust.

지하고, 덩어리진 입자를 분쇄시켜주는 중요한 역할을 한다. 필터모듈로 분진이 원활하게 공급되게 하기 위하여 고순도 실린더 공기(1)를 노즐을 통하여 가속시켜 주었고, 고른 분진농도와 공급 line에서의 분진유실을 최소화 할 수 있었다. 분진의 농도는 전압 조절에 의한 진동의 세기를 변화시켜가며 조절하였다. 여과 시스템은 필터모듈(4), 수은주 차압계(dP), 로타미터 유량계(7)로 이루어져 있다. 필터의 유효 여과 직경은 3.2 cm로 설계하였고, 필터의 압력차는 전자식 미세 차압계(6)와 수은주 차압계를 압력 범위에 맞추어 적절히 선택하여 측정하였으며, 여과실험은 상온(20~27°C)에서 실시하였다. 여과속도는

유량계를 5, 7, 9 L/min로 변화시켜가며, 0.10, 0.15, 0.19 m/s로 조절하였고, 여과 후 필터모듈 분리시 분진층의 변화방지와 분진 흐름의 완전한 마무리를 위하여 진공 펌프(8)는 일정시간 계속 가동시켰다.

분진층의 공극률을 알기 위해서는 분진층의 높이를 정확히 파악해야 하는 바, 분진층의 높이(L_c)는 Dial Height Gauge(일본 Mitutoyo사, series no. 192-130)를 사용하여 0.001 mm 단위로 측정하였다. 여과 시간에 따른 압력강하(t-ΔP)를 측정하여, 포집된 분진의 질량밀도(W) 대비 여과항력(S) 형태로 도시한 후, 그 기울기로부터 분진층의 비저항 값을 계산하였다. 분진층의 공극률은 Re < 1인 층류 하에서 Kozeny-Carman 식을 적용하여 각각의 분진층 비저항에 대한 공극률을 분진농도, 여과속도에 따라 Newton-Raphson 방법으로 계산하였고, 식(2)의 결과기 공극률과 비교함으로써 분진층 구조를 해석하였다. 이때 석탄회 분진입자의 평균 밀도(ρ_p)는 2.4 g/cm³로 계산하였다.

$$\varepsilon_b = 1 - \frac{W}{\rho_p L_c} \tag{2}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 분진층 비저항(K₂)

본 연구에서는 laminar flow 하의 정속여과 조건에서 필터매체의 단위 면적에 대한 분진 질량 밀도(W)에 따른 필터 저항(S)을 식(3)과 같이 정의하여 세 가지 필터에 대해 여과속도와 분진농도 변화에 따라 도시하고, 그 기울기로부터 분진층 비저항값을 비교하고자 하였다. 식(3)은 필터를 사용한 분진 여과시 분진이 필터 내부와 표면에 쌓임으로써 압력강하의 증가를 유발한다는 기본적인 논리에 의한 filter drag model이다(Thomas et al., 2001; Williams et al., 1940).

$$S = \frac{\Delta P}{u} = S_E + K_2 W \tag{3}$$

여기서 S_E는 여과하기 전의 신규 필터의 drag를 의미하고, K₂는 μ/ke₀으로 정의된다. 이때, k는 분진층의 유체투과도(permeability)라고 불리며, μ는 유체의

점도이다. 그러나 본 연구에서는 K_2 에서 μ 를 독립해 내어 분진층의 단위 질량당의 필터 drag인 분진층 비저항으로 정의함으로써 Kozney-Carman 식에 대입하여 분진층의 공극률을 보다 용이하게 산출할 수 있도록 하였다.

$$S = \frac{\Delta P}{u} = S_E + K_2' \mu W \quad (4)$$

이러한 비저항은 다공성 매체의 구조와 운전조건을 표준화시켰을 때의 상대적 특성을 비교할 수 있는 개념이다. 따라서 여과집진 공정에서 여과속도, 분진농도, 기타 유체 흐름의 다양한 조건에 따라 형성되는 분진층의 구조를 유추하거나 결정할 수 있을 것으로 믿는다. 면밀한 분진층 구조 관찰을 통하여 비저항을 최소화시키는 공정을 설계함으로써 여과효율을 증대시킬 수 있다.

3. 1. 1 여과속도의 영향

필터매체 및 분진층의 압력강하는 여과속도와 밀접한 관계가 있다. 특히 고체 입자 충전층 구조의 필터에 있어서 여과속도가 증가할수록 미세 분진 입자는 필터 유로를 따라 내부로 더 깊숙이 침투되어 필터 기공벽에 부착되거나 막힘 현상(clogging)을 일으킨다. 이때, 필터 기공보다 큰 입자는 확산(diffusion)보다는 관성충돌(inertial impaction), 직접차단(direct interception) 및 되튀임(rebound) 현상에 의해 필터 표면 위에 지속적으로 쌓이게 되어 불안정한 분진층을 형성함으로써 분진을 포함한 유체 흐름에 대한 저항이 커지게 된다. 일반적으로 여과속도가 증가할수록 압력강하도 비례하여 증가한다(Silva et al., 1999; Koch et al., 1992; Heertjes, 1957)

본 연구에서는 세 가지 필터에 대하여 분진농도를 5 g/m^3 로 정하여 여과속도 0.10, 0.15, 0.19 m/s에 따른 S-W 그래프를 도시하였다(그림 5). 위의 식(4)로부터 S-W 그래프에서 나타내는 기울기는 $K_2' \mu$ 가 되고, 실험을 실시한 실온(25°C)에서 공기 유체의 점도(μ)는 $0.17 \times 10^{-4} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 이므로, 분진층 비저항 값인 K_2' 를 계산을 통해 얻을 수 있다(표 2 참조).

그림 5는 세 가지 필터 모두 여과속도가 증가함에 따라 분진층 비저항도 조금씩 증가하고 있음을 보여 준다. 그 중 기공 크기 및 공극률이 가장 큰 metal fiber 필터가 여과속도에 따라 가장 낮은 비저항값을

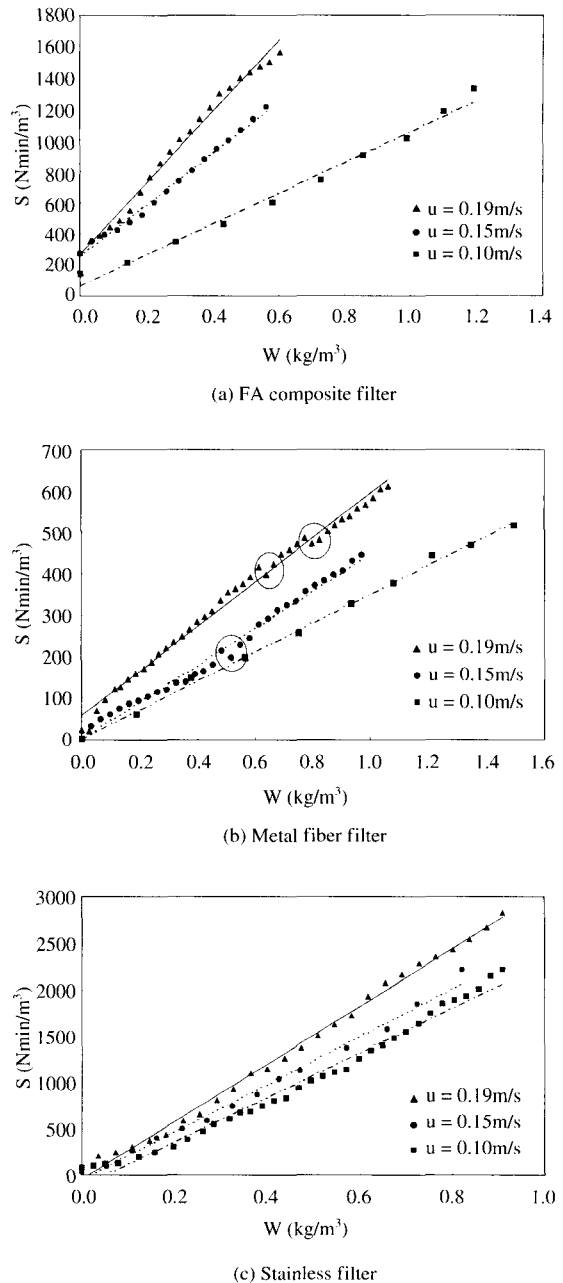


Fig. 5. Filter drag vs. areal density with filtration velocity at dust concentration of 5 g/m^3 .

나타내었다. FA 복합 세라믹 필터의 경우, 박막(두께 $95 \mu\text{m}$)임에도 불구하고 여과속도가 증가함에 따라 현저하게 분진층 비저항이 증가함을 확인할 수 있는

Table 2. Specific resistance (K_2') of dust layer with filtration velocity at feed concentration of 5 g/m³.

Filtration velocity (m/s)	K_2' (m/kg)		
	FA composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter
0.10	3.50×10^9	1.21×10^9	8.51×10^9
0.15	5.89×10^9	1.57×10^9	9.13×10^9
0.19	8.07×10^9	1.87×10^9	10.95×10^9

데, 이는 미세 입자가 유체 흐름을 따라 이동하지 않고 브라운 운동(Brownian motion)을 함으로써 필터 내부로 계속적으로 침투하게 되어 필터매체와 분진층의 기공을 축소시키기 때문인 것으로 사료된다.

Metal fiber 필터는 기공 크기가 다른 필터(30.5 μ m)에 비해 매우 크지만, 섬유상 형태의 Fe-Ni-Al 합금 이어서 분진 포집시 정전기 효과(Electrostatic effect)에 의해 필터 기공보다 더 작은 크기의 입자까지도 포집할 수 있다. 본 metal fiber 필터 또한 대체적으로 여과속도가 증가함에 따라 분진층 비저항은 증가하는 경향을 보이고 있지만, 기공 크기가 비정상적으로 큰 부분은 분진층이 다른 지점보다 얇게 쌓이고, 여과가 계속 진행되면서 분진층이 붕괴되는 경향을 보인다. 이러한 불균일한 분진층은 하나의 pin-hole로 작용하여, 저항을 덜 받는 쪽으로 유체가 흐르려는 '채널링 현상(channeling effect)'이 일어남으로써 그 부분에서 입자 통과(particle penetration)가 집중적으로 발생하여 여과효율도 떨어지게 된다. 따라서 그림 5(b)에서의 점선 원형으로 표시한 바와 같이 부분적으로 압력강하가 갑자기 감소하는 경향을 보인다. 그러나 스텐레스 필터의 경우, 필터매체의 두께가 다소 두껍고(1.65 mm), 기공크기가 가장 작으므로 초기 저항은 다른 필터에 비해 크다. 그러나, 분진여과가 진행되면서 기공의 열린 크기보다 큰 대부분의 분진입자가 필터 표면 위에 바로 쌓임으로써 높은 다공성의 분진층을 형성하여 내부여과(depth filtration)보다 표면여과(surface filtration)가 지배적으로 이루어져 여과속도에 따른 분진층 비저항 변화가 크지 않았으며, 실질적으로 분진층에 의한 여과가 훨씬 효과적으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

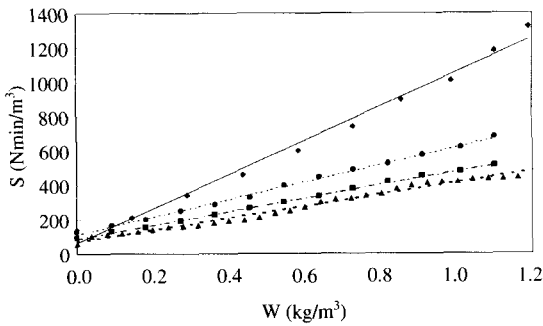
표 2에 요약된 비저항 값의 변화를 관찰해 보면 비저항의 절대값은 스텐레스 필터 위에 형성된 분진층이 가장 큰 값을 보이고 있으나, 유속 증가에 따른 변화율을 FA 복합 세라믹 필터에서 나타나고 있다.

결국 필터매체의 구조에 따라 표면에 형성되는 분진층의 구조가 다양하게 발견된다. 표 2로부터 미루어 짐작할 수 있는 사실은 필터매체의 자체 저항이 클수록 여과되어 쌓이는 분진층이 보다 조밀하고 정연하게 형성됨으로써 그 비저항 값이 훨씬 크게 나타나는 것으로 사료된다. 한편, 스텐레스 필터나 metal fiber 필터와는 다른 구조로 구성되어 있는 FA 복합 세라믹 필터는 유속에 따른 증가율이 눈에 띄게 크게 나타난다. FA 복합 세라믹 필터는 섬유상이 아닌, 세라믹 알갱이의 입자 고정층인 바, 다른 두 가지 필터와는 상이한 변화율을 보여준다. 결국 다공성 입자 고정층을 흐르는 유체의 저항력과 섬유상 필터에서 발생하는 반발력에 근본적인 차이가 있는 것으로 판단된다.

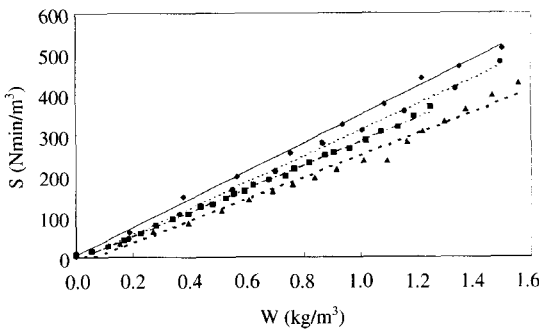
3. 1. 2 분진농도의 영향

배출 가스에 포함된 분진 농도(분진 질량/가스 부피)는 분진층의 형성속도 뿐만 아니라 분진층의 형성 구조와 관련하여 분진층의 모세관 분포 및 공극률에도 영향을 준다. 이러한 분진층 구조에 대한 분진 농도의 영향은 분진층 비저항 값으로 간접적으로 유추할 수 있다. 분진층 비저항은 다양한 분진 농도에서 식(4)로부터 총 필터 저항(S: 총 압력강하/여과속도)에 대하여 분진 면적에 따른 질량 밀도(W)의 함수로써 나타낼 수 있다.

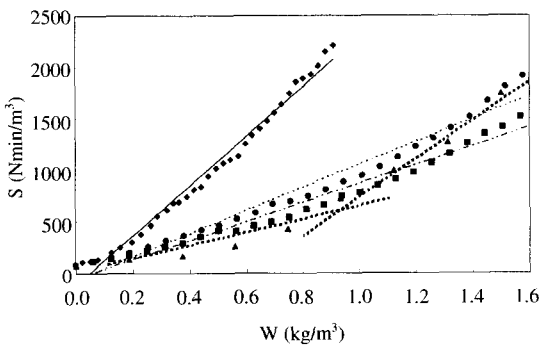
본 연구에서는 분진농도 변화에 따라 분진 면적 질량 밀도(W) 대 필터 저항(S)의 상관관계를 도출하여 그 기울기로부터 분진층 비저항 값을 산출하고 필터 구조가 다른 세 가지 종류의 필터에 대하여 비교하였다. 실험에 있어서 일정한 양과 속도로 분진 입자가 규칙적으로 주입되었다 하더라도 분진 입자가 이동하면서 관 벽에 조금씩 부착되어 분진의 질량유실이 발생하므로, 최종 필터 모듈로 일정 농도로 정확하게 조절하여 공급하기는 매우 어렵다. 따라서 수 회의 반복 실험을 통하여 5, 10, 15, 20 g/m³에 근사하는 분진농도 값을 찾음으로써 데이터의 신뢰성을 높이고자 하였다. 그림 6은 실온에서 세 가지 필터에 대하여 가장 안정된 여과속도인 0.1 m/s에서 분진농도에 따른 필터 저항의 변화를 보여주고 있다. 표 3과 문헌에서 예측된 바와 같이 세 가지 필터 모두 대체적으로 낮은 분진농도에서 더 높은 분진층 비저항을 나타내었다(Heertjes, 1957). 즉, 분진 입자



(a) FA composite filter



(b) Metal fiber filter



(c) Stainless filter

● conc. = 5 g/m³ ● conc. = 10 g/m³ ■ conc. = 15 g/m³ ▲ conc. = 20 g/m³

Fig. 6. Filter drag vs. areal density with dust concentration at filtration velocity, 0.1 m/s.

들은 입자들의 이동 속도 차이에 의해 더 낮은 농도에서 보다 밀집된 분진층 구조를 형성한다. 저 농도에서, 입자들은 유체 흐름에 따라 층류형태로 흐르고, 필터매체의 기공이나 분진층 기공 채널로 들어가 열

Table 3. Specific resistance (K_2') of dust cake with dust concentration at the filtration velocity, 0.1 m/s.

Dust concentration (g/m ³)	K_2' (m/kg)		
	FA composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter
5	3.50×10^9	1.21×10^9	8.51×10^9
10	1.79×10^9	1.13×10^9	3.93×10^9
15	1.38×10^9	1.03×10^9	3.24×10^9
20	1.21×10^9	0.94×10^9	-

린 통로를 차단(blocking)시키는 역할을 한다. 그러나 분진의 농도가 증가함에 따라 기공 채널에 동시적으로 도착하는 입자량이 증가하여 입자들끼리 가교(bridge)를 형성하기도 하면서 차단 효과는 감소된다. 분진 입자들이 필터 매체에 도달함에 따라 입자들은 필터 표면이나 이미 분진층을 구성하고 있는 입자들로 인해 되튀게 된다. 그러면 뒤에 따라오는 분진 입자들은 더 안정된 지점을 찾아 침착된 분진층 쪽으로 투과될 것이다. 이런 경우에, 필터와 가깝게 쌓인 분진층은 depth filtration의 역할을 하는 또 다른 필터매체로 작용하고, 한층 밀집된 분진층을 형성한다. 하지만 전체적인 평균 분진층의 비저항으로 볼 때는 분진농도가 증가함에 따라 기공의 차단 효과가 감소하므로 궁극적으로 감소하는 경향을 보인다.

FA 복합 세라믹 필터는 공극률이 50% 이상이면서, 고체 입자 충전층 형태로 구성되어 있어 필터를 통과하는 유체의 투과율이 우수하다. 또한 분진여과시 필터매체 보다 필터 표면에 형성된 분진층에 의해 여과가 주로 이루어지므로, 전체적으로 분진의 공급 농도가 증가함에 따라 분진층의 공극률이 증가하며, 상대적으로 비저항은 감소하였다. Metal fiber 필터의 경우 평균 기공 크기가 30.5 μm 정도로 다른 필터에 비해 매우 크기 때문에, 분진농도가 증가함에 따라 가교(bridging) 현상이 제대로 일어나지 않게 된다. 분진의 상당한 양이 필터 내부에 침착되고, 필터를 통과하는 양도 많아져 여과효율이 현저하게 떨어지며, 동시에 분진층 비저항도 점차 감소하였다. 즉, metal fiber 필터의 분진층 비저항 감소는 분진층의 다공성 증가 때문이 아니라 불규칙하게 형성된 필터 자체의 큰 기공으로 인해 분진층이 불안정하게 형성되어 분진층이 쉽게 붕괴되거나 변형되는 부분에서 분진 입자들이 집중적으로 통과되기 때문인 것으로

판단된다. 한편, 스텐레스 필터의 경우, 그림 6(c)에서 볼 수 있듯이, 분진농도가 15 g/m³ 까지 증가할 동안에는 분진층이 비저항 값이 감소하지만, 20 g/m³ 농도 이상에서는 여과가 진행됨에 따라 갑작스럽게 분진 질량 밀도에 대한 비저항 증가율이 증가하는 경향을 보였다. 실제 필터가 여과할 수 있는 그 이상의 분진량이 투입되면, 분진입자들을 포집할 수 있는 안정된 분진층이 형성되기 이전에 필터 위에 많은 양의 분진입자들이 빠른 속도로 불안정하게 쌓임으로써, 실질적으로 필터 위에 쌓인 분진층은 여과 기능을 제대로 수행할 수 있는 고정층이기 보다는 단지 유체 저항만을 증가시키는 장애물로 밖에 역할을 하지 못한다. 또한 많은 양의 분진층이 계속적으로 쌓이게 되면, 하부 분진층이 상부 분진층의 무게를 이기지 못하고 붕괴되어 보다 더 조밀하게 분진층을 형성시키기 때문에 그림 6(c)와 같이 갑작스럽게 분진층 비저항이 증가하는 것으로 판단된다.

따라서 필터 구조가 다른 세 가지 필터 중 낮은 분진층 비저항과 높은 여과효율을 동시에 만족하면서 분진층에 의한 여과 성능이 가장 우수한 필터는 박막형 FA 복합 세라믹 필터였으며, 그 때의 여과속도와 분진농도 조건은 각각 0.1 m/s와 5 g/m³임을 확인할 수 있었다. 그러나 이러한 결과는 본 연구에서 실험실 규모의 범위에 대한 것이며, 이론적 메커니즘을 규명하기 위한 연구인 바, 실제 현장에 유사한 규모 및 조건의 여과속도와 분진농도에 따른 여과 실험을 통하여 보다 실질적인 자료 구축이 뒤따라야 하겠다.

3.2 분진층 공극률(ϵ_c)

분진층 공극률은 분진층 구조 및 유체 저항과 분진층 제거에 필요한 에너지 양을 결정하는 데 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 필터 표면에 형성된 분진층은 부서지기 쉽고 압축성을 고려해야 하기 때문에 사실상 측정장치로 분석하기가 거의 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 laminar flow 조건에서 여과과정 동안 필터 위에 형성된 분진층을 또 다른 입자 고정층으로 가정하고, 일반적으로 고정층의 유체 흐름 해석에 주로 사용되고 있는 Kozeny-Carman 식을 이용하여 아래의 식(5)와 같이 분진층 저항에 관한 식으로 정리하여 표현함으로써 각각의 공극률을 계산하였다. 식(5)의 정의로부터 분진층 공극률(ϵ_c)은

분진층을 구성하는 분진 입자 크기($D_{c,p}$), 분진 면적에 따른 질량 밀도(W), 분진층 두께(L_c)에 의해 영향을 받으며, 결국 분진층의 공극률이 분진층 비저항 값(K_2')을 결정지음을 알 수 있다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 분진층이 매우 약하게 형성되어 있기 때문에 실질적으로 분진층의 공극률을 측정하기가 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서는 역으로 여과 실험으로부터 먼저 분진층의 비저항 값을 구한 후, 그 값을 식(5)에 대입하여 여과속도와 분진농도에 따른 분진층의 공극률(ϵ_c)을 Newton-Raphson 계산 방법을 통해 산출하였다. 그리고 분진층의 공극률을 식(2)에서 구한 겉보기 공극률(ϵ_b , bulk cake porosity) 값과 비교함으로써 실제 여과 과정 동안에 일어나는 분진층 구조 변화를 간접적으로 평가하고자 하였다. 식(2)와(5)는 실험적으로 얻은 평균 공극률 값이긴 하지만, 식(5)는 분진층 구조에 의해 잠재적으로 영향을 받은 K_2' 값이 포함되어 있다는 점에서 여과 과정 동안 일어날 수 있는 메커니즘을 고려하지 않은 겉보기 공극률보다 더 중요한 의미를 가진다.

$$K_2' = \frac{180L_c}{D_{c,p}^2 W} \frac{(1 - \epsilon_c)^2}{\epsilon_c^3} \quad (5)$$

표 4와 5는 각각의 여과속도와 분진농도에 따른 분진층 비저항 값을 식(5)에 대입하여 구한 분진층의 공극률과 식(2)로부터 구한 겉보기 공극률을 각각 비교하여 나타낸 것이다. 이 때 분진층을 구성하는 평균 입자 크기($D_{c,p}$)는 8 μm 였으며, 분진 면적에 따른 질량 밀도(W)와 분진층 두께(L_c)는 여과과정이 끝난 후 분진층이 쌓인 필터에 의해서 결정되므로, 필터를 조심스럽게 다루어 0.0001 g 단위의 전자저울과 0.001 mm 단위의 dial height gauge를 이용하여 분진량과 두께를 각각 정확히 측정하였다. 또한 겉보기 공극률을 계산할 때, 석탄회 분진 입자의 진 밀도(ρ_p)는 2.4 g/m³로 정하여 계산하였다.

앞에서 살펴보았듯이, 여과속도가 증가할수록 분진층의 비저항은 비례적으로 증가하지만, 분진농도는 저농도의 공급상태에서 높은 분진층 비저항을 나타내었다. 일반적으로 저항의 증가는 분진층의 압축 효과의 원인이 된다. 표 4와 5로부터 여과속도가 증가함에 따라 공극률은 감소하지만, 분진농도에 따른 변화는 그 반대의 경향을 보였다. 분진층의 표면 부근에서는 분진 입자들이 분진층의 열린 채널의 차단(blocking) 보

Table 4. Comparison of dust cake porosity (ϵ_c) and bulk cake porosity (ϵ_b) with filtration velocity at feed concentration of 5 g/m³.

Filtration velocity (m/s)	Cake porosity (ϵ_c)			Bulk cake porosity (ϵ_b)		
	FA composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter	FA composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter
0.10	0.70	0.67	0.53	0.76	0.71	0.61
0.15	0.58	0.63	0.49	0.62	0.69	0.59
0.19	0.42	0.59	0.45	0.56	0.63	0.54

Table 5. Comparison of dust cake porosity (ϵ_c) and bulk cake porosity (ϵ_b) with dust concentration at filtration velocity, 0.1 m/s.

Dust conc. (g/m ³)	Cake porosity (ϵ_c)			Bulk cake porosity (ϵ_b)		
	FA composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter	FA composite filter	Metal fiber filter	Stainless filter
5	0.70	0.67	0.53	0.76	0.71	0.57
10	0.75	0.69	0.71	0.78	0.74	0.79
15	0.80	0.72	0.73	0.82	0.78	0.82
20	0.83	0.75	-	0.92	0.80	-

다는 직접차단, 관성충돌, 되튀임(rebound) 현상이 주로 일어나 높은 다공성 구조를 보이므로, 분진층의 수직적인 분포 차이를 고려해야 한다. 그러나 실질적으로 분진층의 비저항을 크게 좌우하는 것은 미세 입자의 기공 차단과 분진층의 압축효과임을 실험 결과로부터 예측할 수 있다.

겉보기 공극률(ϵ_b)은 분진층의 실제 공극률(ϵ_c)보다 다소 과대하게 추정되었는데 이러한 이유는 겉보기 공극률의 경우, 여과 과정동안 일어날 수 있는 메카니즘을 고려하지 않은 채, 단지 분진입자의 밀도(ρ_p), 분진층 높이(L_c)와 분진 질량 밀도(W) 만으로 계산하였기 때문이다(식(2) 참조). 즉, 같은 분진층 높이와 같은 분진 질량 밀도일지라도, 여과속도가 빠르면 분진층을 형성하는 입자들을 압축하는 효과가 커져 더 밀집된 분진층을 형성하고, 분진농도가 낮으면 입자들은 유체 흐름에 따라 같은 유로를 흐르고, 필터매체의 기공 채널로 스며들어가 열린 통로를 차단시켜 분진층의 기공 분포를 변화시킨다. 따라서 분진층의 구조를 해석하는데 있어서 겉보기 공극률(ϵ_b)보다 실제 여과 실험으로부터 얻어진 분진층 비저항 실험값을 적용하여 분진층 공극률(ϵ_c) 값을 추정하는

것이 신뢰성이 더 높다고 말할 수 있다.

세 가지 필터에 대한 분진층 공극률(ϵ_c)을 일정한 여과속도와 분진농도에서 비교해 본 결과, FA 복합 세라믹 필터는 다공질 구조의(두께 95 μ m) 박막형태이므로 필터매체에 대한 유체 저항이 상대적으로 적게 걸린다. 따라서 필터 표면에 형성되는 분진층이 필터매체에 의한 영향을 거의 받지 않고, 높은 다공성의 고정층 형태로 형성되는 것을 확인할 수 있었다. metal fiber 필터는 필터의 평균 기공 크기가 30 μ m 이상 정도로 매우 크고, 표면여과(surface filtration) 보다는 내부여과(depth filtration)가 주로 일어나 사실상 필터 표면에 분진 입자들의 응집(lump)이나 가교(bridging) 현상이 얼마나 밀집되어 발생하느냐에 따라 분진층의 공극률이 좌우됨을 확인할 수 있었다. 마지막으로 스텐레스 필터의 경우, 다른 필터에 비해 두께가 다소 두껍고(1.65 mm), 미세 분진이 필터의 기공을 차단함으로써 여과 초기 단계에서부터 분진을 포함한 채 흐르는 유체에 대한 투과 저항이 크다. 따라서 필터 위에 쌓인 분진층이 필터매체 자체의 높은 저항에 의해 여과분리가 진행된다. 따라서 분진층은 계속적으로 압축되어 분진층 공극률이 다른 필터에 비해 다소 작게 형성되는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자체 제작한 석탄회 FA 복합 세라믹 필터와 합금 섬유를 이용하여 구성한 metal fiber 필터, 그리고 상용화되고 있는 스텐레스 필터를 이용하여 낮은 Reynolds 수 범위 내에서 분진여과 실험을 실시하면서 필터 표면에 형성되는 분진층의 구조를 관찰하였다. 이러한 구조를 간접적으로 평가할 수 있는 분진층의 비저항(K'_2)은 여과속도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하였으며, 세 가지 필터 가운데 필터매체의 기공 크기가 가장 큰 metal fiber 필터가 가장 작은 비저항값을 보여줌으로써 여과 필터의 구조가 분진층의 구조에 영향을 미침을 확인하였다. 분진의 공급농도에 따른 비저항을 관찰한 결과 미세 입자에 의한 분진층의 기공 차단으로 저 농도의 공급 상태에서 높은 비저항을 나타내었다.

Laminar flow에서 여과과정 동안 필터 위에 형성

되는 분진층을 또 다른 입자 고정층으로 가정하고, Kozeny-Carman 식을 이용하여 분진층의 공극률(ϵ_c)을 추정함으로써 각각의 구조를 비교, 규명하였다. 미세 입자의 기공 차단과 분진층 압축효과의 증가에 의해 여과속도가 증가함에 따라 분진층의 공극률은 감소하였고, 분진 농도에 의한 효과는 그 반대의 경향을 보였다. 또한 상대적 비교를 위하여 겉보기 공극률(ϵ_b)을 계산해 본 결과, 겉보기 공극률은 여과과정 동안 일어날 수 있는 분진여과 메카니즘이 고려되지 않았기 때문에 다소 과대하게 추정되는 것으로 확인할 수 있었다. 따라서 분진여과시 형성되는 분진 고정층은 비저항을 측정함으로써 그 구조를 예측하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R02-2002-00164-0) 지원으로 수행되었습니다.

Nomenclature

C	Dust concentration	kg/m ³
D _p	Particle diameter of media	m
D _{c,p}	Particle diameter of dust layer	m
K ₂	Resistance of dust layer	N-min/kg-m
K ₂ '	Specific resistance of dust layer	m/kg
L _c	Dust layer thickness	m
N _{Re}	Reynolds number	
ΔP	Pressure drop	N/m ²
ΔP _c	Pressure drop across dust layer	N/m ²
ΔP _m	Pressure drop over medium	N/m ²
S	Filter drag	N-min/m ³
S _E	Clean filter drag	N-min/m ³
t	Filtration time	s
u	Superficial fluid velocity	m/s
W	Areal mass density	kg/m ²

ε	Porosity of medium	
ε _b	Bulk porosity of dust layer	
ε _c	Dust layer porosity	
ρ	Fluid density	kg/m ³
ρ _p	Particle density	kg/m ³
μ	Viscosity	Ns/m ²

참고 문헌

Carman, P.C. (1937) Fluid flow through granular bed, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 15, 150-166.

Heertjes, P.M. (1957) Studies in filtration, *Chemical Engineering Science*, 6, 269-276.

Jo, Y.M., R. Huchisom, and J.A. Raper (1996) Preparation of ceramic membrane filters, from waste fly ash, suitable for hot gas cleaning, *Waste Management & Research*, 14, 281-295.

Jo, Y.M. and J.A. Raper (1997) Experimental study of airborne particulate filtration using thin ceramic composite membrane filters, *Trans IChmeE*, 75(B), 164-170.

Koch, D., W. Cheung, J.P.K. Seville, and R. Clift (1992) Effects of dust properties on gas cleaning using rigid ceramic filters, *Filtration & Separation*, 337-345.

Kozeny, J. and S. Ber (1927) *Wiener Acad. Abt.*, 136(II a), 271-306.

Leith, D. and R.W.K. Allen (1986) Dust filtration by fabric filters, *Progress in Filtration and Separation*, 4, 1-54.

Silva, C.R.N., V.S. Negrini, and A.J.R. Cour (1999) Influence of gas velocity on cake formation and detachment, *Powder Technology*, 101, 165-172.

Thomas D., P. Penicot, P. Contal, D. Leclerc, and J. Vendel (2001) Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study, *Chemical Engineering Science*, 56, 3549-3561.

Williams, C.E., T. Hatch, and L. Greenburg (1940) Determination of clothes area for industrial air filters, *Heating, Piping and Air Conditioning*, 12, 259-263.