

투과율에 따른 백-형상의 필터 표면에서의 유동속도 및 입자궤적 수치해석

박석주[†] · 이동근* · 이시훈

한국에너지기술연구원 청정시스템연구센터

305-343 대전시 유성구 장동 71-2

*충남대학교 기계공학과

305-764 대전시 유성구 궁동 220

(2006년 2월 9일 접수, 2006년 6월 8일 채택)

Computational Analysis of Flow Velocity and Particle Trajectory on the Surface of Bag-Shaped Filters with a Different Permeability

Seok Joo Park[†], Dong Geun Lee* and Si Hyun Lee

Clean Energy System Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 220, Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

(Received 9 February 2006; accepted 8 June 2006)

요 약

백-형상 필터의 투과율에 따른 필터 표면에서의 유동속도와 입자궤적을 수치해석 하였다. 필터의 투과율이 널리 사용되는 저급의 부직포 백필터의 투과율 이하의 조건에서는, 투과율에 따른 필터 표면에서의 유동속도와 입자궤적 분포의 변화가 아주 미미하였다. 필터의 바닥면 모서리와 출구 근처를 제외한 필터 표면에서 유선들과 반경 방향 유속들이 균일하게 분포하였다. 필터 표면으로의 입자궤적은 필터의 바닥면 모서리 근처에 더 조밀하게 분포하여 그 위치에 도달하는 입자의 수가 가장 많았고, 필터의 출구 쪽으로 향함에 따라 필터 표면에 위치하는 입자의 수는 점점 감소하는 추세를 보였다.

Abstract – Computational simulation was performed to analyze flow velocities and particle trajectories onto the surface of bag-shaped filters with a different permeability. When the permeability of a filter is lower than that of a low-efficient fabric bag-filter widely used, the distributions of flow velocities and particle trajectories on the filter surface were not different with decreasing the filter permeability. The distributions of streamlines and radial directional gas velocities were uniform on the filter surface except for the neighbors of the bottom edge and outlet of the filter. The particle trajectories onto filter surface were more densely distributed around the bottom edge of the filter, so that the particle number on the filter surface was maximized near the bottom edge and decreased in the direction of the filter outlet.

Key words: Bag-shaped Filter, Bag Filter, Candle Filter, Flow Velocity, Particle Trajectory, Particle Number on Filter Surface

1. 서 론

백-형상의 필터는 작은 체적 내에 높은 여과 면적을 보유할 수 있는 장점 때문에 산업용 여과 집진 장치에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 고분자 재질의 백-형상 필터는 상온 혹은 저온 공정에서, 금속 재질의 백-형상 필터는 중온 공정에서, 세라믹 재질의 백-형상 필터는 고온 공정에서 사용된다. 저온용 백-형상 필터는 일반적으로 ‘백필터’(bag filter)로, 고온용 백-형상 필터는 일반적으로 ‘캔들필터’(candle filter)라는 이름으로 널리 알려져 있다[1]. 이 백-형상 필터들은 하나

의 집진 용기(vessel) 내부에 여러 개의 필터들이 중력 방향으로 수직 설치되어 사용되며, 용기 내부로 유입되는 기체 내에 존재하는 입자상 오염물질인 분진들이 필터 표면에 여과 부착되어 집진된다. 집진된 분진층은 필터의 압력손실을 향상시키므로 필터 양단의 차압(pressure difference)이 일정 수준에 도달하게 되면 가스 유동 방향과 반대 방향으로 역 유동(reverse flow) 또는 역 펄스 분사(back pulse-jet) 등을 흘려줌으로써 필터 표면으로부터 탈진 분리되어 용기의 하부에 설치된 호퍼(hopper)에 저장된 후 제거된다[2].

백-형상 필터는 사용 공정과 운전 조건에 따라 그 재질뿐만 아니라 물리적 특성 또한 크게 차이가 난다. 물리적 특성 중 투과율(permeability)은 아주 중요한 필터의 물성치로써, 필터의 기공 특성

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sjpark@kier.re.kr

에 의하여 좌우된다. 필터의 투과율은 필터의 차압과 직접 연관되며, 투과율이 높을수록 필터의 차압은 낮아진다. 백필터 또는 캔들 필터와 같은 백-형상 필터를 이용한 집진장치에 관한 많은 실험과 수치해석 연구들이 수행되어 왔으나[3-10], 현재까지 필터의 투과율의 크기에 따른 필터 표면에서의 유체유동 및 입자궤적 분포의 변화에 관한 연구 결과는 아직 발표된 바가 없다. 본 연구에서는 유입 유동방향에 평행하게 설치된 하나의 백-형상 필터에 대하여, 필터의 투과율이 필터 표면에서의 유동속도와 입자 수의 분포에 미치는 영향을 살펴보기 위한 수치해석 연구를 수행하였다. 필터 표면에 도달하여 부착되는 분진 입자들의 부착 분포 상태는 필터의 여과 및 탈진 특성에 영향을 미치며, 최종적으로 필터의 수명과도 관련되어 있다[11].

2. 이론적 배경

수치해석의 편이성과 필터의 투과율에 따른 유동장 및 입자궤적에 관한 상대적 비교 분석을 위하여 집진장치의 구조를 Fig. 1에서와 같이 원통 형상의 튜브 용기(유입구 직경 120 mm) 내에 하나의 백-형상 필터가 튜브와 평행하게 설치된 구조로 단순화시켰다. 기존 사용되고 있는 소형 세라믹 캔들 필터의 형상을 기준으로 Fig. 1에서와 같이 필터의 두께는 10 mm, 외경은 60 mm, 내경은 40 mm, 길이는 500 mm로 정하였다. 필터는 하부 바닥면에 막혀 있고, 상부 출구가 개방되어 있는 형상이다. 본 수치해석 연구에서는 분진 입자들이 기체 유동을 따라 유입구를 통하여 집진 용기 내로 유입된 후, 모든 분진들이 필터를 관통하여 출구를 빠져나간다고 가정하였다. 실제로는 상당량의 분진 입자들이 필터 표면에 집진 부착되고 일부의 미세 분진들이 필터를 통과하여 빠져나가기지만, 본 수치해석에서는 입자의 궤적 추적에 관측하기 위하여 이와 같이 가정하였다.

집진장치 내의 유체유동 및 입자궤적을 해석하기 위하여 미국 Fluent사가 개발한 FLUENT 상용 프로그램을 사용하였다[12]. 입자상 물질을 함유하고 있는 비압축성 정상상태 2차원 축대칭 층류 유동을 수치해석하기 위하여 먼저 유체의 연속방정식과 반경 방향 R과 축방향 X 방향의 운동량 방정식을 계산하여 유체 유동장을 구한 후, 그 유동장 내에서의 입자의 운동과 궤적을 Lagrangian 입자궤적 추적모델(particle trajectory tracking model) 방정식으로부터 구하였다. 필터로의 평균 여과속도(filtration velocity)가 10 cm/s 이하일 때 유입되는 공기 기체를 기준으로 레이놀즈수(Re = ρuL/μ)는 층류 영역에 있으므로 위와 같은 절차에 따른 수치해석은 백-형상 필터를 관통하는 평균 유동장과 입자궤적 현상을 적절히 설명해 주는 계산 결과를 제시해 줄 것이다. 장치 내부의 유동장 및 입자궤적을 계산하기 위한 계산 격자는 기하학적 구조와 격자 제작용 소프트웨어인 GAMBIT 상용 프로그램을 이용하여 만들었다[13].

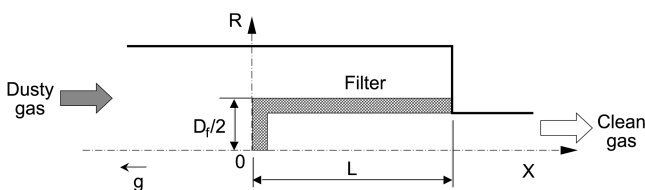


Fig. 1. Geometry of a filtration system.

2-1. 유체유동 지배방정식

정상상태 비압축성 층류 유동장을 해석하기 위한 연속방정식과 운동량 방정식은 다음과 같이 표현된다[14].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{2}$$

여기서 u_i 는 유체의 평균속도, ρ 는 유체의 밀도, p 는 평균 정압력, ν 는 유체의 동점성계수를 의미한다. 유입구에서는 질량유량 경계조건을 이용하여 공기가 유입되도록 하였고, 필터 출구에서는 노이만(Neumann) 경계조건을 설정하였으며, 벽면에서는 슬립없음(no-slip) 경계조건을 적용하였다[15].

2-2. 입자궤적 추적방법

유동장 해석이 완전히 수렴된 후, 형성된 유동장 결과를 이용하여 입자궤적을 계산하였다. 각 입자의 궤적은 입자의 관성력, 유체 저항력, 중력 항들로 이루어진 입자운동방정식을 시간에 대하여 적분하여 입자의 속도 u_p 를 구한 후, 그 속도를 다시 적분하여 구한다. 예로써 축방향 X의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{du_x}{dt} = F_D(u_p - u) + g_x(1 - \rho/\rho_p) \tag{3}$$

여기서 $F_D(u_p - u)$ 는 단위 입자질량에 작용하는 유체의 저항력을 의미하며, F_D 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2 24} \tag{4}$$

여기서 u 는 유체 속도, u_p 는 입자 속도, ρ_p 는 입자 밀도, d_p 는 입자 직경, μ 는 기체 점성계수를 의미한다. 입자와 유체 간의 상대속도의 함수로 정의되는 입자의 상대 레이놀즈수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \tag{5}$$

저항계수(drag coefficient) C_D 는 다음과 같이 정의되며,

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2} \tag{6}$$

계수 a_1, a_2, a_3 은 Moris와 Alexander[16]의 실험식으로부터 주어진다.

2-3. 다공성 매질 조건

FLUENT 상용 프로그램에서 유동장을 기로지르는 다공성 매질(porous medium)은 표준 유체유동 방정식의 운동량 원천항(source term)에서 다루어지도록 모델링되어 있다. 원천항은 아래와 같이 점성에 의한 손실항과 관성에 의한 손실항의 합으로 표현된다.

$$S_i = D_{ij} \mu_j + C_{ij} \frac{1}{2} \rho |u_j| u_j \tag{7}$$

여기서 D_{ij} 와 C_{ij} 는 각각 점성항과 관성항의 방향성 메트릭스를 의미하고, 균일 다공성 매질인 경우는 방향에 무관하므로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} u_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |u_j| u_j \quad (8)$$

여기서 a 는 투과율이고, C_2 는 관성저항계수이다. 원천항은 유체속도의 제곱법(power law)에 의하여 다음과 같이 다른 방식으로 표현될 수 있다.

$$S_i = C_0 |u|^{(C_1-1)} u_i \quad (9)$$

여기서 C_0 과 C_1 은 다공성 매질의 양단에 걸리는 여과속도에 대한 압력손실 특성 곡선으로부터 경험적으로 결정될 수 있다. 일반적으로 다공성 매질을 통한 유체 유동 속도가 낮은 경우는 점성항에 비하여 관성항의 영향이 아주 작아서 관성항을 무시할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 $C_1=1$ 로 두어 필터 영역에서의 운동량 원천항이 여과속도에 선형적으로 비례하도록 하였다. 그럼으로써 (8)식의 점성항과 (9)식의 관계로부터 C_0 을 조정하여 필터의 투과율을 설정하였다.

3. 수치해석 결과

백·형상 필터는 Fig. 1과 같이 축대칭 구조이기 때문에 중심축을 기준으로 1/2의 대칭면에 대해서만 계산을 수행하였다. 집진장치 내로 유입되는 유체의 온도와 정압력 조건은 계산의 편이를 위하여 표준 조건(standard temperature and pressure condition)으로 설정한 상태에서 여과속도와 입자크기에 대하여 각각의 필터 투과율에 따른 유동장과 입자거동을 해석 비교하였다.

필터의 투과율에 따른 필터 양단의 압력손실을 계산한 결과, Fig. 2에서와 같이 여과속도가 증가함에 따라 압력손실은 증가하였고, 투과율이 낮아질수록 또한 압력손실이 증가하였다. 일반적으로 여과속도 5 cm/s 조건에서 고분자섬유로 이루어진 일반 백필터의 압력손실은 100 Pa 이하이며, 세라믹 캔들 필터의 압력손실은 1,000 Pa 이하에 달한다. 즉, Fig. 2로부터 일반 백필터의 투과율은 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 이상이며, 세라믹 캔들 필터의 투과율은 $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 이상임을 의미한다. 필터의 압력손실을 여과속도로 나눈 저항값(resistance)은 여과속도에 거의 무관하게 필터 투과율에 대하여 로그-로그그래프에서 $dP/V_f = 2.3 \times 10^{-7}/a$ 의 관계식으로 표시될 수 있다. 투과율이 높은 경우 여과속도 영역에서 저항값에 약간의 차이를 보이는데, 이는 투과율이 높은 필터를 유체가 통과하는 경우 (8)식에서 점성항에 대한 관성항의 영향이 상대적으로 높아져 관성에 의한 필터 저항 효과가 미미하게나마 작용하기 때문이다.

여과속도가 2 cm/s일 때 필터의 투과율 변화에 따른 유체 유선(streamline)을 계산한 결과, Fig. 3(a)에서 투과율이 무한대일 경우, 즉 필터가 설치되어 있지 않은 경우, 집진장치 출구로 수축(contraction)되어 빠져나가는 유선들을 보이고 있다. 그러나 Fig. 3(b)에서 투과율이 $1.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 로 높은 경우(예로써, 차압이 아주 낮은 메시(mesh)와 같은 가상의 필터가 설치되었다고 가정할 경우) Fig. 2에서 알 수 있듯이 압력손실이 아주 낮음에도 불구하고 유체 유선들은 필터의 저항으로 인하여 필터 표면에 수직으로 유입되는 것을 알 수 있다. 그러나 필터의 투과율이 아주 높기 때문에 필터를 가로지르는 유선이 필터의 출구 쪽에 조밀하게 분포하는 것을 알 수 있다. Fig. 3(c)에서 투과율이 $1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 로 낮은 경우(즉 여과효율이 아주 높은 고효율 필터나 멤브레인 구조의 금속소결 캔들 필터 및 세라믹

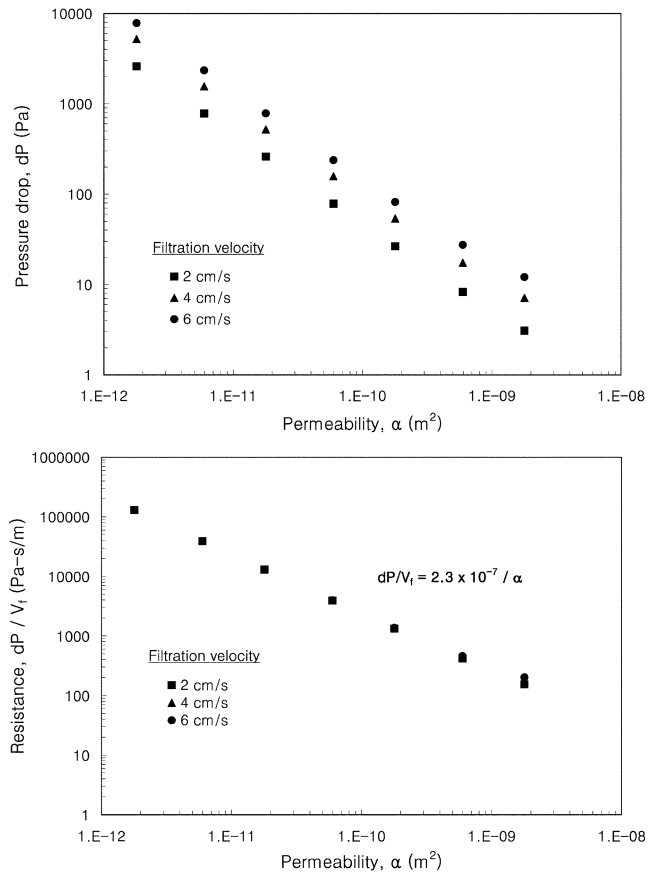


Fig. 2. Comparison of pressure drops and resistances along filter permeability.

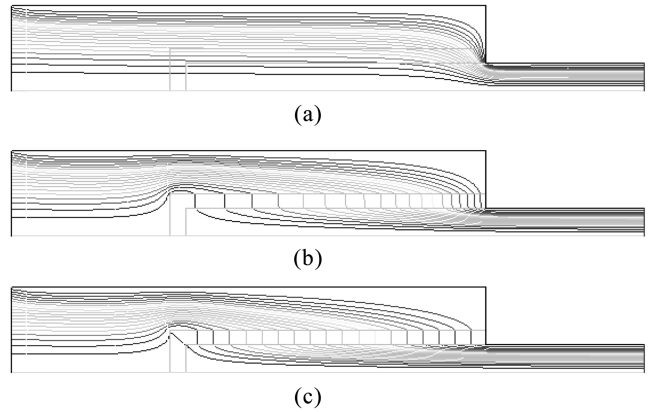


Fig. 3. Streamlines through filters with a different permeability at 2 cm/s in filtration velocity; (a) $a = \infty$, (b) $a = 1.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (c) $a = 1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$.

캔들 필터가 집진장치 내에 설치된 경우) Fig. 2에 나타난 바와 같이 압력손실이 아주 높기 때문에 유체 유선들이 필터 표면을 통하여 균일하게 분포하는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b), (c)의 유체 유선을 자세히 살펴보면, 필터의 바닥면 모서리 부분에서 유선의 곡률이 다른 영역에 비하여 급한 것을 알 수 있는데, 이는 필터의 바닥 다공면에 의한 축방향 유동의 저항으로 인하여 유동의 정체(stagnation) 현상이 발생하기 때문이다. 그러나 Fig. 4의 유체 속도

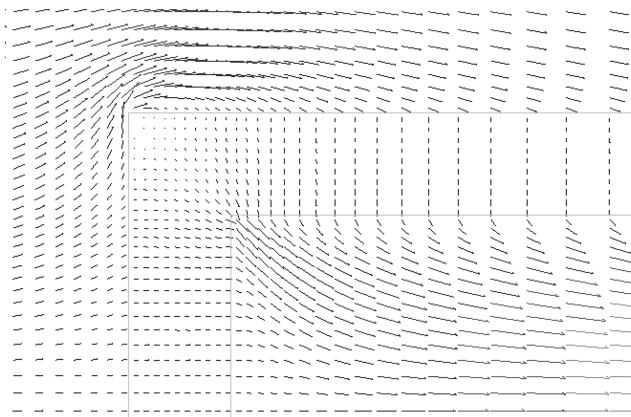


Fig. 4. Velocity vectors through a filter with $1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ in permeability at 2 cm/s in filtration velocity.

벡터에서 알 수 있듯이, 바닥면 모서리 부분에서 유동 박리(flow separation) 현상은 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

유체 유동을 좀 더 면밀히 관찰하기 위하여 집진장치의 원통 튜브와 평행한 필터 표면(즉, $R = D_f/2$ 인 면)에서의 여과속도에 대한 반경 방향 유속 비 V_r/V_f 의 분포를 분석하였다. Fig. 5에서와 같이 필터의 투과율이 무한대인 경우, 즉 필터가 없는 경우, 필터 표면에서의 반경 방향 유속 크기는 축방향을 따라 거의 0의 값을 유지하다가 필터 출구에 가까워짐에 따라 그 절대크기가 증가하고 필터 출구 ($X/L = 1$) 근처에서 급격히 감소하고 있다. 반경 방향 유속의 절대크기가 증가하는 것은 Fig. 3(a)의 유체 유선과 같이 필터 출구에 가까워질수록 유선들이 조밀해지는 수축유동(contraction flow)을 형성하기 때문이며, 다시 급격히 감소하는 것은 필터 출구 선상의 집진장치 끝벽(end-wall)에서 유속이 0이 되는 정체유동이 형성되기 때문이다. 필터 투과율이 $1.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 로 감소할 경우, 반경 방향 유속은 필터의 바닥면 모서리에 가까워질수록 급격히 증가하다가 바닥면 모서리를 지나자마자 급격히 감소한다. 이 유속의 급격한 증가는 필터로 향하여 집진장치 내부로 유입되는 유체 유동이 필터의 바닥면에 의하여 저항력을 받아 Fig. 3(b)와 같은 유동장을 형성하기 때문이다. 그리고 필터의 바닥면 모서리를 지나 하류방향

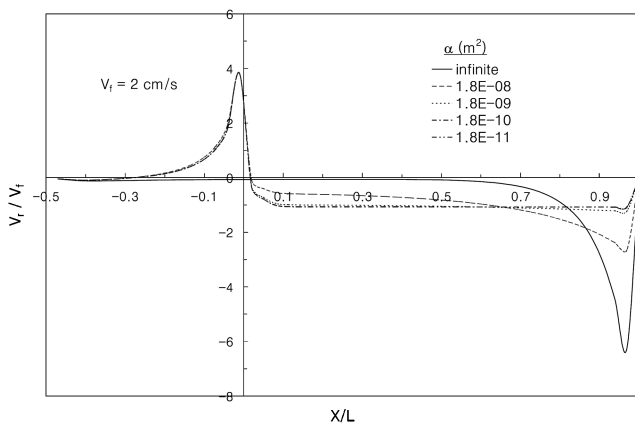


Fig. 5. Velocity distributions on filter surface ($R = D_f/2$) at different permeabilities.

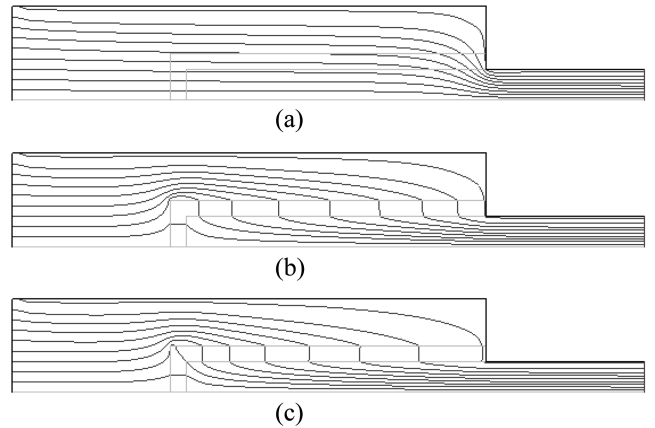


Fig. 6. Trajectories of particles of 1 μm in diameter through filters with a different permeability at 2 cm/s in filtration velocity; (a) $a = \infty$, (b) $a = 1.8 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, (c) $a = 1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$.

으로 이동함에 따라, Fig. 3(b)의 유선에 나타난 바와 같이 출구 쪽으로 유선들이 조밀하게 분포하는 것으로부터 알 수 있듯이, 역반경 방향(-R 방향)의 유속이 서서히 증가하다가 끝벽 근처에서 다시 급격히 감소한다. 그러나 필터의 투과율이 $1.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 보다 낮아질 경우, 필터 표면에서의 반경 방향 유속은 필터의 바닥면 모서리 근처와 출구 근처를 제외한 영역에서 일정한 분포를 보인다. 즉 투과율이 $1.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 보다 낮은 경우, 필터의 $R = D_f/2$ 표면의 대부분의 위치에서 기체 유속의 분포가 균일함을 알 수 있다. 다음으로, 여과속도의 증가에 따른 필터 표면에서의 여과속도에 대한 반경 방향 유속 비 V_r/V_f 의 분포를 해석한 결과, 투과율이 $1.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 보다 낮은 경우 여과속도에 따른 V_r/V_f 의 분포의 차이는 거의 없음을 알 수 있었다.

Fig. 6에서는 여과속도 2 cm/s에서 필터의 투과율에 따른 1 μm 직경의 입자 궤적을 계산한 결과를 보여준다. 투과율이 무한대일 때 입자계적은 Fig. 3(a)에서의 유선과 거의 유사한 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 6(b)과 Fig. 6(c)의 비교로부터 알 수 있듯이, 필터의 투과율이 낮아질수록 필터 표면에 도달하는 입자 궤적들이 필터의 바닥면 모서리 쪽으로 더 조밀해지는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서는 여과속도가 2 cm/s이고 투과율이 $1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 로 일정한 경우, 입자직경 크기에 따른 입자계적의 변화를 보여준다. 입자직경이 증가함에 따라 입자의 중력효과에 의하여 입자계적은 필터의 바닥면 모서리 쪽(즉 상류방향)으로 약간 천이하는 듯 보이나 그 차이는 미미한 편이다.

필터 투과율에 따른 필터 표면에 도달하는 입자 수의 분포 변화를 비교 분석하기 위하여, 집진장치 입구 선상에서 균일하게 유입되는 1,000개의 입자들 중 필터 표면에 도달하는 입자 수의 상대적인 분포를 알아보았다. Fig. 8에 나타난 바와 같이, 필터의 투과율이 무한대인 경우는 많은 입자들이 집진장치 하류 끝벽 쪽으로 유동을 따라 이동하기 때문에 가상의 필터 표면 선상($R = D_f/2$)에 도달하는 입자의 수는 하류 방향으로 갈수록 증가한다. 필터의 투과율이 낮아짐에 따라 입자들은 필터의 저항에 의하여 형성되는 유선을 따라 이동하여 필터 표면에 도달하므로 상류 부분의 필터 표면에서의 입자 수는 높아지고, 하류 부분의 필터 표면에서의 입자 수는 낮아진다. 그리고 이 입자 수 분포의 변화는 최종적으로 필터의

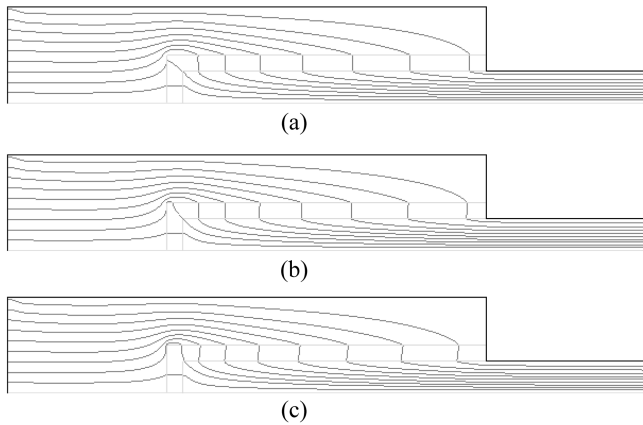


Fig. 7. Trajectories of particles of a different diameter through a filter with $1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ in permeability at 2 cm/s in filtration velocity; (a) $d_p = 1 \mu\text{m}$, (b) $d_p = 5 \mu\text{m}$, (c) $d_p = 10 \mu\text{m}$.

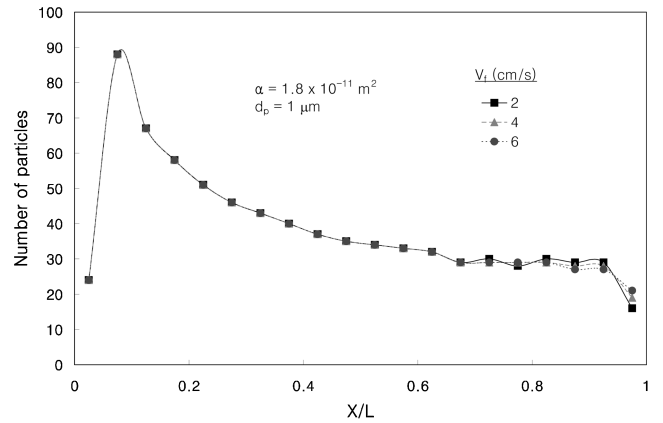


Fig. 9. Number distributions of particles located onto the surface of filters at different filtration velocities.

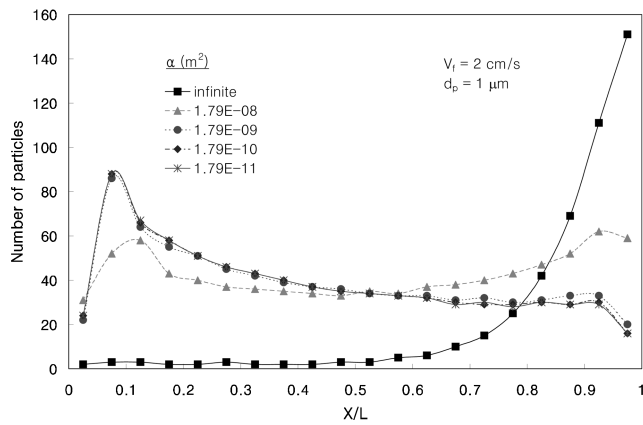


Fig. 8. Number distributions of particles located onto the surface of filters with a different permeability.

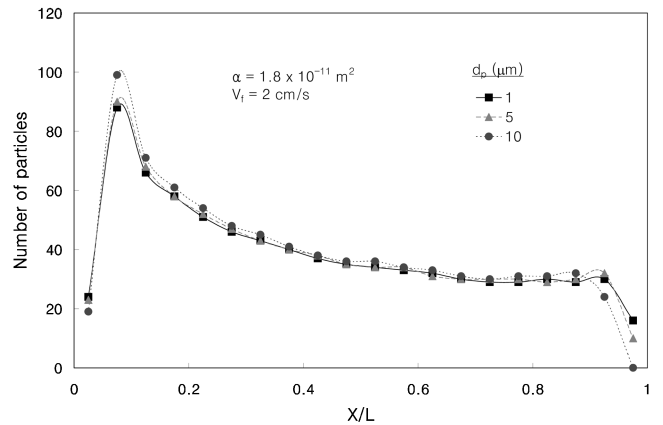


Fig. 10. Number distributions of particles of different diameters located onto the surface of filters.

투과율이 어느 수준 이하($\alpha < 1.8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$)가 되면 아주 미미해져 거의 차이가 없는 상태에 이르게 된다. 필터 표면에 도달하는 입자의 수는 필터의 바닥면 모서리를 바로 지난 위치에서 최대값을 보이며, 축방향을 따라 점점 감소하는 패턴을 보인다. 바닥면 모서리 근처의 필터 표면에 도달하는 입자 수가 가장 많은 이유는 필터의 막힌 면 쪽으로 유입되어 흘러들어오는 입자들 중 필터의 바닥 다공면으로 부착 또는 유출되지 못하는 입자들이 바닥면의 유동 저항에 의한 발생하는 정체유동을 따라 필터의 바닥면 모서리 근처로 밀집되기 때문이다. 그리고 입자 수가 최대인 점을 지나 다시 감소하는 이유는 필터 표면으로의 입자의 부착 또는 유출에 의하여 필터 바깥면을 따라 하류방향으로 흘러가는 입자들의 수가 상대적으로 감소하기 때문이다. 다음으로, 여과속도에 따른 필터 표면에서의 입자 수의 분포는 Fig. 9에서와 같이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 집진장치 끝벽 근처에서의 다소 미미한 차이는 여과속도가 클수록 집진장치 내부의 축방향 유속이 증가하여 끝벽 근처에 이르는 입자들의 수가 약간 증가하기 때문이다. 다음으로, 입자직경 크기에 따른 필터 표면에서의 입자 수 분포 또한 Fig. 10에서와 같이 큰 차이를 보이지 않는다. 입자가 클수록 필터의 바닥면 모서리 근처에서의 입자 수가 약간 높고 끝벽 근처에서의 입자 수가 다소 낮은 이유는

Fig. 7의 입자궤적 분포에서 설명한 바와 같이 큰 입자의 경우 주유동의 역방향인 상류방향으로 중력의 영향을 더 많이 받기 때문이다. 이상의 필터 표면에서의 입자 부착분포는 유체 유동 만에 의한 이상적인 경우로서, 실제 필터 표면에서의 입자 부착분포와는 다를 수도 있다. 일반적으로 여과집진기에서는 필터에 부착된 분진층을 제거하기 위하여 고압의 펄스 제트 유동을 필터 출구에서 역방향으로 분사시켜 주는데, 이때 분진층의 탈진율이 필터 표면의 위치에 따라 다르게 나타나기도 하며, 탈진되는 분진들의 재비산에 의하여 필터 표면으로의 입자의 재부착 현상이 불균일하게 일어나기도 한다. 또한, 중력에 의하여 매달려 있는 여과포 필터의 경우 탈진의 충격을 가장 많이 받는 출구 근처의 필터 기공들이 가장 크게 확대되고, 하부 쪽으로 갈수록 필터 기공들이 더 작게 밀착되어 필터 표면에서의 입자 부착분포가 불균일하게 나타나기도 한다.

4. 결 론

백-형상의 필터가 설치된 집진장치에서 필터의 투과율에 따른 필터 표면으로의 유체 유동장과 입자 거동에 관한 수치해석을 수행하였다. 투과율은 필터에 의한 저항값과 선형적 관계를 이루었으며, 여과속도의 변화에 따른 필터 저항값(여과속도에 대한 필터 차압의

비)의 차이는 거의 없음을 알 수 있었다. 일반적으로 널리 사용되는 백필터와 같이 높은 투과율을 보유한 필터가 집진장치에 설치된 경우에도 필터를 가로지르는 유선은 필터 표면에 수직하게 투과되었으며, 그 유선들은 백필터의 투과율 수준 이하의 조건에서 필터 표면에 균일하게 분포하였다. 그러나 일반 백필터의 투과율 이하의 조건에서 필터 표면에 도달하는 입자의 수 분포는 필터의 상류 바닥면 모서리 근처에서 가장 높고 하류로 갈수록 낮아지는 불균일한 분포를 보였으며, 필터 투과율, 여과속도 및 입자크기에 따른 필터 표면에서의 입자 수 분포의 차이는 아주 미미하였다. 즉 필터의 투과율이 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 이하(저항값이 200 Pa-s/m 이상)인 조건에서 필터 투과율의 감소에 따른 필터 표면에서의 균일한 가스 유속 분포와 불균일한 입자 수 분포의 변화는 거의 무시할 수 있다고 결론지을 수 있다.

사용기호

a_1, a_2, a_3	: drag coefficient constants
C_0	: empirical coefficients for filter loss [kg/m^4]
C_1	: empirical coefficients for filter loss
C_2	: inertial resistance factor [$1/\text{m}$]
C_D	: drag coefficient
C_{ij}	: inertial loss matrix [$1/\text{m}$]
D_f	: filter outer diameter [m]
D_{ij}	: viscous loss matrix [$1/\text{m}^2$]
d_p	: particle diameter [μm]
g	: acceleration of gravity [m/s^2]
g_x	: axial directional acceleration of gravity [m/s^2]
L	: filter length [m]
p	: mean static pressure [N/m^2]
R	: radial directional coordinate [m]
Re_p	: relative Reynolds number of a particle
S_i	: i-directional source term of fluidic momentum [$\text{kg/m}^2/\text{s}^2$]
u	: gas velocity in x direction [m/s]
u_i	: i-directional gas velocity [m/s]
u_p	: particle velocity in x direction [m/s]
V_f	: filtraton velocity [cm/s]
V_r	: radial directional gas velocity [m/s]
X	: axial directional coordinate [m]
x_i	: i-directional coordinate [m]

그리스 문자

a	: filter permeability [m^2]
μ	: fluid dynamic viscosity [$\text{kg/m}\cdot\text{s}$]
ν	: fluid kinetic viscosity [m^2/s]

ρ	: fluid density [kg/m^3]
ρ_p	: particle density [kg/m^3]

참고문헌

- Dickenson, T. C., *Filters and Filtration Handbook*, Elsevier Advanced Technology, Oxford, U.K.(1997).
- Ogawa, A., *Separation of Particles from Air and Gases*, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida(1984).
- Park, S. J., Choi, H. K., Kim, S. D. and Park, Y. O., "Effect of an Inner Tube on the Flow Field and Particle Behavior Inside a Bag Filter System with a Tangential Inlet," *J. Korean Inst. Chem. Eng.*, **39**(4), 438-445(2001).
- Lee, K. S., Woo, S. K., Han, I. S., Seo, D. W., Park, S. J. and Park, Y. O., "Filtering Characteristics of Porous SiC Filter with High Surface Area," *J. Ceram. Soc. Jap.*, **110**(7), 656-661(2002).
- Park, S. J., Choi, H. K., Park, Y. O. and Son, J. E., "Effect of a Shroud Tube on Flow Field and Particle Behavior Inside a Bag-Filter Vessel," *Aerosol Sci. Technol.*, **37**(9), 685-693(2003).
- Park, S. J. and Park, Y. O., "Computational Analysis of Particle Behavior in a Ceramic Candle Filter Vessel with an Inlet at Different Location," *Korean Chem. Eng. Res.*, **42**(5), 577-587(2004).
- Smith, D. H. and Ahmadi, G., "Problems and Progress in Hot-Gas Filtration for Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC) and Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)," *Aerosol Sci. Technol.*, **29**(3), 163-169(1998).
- Ahmadi, G. and Smith, D. H., "Particle Transport and Deposition in a Hot-Gas Cleanup Pilot Plant," *Aerosol Sci. Technol.*, **29**(3), 183-205(1998).
- Ahmadi, G. and Smith, D. H., "Gas Flow and Particle Deposition in the Hot Gas Filter Vessel at the Tidd 70 MWE PFBC Demonstration Power Plant," *Aerosol Sci. Technol.*, **29**(3), 206-223(1998).
- Zhang, H. and Ahmadi, G., "Particle Transport and Deposition in the Hot-Gas Filter Vessel at Wilsonville," *Powder Technol.*, **116**(1), 53-68(2001).
- Yoo, K. J. and Lee, J. Y., "Study on the Economic Assessment for Particulate Control Equipments," Yonsei Univ., Mechanical Eng. Dpt., MS thesis(1993).
- FLUENT User's Guide*, Fluent Inc.(1998).
- GAMBIT User's Guide*, Fluent Inc.(1998).
- Batchelor, G. K., *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, England(1967).
- Fletcher, C. A. J., *Computational Techniques for Fluid Dynamics 1*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg(1988).
- Morsi, S. A. and Alexander, A. J., "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems," *J. Fluid Mech.*, **55**(2), 193-208(1972).