

섬유필터에 의한 분진여과의 원리

Principles of particle filtration by fibrous filters

이 규 원
K. W. Lee
광주과학기술원 환경공학과



- 1945년생
- 분진공학을 전공하였으며 입자의 측정방법, 입자의 운동원리, 대기 및 작업장 오염에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

분진 여과는 광범위한 응용성, 단순성 그리고 경제성 때문에 대기중의 분진(aerosol) 또는 입자 샘플링 및 제거 기술에 가장 널리 이용되고 있다. 분진여과(aerosol filtration)의 중요한 개념은 적절한 여과매체 또는 필터를 사용하여 분진을 가스상으로부터 제거하여 포집하는 것이다. 여과는 공기를 청정시키기 위하여 쓰이기도 하지만 분진을 샘플링할 때도 쓰인다. 공기중에 부유된 상태에서 필터에 포집된 분진은 포집된 분진의 중량을 측정, 현미경 관찰(microscopic), 미세화학분석(microchemical), 기타 다른 분석의 준비과정에 이용된다. 본 원고에서는 필터의 효율 평가와 압력손실 등을 계산하는 간단한 원리와 이론을 소개하고자 한다.

2. 필터이론(filtration theory)

섬유(fibrous)와 막(membrane)필터에 대한 입자의 여과 문제는 근자에 해석적 방법이나 수치모델링 또는 실험을 통한 많은 연구가 수행되어 왔다. 그 결과, 필터의 효율에 미치는 입자크

기, 필터매체의 특징 그리고 유속에 의한 영향은 질적 혹은 양적으로 잘 연구되어왔다. 섬유여과에 의한 특징을 연구하는 첫번째 단계는 단섬유(single fiber efficiency), η 는 섬유에 충돌하는 입자의 수와 유선이 섬유 주위로 흘러지지 않았을 때 섬유와 충돌하는 입자 수의 비로 정의한다. 그림 1에서와 같이 만약 섬유의 반경(R_f)이 Y 의 두께에 포함되어 있는 모든 입자를 제거한다면 단섬유 효율은 Y/R_f 로 정의할 수 있다. 필터의 총효율은 많은 단섬유로 구성된 필터의 전체효율(E)로 나타낼 수 있고 이를 단섬유 효율(η)에 관한 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$E = 1 - \exp\left[\frac{-4\eta a L}{\pi d(1-\alpha)}\right] \quad (1)$$

여기에서 α 는 필터의 충전밀도(packaging density, 1-공극도), L 는 필터의 깊이 또는 두께, 그리고 d 는 섬유직경을 말한다. 식 (1)은 서술한 바와 같이 단섬유 효율과 필터의 총 효율과의 상관관계를 표시한다. 식 (1)은 총 효율로부터 단섬유의 효율을 구하는데 사용되며 총효율도 실험적으로 측정할 수 있다. 단섬유 효율을 사용하는데 있어 잊점은 이 값이 필터의 두께 L 과 관

계없이 독립적이라는 것이다. 두께가 다른 두 개의 필터의 질을 평가함에 있어서 낮은 단섬유 효율을 가지는 어느 필터가 두께가 크기 때문에 더 높은 총 효율을 갖게 될 수도 있을수 있으므로 전체효율 E 는 의미가 없다. 따라서 서로 다른 필터의 품질을 비교할때는 그들의 단섬유 효율을 이용하여 비교하는 것이 타당하다.

2.1 여과 메카니즘(filtration mechanisms)

공기가 필터를 통과할 때, 입자는 몇가지 기작을 통해 유선(streamline)에서 벗어나 섬유 표면과 충돌하여 포집된다. 입자의 주요 포집 메카니즘은 확산(diffusion), 차단(interception), 관성충돌(inertial impaction), 그리고 중력침강(gravitational settling)이다. 단섬유 효율 η 는 확산 효율(η_{diff}), 차단 효율(η_{inter}), 관성충돌 효율(η_{imp}), 중력침강 효율(η_{grav})의 산술 총합으로 가정할 수 있다. 그 외 기타 메카니즘으로는 섬유에 포집된 입자의 덴드라이트 형성(dendrite formation)에 의한 포집등이 있다.

2.2 브라운 확산(Brownian diffusion)

정상적인 상태하에서는 에어로졸(aerosol)은 브라운 운동을 한다. 작은 입자는 일반적으로 유선에 따라 이동하지 않고 계속해서 그들로부터 확산된다. 확산하다가 입자가 섬유 표면에 일단 도달되면, 표면에 남게 되는데 그것은 반데르 발스 힘(van der Waal's force)에 의한다. 그러므로 표면에서 입자의 농도는 0으로 가정할 수 있고 농도 구배(concentraion gradient)는 입자의

확산을 지속시키는 힘으로 작용한다. 브라운 운동은 입자의 크기가 작을수록 증가하며, 이에 비례하여 확산에 의한 부착도 입자의 크기가 작을수록 증가한다. 이에 대한 현상은 그림 2에서 보여주고 있다. 이와 유사하게 낮은 유속하에서는 입자가 섬유 표면 근처에서 더 많은 시간을 가질 수 있어 확산에 의한 여과가 증가된다. 확산에 의한 여과는 이 공정에서 표현할 수 있는데 이때 무차원 변수를 페클릿 수(Peclet number)로 정의할 수 있다.

$$Pe = \frac{d_p U}{D} \tag{2}$$

여기에서 Pe 는 페클릿 수, d_p 는 포집 매체의 길이, U 는 필터 매체에서의 평균 유속 그리고 D 는 확산 계수(diffusion coefficient)이다. 입자의 확산 계수값 D 는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$D = kTC_s / 3\pi\eta d_p \tag{3}$$

여기에서 k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, η 는 공기 점도, d_p 는 입자직경, 그리고 C_s 는 컨닝햄 보정계수(Cunningham slip correction)이다. 윗 식에서 확산에 의한 입자의 포집은 페클릿 수의 증가에 따라 감소한다. C_s 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

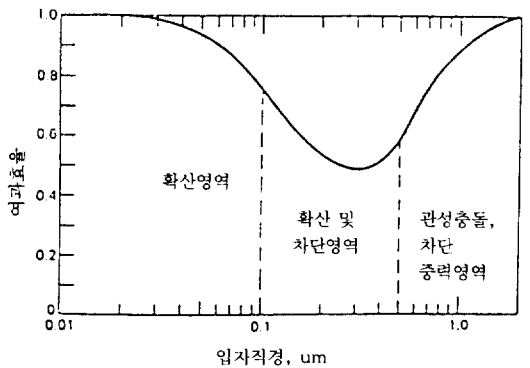
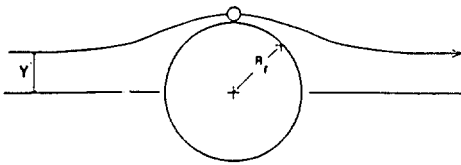


그림 2 여러기작이 작동하는 영역에서의 여과 효율과 입자의 크기를 개략적으로 보여주는 예시도



$$\eta_{total} = \frac{Y}{R_f}$$

그림 1 단섬유 효율, η 의 정의

$$C_i = 1 + 2.492 \frac{\lambda}{d_p} + 0.84 \frac{\lambda}{d_p} \exp(-0.435 \frac{d_p}{\lambda}) \quad (4)$$

여기에서 λ 는 가스 분자의 평균자유행로(mean free path)이다.

확산에 의한 포집효율(d_{diff})은 Friedlander (1957), 그리고 Lee와 Liu(1982)의 열과 물질의 전달 분석에 사용되는 경계층 모델에 의해 구해지고 있다. 초기의 Friedlander(1957)와 Natanson(1957)은 한개의 실린더 모델의 유동장(flow field)을 사용하였다. Lee와 Liu(1982)는 다중 실린더 모델을 사용하여 인접한 섬유와의 간섭효과를 고려하였다. 이 이론은 필터의 실제적 흐름 이력(profile)을 나타내는데 더 효과적이다. Lee와 Liu(1982)의 확산에 의한 단일 효율에 관한 이론은 다음과 같다.

$$\eta_{diff} = 2.58 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (5)$$

여기에서 K는 수력학적 인자(factor)이며 아래와 같다.

$$K = -\frac{1}{2} \ln \alpha - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} \quad (6)$$

2.3 차단(interception)

비록 입자의 궤도가 유선(streamline)으로부터 벗어나지 아니할지라도, 만약에 유선이 섬유(fiber) 표면으로부터 입자의 반경보다 내부에 있을 때에는 입자가 여전히 포집된다. 실제로 유한한 크기를 가지는 입자는 Brownian 운동이나 관성충돌(inertial impaction) 효과가 없더라도 차단(interception) 효과에 의해서 입자는 포집될 것이다. 차단은 유속과는 관계가 없다. 확산(diffusion)이나 관성충돌에서는 유속이 중요한 변수임을 예상할 수 있으나 무차원 변수로 표현되는 차단 효과의 차단 변수는 R이다. 이 R은 입자의 직경과 섬유의 직경의 비로 정의된다.

$$R = \frac{d_p}{d_i} \quad (7)$$

만약 Kuwabara flow를 사용한다면, 우리는

다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\eta_{inter} = \frac{1+R}{2K} \left[2\ln(1+R) - 1 + \alpha + \left(\frac{1}{1+R} \right)^2 \left(1 - \frac{\alpha}{2} \right) - \frac{\alpha}{2} (1+R)^2 \right] \quad (8)$$

여기서 η_{inter} 는 차단에 의한 단섬유(single fiber)의 효율이다. 식 (8)이 차단에 대한 완전한 식이기는 하지만, 식의 형태가 너무나 길다. 그래서 근사법을 사용하여 식을 표현하면 다음과 같은 간단한 형태가 된다.(Lee and Liu, 1982b)

$$\eta_{inter} = \frac{1-\alpha}{K} \frac{R^2}{(1+R)} \quad (9)$$

섬유에 의한 입자의 포집은 확산과 차단이 동시에 작용할 때에는 부가적으로 상승효과가 발생한다고 Stechkina, Kirsch, and Fuchs(1969)등이 제안하였다. 이런 부가적인 효과의 크기에 대해 Spielman과 Goren(1968)은 이론적으로 모순이 없는 항들을 표시했는데 여기에서는 언급하지 않겠다.

2.4 관성충돌(inertial impaction)

유체의 유선(streamline)은 섬유근처에서 곡선을 이룬다. 유한한 질량을 가지고 흐름에 따라 이동하는 입자는 그들이 지나는 관성 때문에 곡선이 곡선일때는 유선을 정확하게 쫓아가는 것은 아니다. 만약 유선의 곡률이 심하고 입자의 질량이 크다면 입자는 유선으로부터 매체의 표면으로 이탈하여 충돌을 한다. 그림 2에서 보이는 것처럼 입자의 크기가 커질 때나 공기의 속도가 커질 때 이 관성 충돌 기작의 중요성이 증가한다. 그러므로 확산에 의한 퇴적과는 반대로, 공기의 속도가 증가하거나 입자가 클 때 관성 충돌에 의한 효과는 커진다. 관성 충돌에 의한 기작은 무차원 변수 Stokes 수를 가지고 논할 수 있고 이 Stokes 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Stk = \frac{C_i d_p^2 \rho_p U}{18\eta d_i} \quad (10)$$

여기서 ρ_p 는 입자의 밀도이다. Stokes 수는 펄

터에서 입자의 포집시에 관성 충돌에 의한 기작을 기술하는데 기본적인 변수이다. 큰 Stokes 수일 경우에는 관성에 의한 포집확률이 증가하고, 반면에 작은 Stokes 수일 경우에는 관성에 의한 포집확률이 작다는 것을 알려준다.

Stechkina, Kirsch, 그리고 Fuchs(1969) 등은 Kuwabara 유동장(flow field)을 이용하여 관성 충돌에 의한 여과(filtration) 효율을 계산하였다. 그들은 관성 충돌에 의한 여과(filtration) 효율을 η_{imp} 로 표시했는데, 다음과 같다.

$$\eta_{imp} = \frac{1}{(2K)^2} [(29.6 - 28\alpha^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8}]Stk \quad (11)$$

2.5 중력침강(gravitational setting)

유한한 속도를 가지는 입자는 중력적인 힘에 의하여 가라앉는다. 그러므로 입자가 커서 침강속도도 충분히 클 경우에 입자는 유선으로부터 벗어난다. 아래 방향으로의 여과의 경우에는 입자가 중력에 의하여 포집체에 접근하므로 포집 효율은 증가한다. 흐름의 방향이 위방향일 경우 입자는 이 기작에 의하여 포집체로부터 멀어진다. 그래서 결과적으로는 여과의 부정적인 요인이 된다. 이 기작은 입자의 크기가 최소한 몇 마이크로미터(μm)보다 큰 경우, 그리고 흐름의 속도가 느릴 때에 중요하다. 여기에 작용하는 무차원 변수는 중력에 의한 침강기작으로 다음과 같이 표시된다.

$$Gr = \frac{V_g}{U} \quad (12)$$

여기서 U 는 유체의 속도이고 V_g 는 입자의 침강속도이다. 침강에 의한 단일 fiber의 여과 효율의 근사값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(Davies 1973)

$$\eta_{grav} = \frac{Gr}{1+Gr} \quad (13)$$

여과 이론에서는 위에서 언급한 독립적인 각각

의 기작들을 합해서 표현한다. 그러므로 식(1)에서 쓰이는 단섬유(single fiber)의 포집 효율 η 는 다른 여러기작에 의하여 계산되어진 독립적인 단일 fiber의 효율을 합한 것으로 쓰면 된다. 이 근사법은 섬유 filter의 여러기작에 의한 포집 효율을 예측하는 알맞는 식이 될 것이다. 다양한 영역의 입자 크기와 속도에서 각기 다른 여과(filtration) 기작이 영향을 미치는 범위에 대하여 그림 2에 도시하였다.

3. 부하효과(loading effects)

만약에 높은 농도의 분진 여과의 경우에는 오랜 기간동안의 입자의 포집과 압력 강하의 증가를 인지하고 잘 살펴보아야 한다. 입자가 포집 매체에 축적되기 때문에 입자가 표면에 포집되는 양이 증가한다. 이 기작은 입자의 크기, 형태, 축적되는 입자의 형성이 지속적으로 변하기 때문에 시간에 의존한다. Payatakes(1976)는 이러한 여과 기작을 미분식의 수치해석 방법을 이용하여 계산했다. 최근에 Kanaoka(1989)는 축적된 입자에 의한 여과 기작을 간단한 방법으로 계산하는법을 고안했다. 그의 이론에 의하면 총 입자 포집효율, E_{load} 은 축적된 입자의 형성 효과가 포함되어 있다. 그리고 식은 다음과 같이 표현된다.

$$E_{loaded} = 1 - \frac{\exp(-\gamma AcUt)}{\exp(-\gamma AcUt) + \exp(AL) - 1} \quad (14)$$

여기서

$$A = \frac{4\alpha}{\pi(1-\alpha)d_f} \eta_{initial} \quad (15)$$

γ 은 효율 증가 factor이고, c 는 입자의 질량 농도이고, U 는 공기의 속도이고, t 는 시간, 그리고 L 은 필터 매체의 두께이다. 그의 이론에서 단섬유의 여과(filtration) 효율은 다음과 같은 방법으로 증가한다고 가정되었다.

$$\eta_{loaded} / \eta_{initial} = 1 + \gamma m \quad (16)$$

여기서 η_{loaded} 는 입자의 질량이 m 인 경우 축적에 의한 섬유의 여과효율이다. 그리고 $\eta_{initial}$ 은 깨끗한 섬유의 여과효율이다. 식 (16)에서의 γ 은 Kanaoka의 실험에 의해서 결정된 실험적인 데이터를 쓰면 된다.

$$\eta_{min} = 1.44 \left[\left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^5 \left(\frac{\sqrt{\lambda k T}}{\eta} \right)^4 \left(\frac{1}{U^2 d_f^{10}} \right) \right]^{1/9} \quad (18)$$

이 식과 실험적인 최소 효율의 데이터를 비교한 것이 그림 4이다.

4. 최대 투과율의 입자 크기 및 최소 효율 (most penetrating particle size and minimum efficiency)

앞에서 언급한 바와 같이, 입자의 크기가 커진다면 차단이나 관성 충돌 기작에 의한 여과 효율이 증가하고, 반면에 입자의 크기가 작아지면 Brownian 확산에 의한 포집이 증가한다. 결과적으로 입자의 크기가 중간적인 위치에 있어서 특별히 월등한 기작이 없을 경우에는 둘 또는 그 이상의 기작이 동시에 작용한다. 이러한 범위에서 입자의 투과(penetration)는 최대가 되고, 필터 효율은 최소가 된다. 이것을 그림 3에서 도시하였다. 최저의 효율을 가지는 입자 크기 주위에 있는 대부분의 입자들이 필터를 통과하게 된다. 예전에는 이 크기가 $0.3\mu m$ 이라고 가정했고 그래서 high-efficiency particulate air(HEPA) 필터의 DOP 실험을 하는데 있어서 이 크기의 입자를 이용했다. 섬유질 필터의 연구가 최근 들어 활발해지고 있으며, 다양한 형태의 필터와 여과 속도에 따라서 투과하는 입자의 크기와 이에 부합하는 최소 효율에 관한 연구가 이루어지고 있다. Lee와 Liu(1980)는 가장 많이 투과하는 입자의 크기를 필터의 재질과 여과 조건의 함수로 예견하고 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$d_{p, min} = 0.855 \left[\left(\frac{K}{1-\alpha} \right) \left(\frac{\sqrt{\lambda k T}}{\eta} \right) \left(\frac{d_f^2}{U} \right) \right]^{2/9} \quad (17)$$

그림 3은 실험적인 데이터와 식 (17)을 비교한 것이다. 흐름의 속도가 증가할 때와 필터의 충전율(solidity, 1-porosity)이 증가할 때 가장 잘 투과하는 입자의 크기는 감소함을 알 수 있다. 필터 매체의 크기가 증가할 때에는 투과하는 입자의 크기는 증가한다. 부가적으로 최소 효율은 다음과 같이 주어진다.

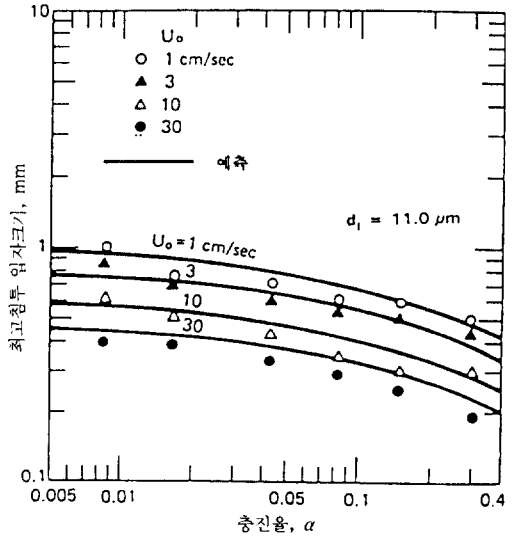


그림 3 최고 침투 입자크기에 관한 이론과 실험치와의 비교

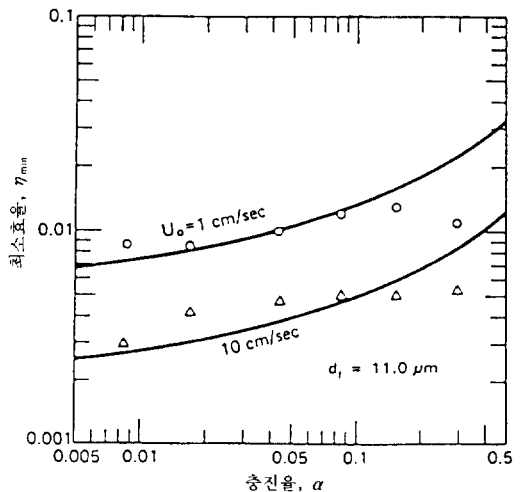


그림 4 최소 효율에 관한 이론과 실험치와 비교

5. 막필터(membrane filters)

막필터의 여과 이론은 섬유필터에서 근본적으로 발전되었다. Rubow(1981)는 공극 막필터(porous membrane filters)의 여과 기작은 섬유필터의 기작과 거의 같다고 했다. 더구나 막필터의 실제적인 두께(thickness)와 충진율(solidity)을 섬유필터 이론에 직접 적용할 수 있으며 단지 효과적인 막의 구조를 대표하는 섬유 직경의 수정만이 필요하다고 했다. 더욱이 막필터에서도 최대 투과율의 입자가 존재한다고 실험적으로 보여주고 있다. 그러므로 식 (17)과 (18)은 효과적인 섬유직경값을 적절히 선택하면 막필터에도 적용할 수 있다. 공극 필터(Nuclepore filter)의 입자 수거는, 공극벽에서 수거는 확산이론에 의해, 공극입구 표면은 관성충돌과 차단에 의해서 설명될 수 있다(Spurny et al. 1969). 전형적으로 필터의 효율은 공극 크기보다 입자 크기가 작을 때는 낮으나 입자가 아주 작으면 ($d_p < 0.1\mu\text{m}$) 확산에 의하여 제거되어 효율이 높아질 수 있다. 공극 크기보다 큰 입자는 높은 수거 효율을 갖는다. 이러한 점 때문에 임팩터(impactor)와 같이 cut-off의 특성을 갖게되며, 뉴클포어(Nuclepore) 필터는 다른 공극 크기를 사용하여 연속적인 단계(stages)를 통하여 선택적으로 입자를 샘플링을 할 수 있다.(Cahill 1977, Parker et al. 1977) Heidam(1981)는 정방향 공극막 필터를 통하여 에어로졸(aerosol) 분류를 검토하였으며 이러한 필터를 적용시 입자의 튀어오름(bounce)이 문제가 될 수 있다고 했다.

6. 필터의 압력손실(pressure drop of filters)

공기가 필터 매체를 통과할 때 필터의 구조 때문에 저항이 생기는데 이것은 공기투과성(air permeability) 또는 압력손실(pressure drop)로 측정할 수 있다. 필터 매체를 통한 압력손실의 고려는 필요한 응용을 위한 필터 형태를 선택함에 있어서 중요하다. 압력손실은 쉽게 측정할 수 있으며 여과 기작의 기본이 되는 흐름장에서 점

검하는데 사용할 수 있다. 더우기 중요한 것은 필터 매체를 통한 압력손실의 측정은 실질적인 필터 효율을 평가하는데 중요한 역할을 한다는 것이다. 이상적으로는 필터가 압력손실이 낮고 높은 효과 효율을 가지는 것이 바람직하다. 필터 형태의 다양성과 필터 구조의 복잡성 때문에 정확한 흐름의 형태와 정밀한 매체 구조를 묘사하는 것은 어렵다. 그러므로 공극막 필터 등의 실제적인 필터의 압력손실의 예측은 쉽지는 않다. 실제로 이상적인 흐름 모델에 기초를 둔 계산된 압력손실과 실제 측정된 압력손실은 섬유나 공극의 정렬이 얼마나 균일하게 되었는가에 대한 지표가 될 수도 있다. 이러한 개념을 이용하는 인자를 압력손실 인자(β)라 하며 다음과 수식화할 수 있다.

$$\beta = \frac{\Delta P_{ex}}{\Delta P_{th}} \quad (19)$$

여기에서 ΔP_{ex} 와 ΔP_{th} 는 실험을 통해 측정된 압력손실과 모델에 의해 예측된 압력손실을 말한다. 이러한 압력손실 인자는 필터 효율을 이론적으로 계산하는데 적용된다.

$$E_{ex} = \beta E_{th} \quad (20)$$

여기에서 E_{ex} 와 E_{th} 는 실험에 의해 측정된 효율과 모델에 의해 예견된 효율을 나타낸다.(Davies 1973; Lee and Liu 1980a; Schlichting 1968)

섬유필터에 대한 압력손실의 이론적인 식은 아래와 같다.

$$\Delta P_{th} = \frac{16\eta aUL}{Kd_f^2} \quad (21)$$

필터를 통한 압력손실은 식 (21)를 통하여 효과적인 섬유직경과 거론된 필터 효율이론일 때 대략적으로 구할수 있다. 이것은 여러 크기의 섬유필터로 구성된 필터에서는 아주 유효하다.

7. 맺음말

본 논문에서는 섬유필터에 의한 분진 포집 기

작을 논하였다. 주요 기작은 아주 미세한 입자의 경우와 유속이 낮은 경우에 있어서는 확산에 의한 포집이 중요하고 비교적 큰 입자가 높은 유속에서 이동하는 경우에는 관성충돌에 의한 기작이 중요하게 된다. 또한 유속에 관계없이 입자의 직접차단에 의한 기작으로 분진이 포집된다. 각 기작에 따라 과거에 유도된 포집효율을 계산할 수 있는 간단한 방정식들을 소개하였고, 최대 투과율을 갖는 입자크기의 범위(most penetrating particle size regime)에서의 최소 포집효율 및 그때의 입자 직경에 대해 논하였다.

참 고 문 헌

1. Cahill, T. A., L. L. Ashbauch, and J. B. Barone., 1977, "Analysis of respirable fractions of atmospheric particulate via sequential filtration", *J. Air Pollut. control Assoc.*, 27, pp.675.
2. Davies, C. N., 1973, *Air Filtration*. London, Academic Press.
3. Friedlander, S. K., 1957, "Mass and heat transfer to single spheres and cylinders at low Reynolds numbers", *A. I. Ch. E. J.*, 3 pp. 43~48.
4. Heidam, N. Z., 1981, Review : "Aerosol fractionation by sequential filtration with Nuclepore filters", *Atomos. Environ.*, 15 pp. 891.
5. Kanaoka, C., 1989, "Time dependency of air filter performance", *J. Aerosol Res. Japan*, 4, pp. 256~264 (in Japanese).
6. Lee, K. W. and J. A. Gieseke, 1980, "Note on the approximation of intercepional collection efficiencies", *J. Aerosol Sci.*, 11, pp. 335~341.
7. Lee, K. W. and B. Y. H. Liu., 1980, "On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters", *J. Air ploout. Control Assoc.*, 30, pp. 377~381.
8. Lee, K. W. and B. Y. H. Liu., 1982a, "Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters", *Aerosol Sci. Technol.*, 1 pp. 35~46.
9. Lee, K. W. and B. Y. H. Liu., 1982b, "Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters", *Aerosol Sci. Technol.*, 1, pp. 147~61.
10. Natanson, G. L., 1957, *Proc. Acad. Sci. USSR. Phy. Chem. Sec.*, 112, pp. 21~25.
11. Parker, R. D., G. H. Buzzard, T. G. Dzubay, and J. P. Bell., 1977, "A two-style respirable aerosol sampling using Nuclepore filters in series", *Atmos. Environ.*, 11, pp. 617.
12. Payatakes, A. C., 1976, "Model of transient aerosol particle deposition in fibrous media with dendritic pattern", *A. I. Ch. E. J.*, 23, pp. 192~202.
13. Rubow, K. L. and V. C. Furtado., 1989, *Air movers and samplers. In Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants*, 7th edn. Cincinnati, OH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
14. Spielman, L. and S. L. Goren., 1968, "Model for predicting pressure drop and filtration efficiency in fibrous media." *Environ. Sci. Technol.*, 2, pp. 279~87.
15. Spurny, K. R., J. P. Lodge, Jr., E. R. Frank, and D. C. Sheesley., 1969, "Aerosol filtration by means of Nuclepore filters : structural and filtration properties", *Environ. Sci. Technol.*, 3, pp. 453.
16. Stechkina, I. B., A. A. Kirsch, and N. A. Fuchs., 1969, "Studies in fibrous aerosol filters-IV. Calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration", *Ann. Occup. Hyg.*, 12, pp. 1~8.