

PE5) 커닝햄 보정계수를 고려한 여과시 최대투과입경의 근사해 Approximated Solution of Most Penetrating Particle Size of Aerosol Filtration Considering Cunningham Correction Factor

정창훈 · 박현설¹⁾ · 김용표²⁾

경인여자대학 보건의료관리과, ¹⁾한국에너지기술연구원,

²⁾이화여자대학교 환경공학과

1. 서 론

여과에 의한 에어로졸의 포집 메커니즘은 크게 확산(Diffusion), 차단(Interception) 그리고 관성충돌(Inertial impaction)과 중력침강(gravitational settling)등이 있다. 이중 확산에 의한 입자의 포집효율은 입자의 크기가 작을수록 증가하고 차단, 관성충돌 그리고 중력에 의한 포집 효율은 입자의 크기가 클수록 증가하게 되어 두 지배적인 메커니즘 사이의 입자 크기 구간에서는 입자의 포집 효율이 최소가 되는 입경 크기 구간이 존재하게 되고 이를 최대 투과 입경(most penetrating particle size)이라 부른다. 이러한 최대 투과 입경은 입자의 포집 효율을 입경에 대하여 미분함으로써 구할 수 있는데, 계산의 복잡성과 해석해를 유도하기 위하여 미세 입자의 미끄러짐을 보정하는 커닝햄 보정계수의 역할은 고려하지 않는 경우가 많았다(Lee, 1981). 본 연구에서는 조화평균 형태의 근사식을 이용하여 커닝햄 보정계수를 간략화 하고 여과시 최대투과 입경을 근사적으로 구하고자 하였다.

2. 여과포집 메커니즘

확산, 차단 그리고 관성충돌을 고려한 입자의 총 포집 효율은 다음과 같다.

$$\eta = \eta_D + \eta_R + \eta_I \quad (1)$$

여기서, η_D , η_R , η_I 는 각각 확산, 차단 그리고 관성충돌에 의한 입자의 포집효율을 의미한다. Lee and Liu(1980)는 많은 경우에 있어서, 입자의 최대투과 크기가 확산과 직접차단에 의한 크기구간에 의해 결정된다고 가정하였다. 이상의 가정에 따라 입자의 총 포집 효율은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= 2.6 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} + \left(\frac{1-\alpha}{K} \right) \frac{R^2}{1+R} = 2.6 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} \left(\frac{D}{ud_f} \right)^{-2/3} + \left(\frac{1-\alpha}{K} \right) \frac{R^2}{1+R} \\ &= 2.6 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} \left(\frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p u d_f} \right)^{-2/3} + \left(\frac{1-\alpha}{K} \right) \frac{R^2}{1+R} \cong 2.6 \left(\frac{1-\alpha}{K} \right)^{1/3} \left(\frac{kTC_c}{3\pi\mu d_p u d_f} \right)^{-2/3} + \left(\frac{1-\alpha}{K} \right) R^2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, α 는 필터의 충전비(solidity, packing density), Pe 는 페클릿수, K 는 Kuwabara factor, R 은 입자 직경(d_p)과 필터 직경(d_f)의 비($=d_p/d_f$), T 는 온도, k 는 Boltzmann 상수, C_c 는 커닝햄 보정계수를 의미한다.

식(2)에서 총 효율식을 입자의 크기(d_p)에 대하여 미분하면 그 미분한 식을 0으로 하는 입자의 크기($d\eta/dd_p=0$)가 침투가 최대가 되는 입자의 범위(most penetrating particle size, $d_{p, min}$), 즉 효율이 최소가 되는 입자의 범위가 된다.

일반적으로 식 (2)를 미분하는데 있어 편이상 커닝햄 보정계수는 1로 가정하고 입경에 대한 영향을 무시하는 것이 일반적이다(Lee, 1981). 그러나, 입자의 크기가 작아질수록 입자의 slip에 의한 영향을 고려하는 커닝햄 보정계수의 값을 무시할 경우 조건에 따라 오차를 수반할 수 있다.

3. 커닝햄 보정계수

커닝햄 보정계수는 다음과 같이 근사된 형태로 표현할 수 있다.

$$C_c = 1 + 2.492 \frac{\lambda}{d_p} + 0.84 \frac{\lambda}{d_p} \exp\left(-0.435 \frac{d_p}{\lambda}\right) \cong C_{c,coarse} + C_{c,fine} \cong 1 + 3.34 \frac{\lambda}{d_p} \quad (3)$$

여기서 λ 는 입자의 평균 자유행정(mean free path), $C_{c,coarse} = 1$, $C_{c,fine} = \lambda/d_p$ 이다.

4. 최대투과 입경의 간략해

입자의 크기 혹은 Knudsen 수($=2\lambda/d_p$)에 따라 조대입자 구간 및 미세입자 구간의 보정계수를 근사하고 조화평균형식의 간략화 과정을 거치면 커닝햄 보정계수를 고려한 최대투과 입경은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\frac{1}{d_{p,min}} = \frac{f(d_f)}{1/d_{p,coarse} + 1/d_{p,fine}}, \quad (4)$$

여기서, d_f 는 필터 직경의 함수로, 수치적 결과와 비교에 의하여 구하여진 속도에 따른 보정계수를 의미하고, $d_{p,coarse}$ 는 $C_c = C_{c,coarse}$ 일 경우의 최대투과입경을, $d_{p,fine}$ 은 $C_c = C_{c,fine}$ 일 경우의 최대투과입경을 의미한다. 그림 1에서 보듯이 예측치와 수치적으로 계산한 값이 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 또한 커닝햄 보정계수를 1로 가정한 결과와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

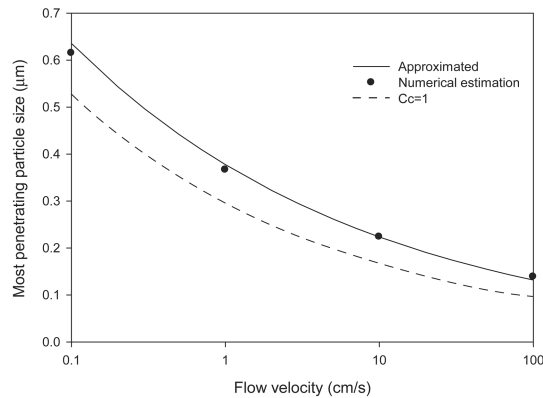


Fig. 1. Comparison of the most penetrating particle size between approximated and numerical estimated values.

참 고 문 헌

- Lee, K.W. (1981) Maximum penetration of aerosol particles in granular bed filters, J. Aerosol Sci., 12(1), 79-87.
- Lee, K.W. and B.Y.H. Liu (1980) On the minimum efficiency and the most penetrating particle size for fibrous filters, J. Air Pollution Control Assoc., 30, 377-381.