

PE7) 사이클론에 의한 다분산 입자의 집진효율 예측

Estimation of Polydispersed Particle Collection Efficiency by Cyclone

정 창 훈

경인여자대학 환경보건과

1. 서 론

원심력을 이용하여 입자를 분리, 포집하는 원심력 집진장치(cyclone)는 간단한 구조 때문에 분진제거 및 입자분리 장치로 널리 사용되어 왔다. 이러한 간단한 구조에도 불구하고 사이클론의 유동패턴은 매우 복잡하여 이를 해석하려는 많은 이론적, 실험적, 수치적 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 수치적 연구는 유체역학적인 사이클론의 유동 특성을 보다 잘 해석하는 특성이 있으나, 기존의 이론식들 역시 간단한 표현을 통해 입자의 포집특성을 설명하므로 많이 이용되고 있다. 특히, Leith and Licht(1972)에 의한 집진 효율식은 Lapple의 효율식과 함께 사이클론의 설계 및 효율 예측에서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 Leith and Licht(1972)의 사이클론 집진 효율식에 모멘트 관계식을 적용하여 사이클론에 의해 제거되는 다분산 입자의 크기 분포 변화를 체류 시간에 따라 구하였다.

2. 사이클론 집진 효율식

Leith and Licht(1972)의 radial back mix approach에 의하면 주어진 입자크기(d_p)에서의 등급효율(grade efficiency, $\eta(d_p)$)식은 다음과 같다.

$$\eta(d_p) = 1 - \exp \left[-2 \left\{ 2(n+1) \tau \left(\frac{u_T}{R_2} \right)^2 t \right\}^{\frac{1}{2n+1}} \right], \quad (1)$$

여기서 n 은 원주 속도 계수(vortex exponent), τ 는 입자의 완화시간(relaxation time), u_T 는 평균 가스 유입 속도, R_2 는 사이클론 외벽의 반경, t 는 입자가 사이클론에 체류하는 동안의 시간이다.

식 (1)은 주어진 입자 크기에서의 집진 효율을 알 수 있으나, 다분산 입자의 집진 효율을 파악하기 위해서는 식 (1)을 모든 입자크기 구간에 대해 적분하여야 하며, 사이클론에 유입된 입자 크기 분포의 변화를 모사할 수 없다. 식(1)은 다시 다음과 같은 시간과 입자 크기농도의 함수로 표현될 수 있다.

$$\int_{n'_0}^{n'} \frac{dn'(d_p)}{n'(d_p)} = - \frac{2\tau u_T^2}{R_2} \left\{ 2(n+1) \tau \left(\frac{u_T}{R_2} \right)^2 \right\}^{-\frac{2n+1}{2n+1}} \int_0^t t^{-\frac{2n+1}{2n+1}} dt, \quad (2)$$

여기서, $n'(d_p)$ 은 입자의 개수 농도이며 $n'_0(d_p)$ 는 초기 조건에서의 즉, 유입구에서의 개수농도를 의미한다. 식 (2)를 적분하기 위하여 입자의 크기를 대수 정규 분포로 가정하고 모멘트식을 정의 하면 (Park et al., 2004) 최종적으로 다음과 같은 모멘트 미분 방정식을 유도 할 수 있다.

$$\frac{dM_k}{d\theta} = - \zeta_1 M_{k + \frac{1}{n+1}}, \quad (3)$$

여기서, M_k 는 k 번째 모멘트, $\theta (= 2(1+n)t^{\frac{1}{2n+1}})$ 는 변환된 시간변수, ζ_1 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\zeta_1 = \frac{u_T^2 \rho_p}{9R_2 \mu} \left\{ \frac{2(n+1)\rho_p}{18\mu} \left(\frac{u_T}{R_2} \right)^2 \right\}^{-\frac{2n+1}{2n+1}} \quad (4)$$

여기서 ρ_p 는 입자의 밀도, μ 는 가스의 점도이다.

식(3)를 $k=0, 3, 6$ 에 대하여, Runge-Kutta 등의 수치적 방법으로 적분하게 되면, 최종적으로 사이클론에 의해 제거되는 다분산 입자의 크기분포를 시간에 따라 구할 수 있다.

3. 결 론

그림 1은 사이클론에 의해 제거되는 다성분 입자의 총 포집 효율의 변화를 시간에 따라 살펴본 것이다. 사이클론의 수치는 Stairmand의 고효율 사이클론의 기본 크기 비를 따랐다. 유입되는 입자의 기하학적 표준편차 ($=\sigma_{g0}$)는 1.5, 기하학적 평균 직경 ($=d_{g0}$)은 $0.5\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ 그리고, $10\mu\text{m}$ 에 대하여 조사하였다. 그림 1에서 보듯이, 기하학적 평균 직경이 클수록 입자의 제거 효율은 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 직경이 큰 입자가 원심력에 의해 더 높은 제거 효율을 보이는 사이클론의 일반적인 성질을 보여 주고 있다. 그림 2는 입자의 크기 분포와 유입속도의 변화가 포집 효율에 어떠한 영향을 미치는가를 보여주고 있다. 그림 2에서 보듯이, 입자의 분포가 넓은 경우, 즉 초기 기하학적 표준편차가 큰 경우가 작은 경우보다 입자의 포집효율이 더 높은 것을 볼 수 있다. 또한 입자의 초기 유입속도가 클수록 포집 효율은 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 2에서 시간 0.7초는 유입속도가 10m/s일 때 사이클론의 출구에 도달하는 시간, 1.4초는 유입속도가 5m/s일 때 출구에 도달하는 시간을 가리킨다.

본 연구에서는 사이클론에 의해서 제거되는 다분산 입자의 크기분포 변화를 입자의 크기분포를 대수 정규분포로 가정한 모멘트 방법을 이용하여 시간에 따라 구하였다. 모멘트 법을 사용할 경우, 복잡한 수치적 적분을 통하여 구할 수 있었던 총 포집효율을 간단하게 구할 수 있다. 또한 제거되는 입자의 분포 변화를 시간에 따라, 혹은 사이클론의 위치에 따라 구할 수 있는 장점이 있다.

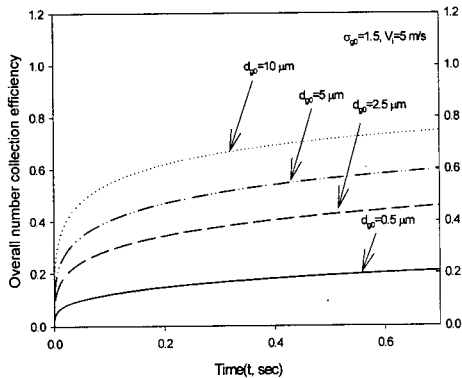


Fig. 1. The overall number collection efficiency of particles as a function of time ($D=1\text{m}$).

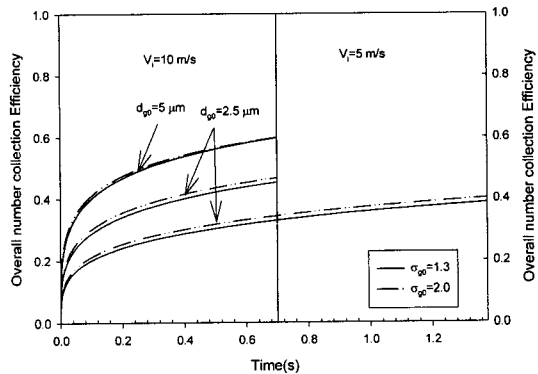


Fig. 2. The change of overall number collection efficiency as a function of time in different initial geometric standard deviation and inlet velocity.

참 고 문 헌

- (1) Leith, D. and W. Licht (1972) The collection efficiency of cyclone type particle collectors-A new theoretical approach, *AIChE Symposium Series*, 126, 196-206.
- (2) Park, H. S., C. H. Jung, and K. W. Lee (2004) Analytic Solution for Collection Efficiency of Electrostatic Precipitators for Polydisperse Aerosols, *Environmental Engineering Science*, 21, 451-462.