

미립 물질 제거를 위한 소형 사이클론 분리기의 이론적 연구 및 실험적 검증[§]

고 한 결* · 김 홍 석*†

* 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Theoretical Analysis and Experimental Evaluation of Small Cyclone Separator to Remove Fine Particulate Matter

Han Gyu Ko* and Hong Seok Kim*†

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received June 19, 2012 ; Revised August 16, 2012 ; Accepted August 16, 2012)

Key Words: Cyclone Separator(사이클론 분리기), Collection Efficiency(분리효율), Vortex(선회류), Pressure Drop(압력강하), Cut-off Diameter(절단입경)

초록: 사이클론 분리기는 제작이 쉽고, 경제적이며, 가혹한 환경에서도 사용이 가능하기 때문에 다양한 산업공정에서 미립 물질을 제거하기 위한 장비로 널리 활용되고 있다. 하지만 사이클론의 복잡한 유동 특성 때문에 입자를 분리하는 세부적인 메커니즘에 대한 이해는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 사이클론 분리기의 기하학적 특성과 유동 파라미터가 미치는 영향을 고려하여 사이클론의 분리효율과 절단입경을 계산하기 위한 이론적인 연구를 진행하였다. 이론적 모델을 통해 예측한 분리효율과 절단입경은 0.5-30 μm 의 입자에 대한 실험결과와 잘 일치하였다. 또한 사이클론의 성능은 기하학적 특성과 유동 파라미터 뿐 아니라 표면의 마찰특성에도 현저한 영향을 받는 것으로 확인되었다.

Abstract: A cyclone separator has been widely used in various industrial processes for removing fine particulate matter because it is easy to fabricate, cost effective, and adaptable to extremely harsh conditions. However, owing to the complex flow field in cyclones, a complete understanding of the detailed mechanisms of particulate removal has not yet been gained. In this study, a theoretical analysis was performed for calculating the collection efficiency and cut-off size in cyclones by taking into account the effects of geometrical and flow parameters. The collection efficiency and cut-off size values predicted by the theoretical model showed good agreement with experimental measurements for particles with a diameter of 0.5-30 μm . It was also revealed that the surface friction, along with the flow and geometrical parameters, has a significant effect on the cyclone performance.

- 기호설명

m_p : 입자 질량 (particle mass)
 V : 접선방향 속도 (tangential velocity)
 V_r : 반경방향 속도 (radial velocity)
 ρ_g : 가스 밀도 (gas density)
 ρ_p : 입자 밀도 (particle density)
 ν : 동점도 (kinematic viscosity)
 d : 입자의 지름 (particle diameter)

Q_0 : 입구 유량 (inlet flow rate)
 Q_d : 하단부 유량 (flow rate at the cone apex)
 V_{in} : 입구 속도 (inlet velocity)
 V_{out} : 하단부 속도 (velocity at the cone apex)
 η : 분리효율 (collection efficiency)
 C_d : 항력계수 (drag coefficient)

1. 서론

사이클론 분리기(cyclone separator)는 처리가스를 입구로 유입시켜 선회류(vortex)를 발생시키고, 원심력을 이용하여 처리가스 내의 크고 작은 입자들을 분리하는 장치이다. 사이클론은 가동부가 없어

[§] 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26.-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, hongseok@seoultech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

구조가 간단하고 제작이 용이하며, 유지비가 적게 들어 경제적이고, 가혹한 환경에서도 사용이 가능하기 때문에 분진 제거, 미립자 포집, 청소기, 바이오 센서, 공기정화 설비 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다.⁽¹⁾

지난 수 십년 간 사이클론의 효율 향상과 적용 확대를 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. Stairmand⁽²⁾는 사이클론의 효율을 극대화할 수 있는 각 부분의 치수를 사이클론의 몸체반경에 대한 비율로 표시하였다. 하지만 이 연구는 시행착오법에 기초하고 있어 사이클론 작동 메커니즘에 대한 근본적인 이해가 부족하다. 또한 많은 연구자들이^(3,4) 사이클론 각 부의 치수, 입구형상, 유량, 온도 등 사이클론의 기하학적 형상과 공정조건이 사이클론의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. DeOtte 등⁽⁵⁾과 Grane 등⁽⁶⁾은 다중포트(multi-port) 유동 장치 및 병렬 사이클론 설계를 통해 사이클론의 분리효율을 향상시키고자 하였고, Wedding 등⁽⁷⁾과 Zhao⁽⁸⁾는 이론적 모델의 개발을 통해 다양한 용량을 가진 사이클론의 효율과 절단입경(cut-off size)를 예측하였다. 하지만 사이클론은 복잡하고 비선형적인 유동특성을 가지고 있어 사이클론 내부의 세부적인 입자 분리 메커니즘에 대한 이해는 아직 부족한 상태이다. 현재 대부분의 사이클론 연구와 설계가 경험적인 방법에 의존하고 있고, 이론적인 연구도 작은 수의 변수만을 고려하기 때문에 실제 실험결과와 상당한 오차를 보이고 있다. 사이클론 분리기는 많은 수의 기하학적 설계변수와 공정 파라미터를 가지고 있어 원하는 크기의 미립 물질 분리와 성능향상을 위해서는 사이클론 작동원리에 대한 근본적인 이해를 확대하고, 다양한 변수들의 영향 및 상호작용에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 사이클론 분리기 기하학적 특성과 유동 파라미터가 미치는 영향을 고려하여 사이클론의 분리효율과 절단입경을 계산하기 위한 이론적인 연구를 진행하였다. 또한 소형 사이클론의 설계, 제작, 실험을 통해 이론적 모델의 견실성과 다양한 공정변수의 영향을 고찰하였다. 0.5-30 μm 범위의 다양한 크기의 입자에 대한 실험 결과 이론적 모델링을 통한 분리효율과 절단입경 예측 값이 실험을 통한 측정값과 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 사이클론 내벽의 마찰특성이 사이클론 성능에 현저한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

2. 이론적 모델링

Fig. 1 은 상부에 원통형 몸체와 하부에 원추형

구조를 가진 사이클론 분리기 기하학을 보여주고 있다. 여기서 D_1 , D_2 , D_3 는 각각 사이클론의 몸체 직경, 유출구 직경, 입자출구 직경을 나타내며, L_0 는 사이클론의 높이, a_0 와 b 는 사이클론 입구의 폭과 높이, c 는 사이클론 몸체 높이를 나타낸다. 미립 물질을 포함한 공기가 사이클론 몸통의 접선 방향으로 유입되면 사이클론 내벽을 따라 하향 선회유동을 형성하게 되고, 선회유동 중 미립 물질은 원심력에 의해 벽면 쪽으로 밀어내어져 사이클론 하부에 분리된다. 미립 물질이 제거된 공기는 콘 하단부에서 상승하여 출구쪽으로 배출된다. 이론적 모델링을 위해서 미립 물질은 구형 입자로, 입자의 접선방향 속도는 공기의 접선방향 속도와 같다고 가정하였으며, 공기의 반경방향 속도는 무시하였다.

사이클론에 유입된 입자는 사이클론 내부의 선회유동에 의하여 가속운동을 일으키게 되며, 다음의 식⁽⁸⁾으로 나타낼 수 있다.

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} - m_p \frac{V^2}{r} + C_d A_p \rho_g \frac{V_r^2}{2} = 0 \quad (1)$$

여기서 A_p 는 항력을 받는 입자의 기준 단면적을 나타낸다.

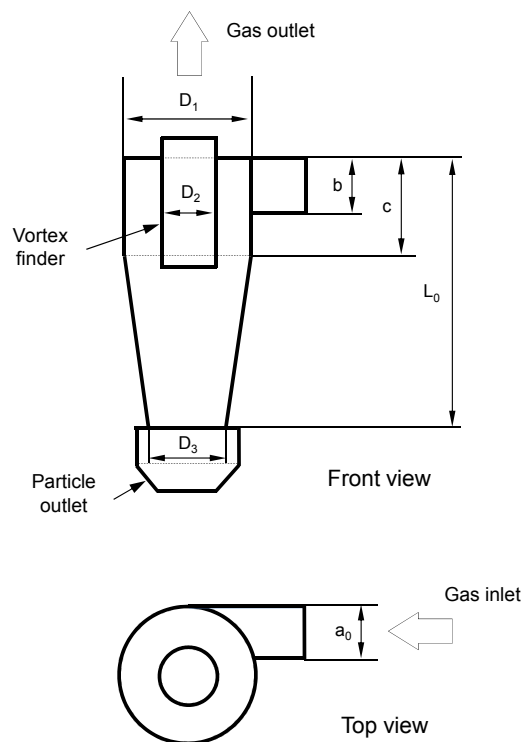


Fig. 1 Geometrical dimensions of a cyclone separator

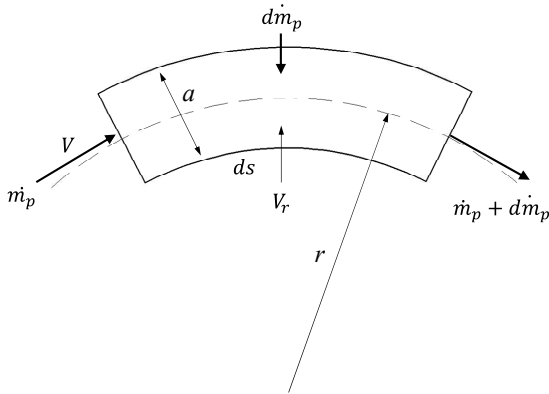


Fig. 2 Control volume for particle mass conservation

입자의 반경 방향 이차 미분항을 무시하고, 항력계수를 레이놀즈 수(Re)를 이용하여 $C_d = 24/Re = 24v/dV$ 와 같이 정리하면 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$V_r = \frac{\rho_g d^2}{18\nu\rho_p r} V^2 \quad (2)$$

Fig. 2 에 나타난 것처럼 검사체적(control volume)으로 들어오는 입자와 사이클론 내벽에 도달하는 입자의 상대적인 양은 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{dm_p}{\dot{m}_p} = -\frac{bdsV_r\alpha}{abV\alpha} = -\frac{V_r}{a} dt \quad (3)$$

여기서 \dot{m}_p 는 입자의 질량 유량(flow rate), α 는 입자의 농도(concentration), a 는 유동 폭(flow width)을 나타내며, $ds=Vdt$ 로 표시할 수 있다. 따라서 사이클론으로 들어오는 입자와 보텍스 파인더(vortex finder)를 통해 나가는 입자의 상대적인 양은 식 (2)와 식 (3)을 조합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\dot{m}_{p-out}}{\dot{m}_{p-in}} = \exp\left[-\frac{\rho_g d^2}{18\nu\rho_p} \int \frac{V^2}{ar} dt\right] \quad (4)$$

여기서 \dot{m}_{p-in} 과 \dot{m}_{p-out} 은 각각 사이클론으로 들어오는 입자와 보텍스 파인더를 통해 나가는 입자의 질량 유량이다. 식 (4)는 입자의 운동궤적을 나타내는 반지름 r 과 유동의 너비 a 를 평균값⁽⁹⁾인 r_{av} 와 a_{av} 로 간략화하고, 입자의 평균가속도 β 를 통해 $dV=\beta dt$ 를 정의하여 계산할 수 있다.

식 (4)의 결과는 사이클론 입구와 입자가 분리

Table 1 Size ratio of a cyclone studied

	Dimension
Cyclone diameter (D_1/D_1)	1.0
Inlet height (b/D_1)	0.3
Major flow outlet diameter (D_2/D_1)	0.3
Outlet height (h/D_1)	0.8
Cyclone body height (c/D_1)	0.7
Cyclone height (L_0/D_1)	2.0
Minor flow outlet diameter (D_3/D_1)	0.4

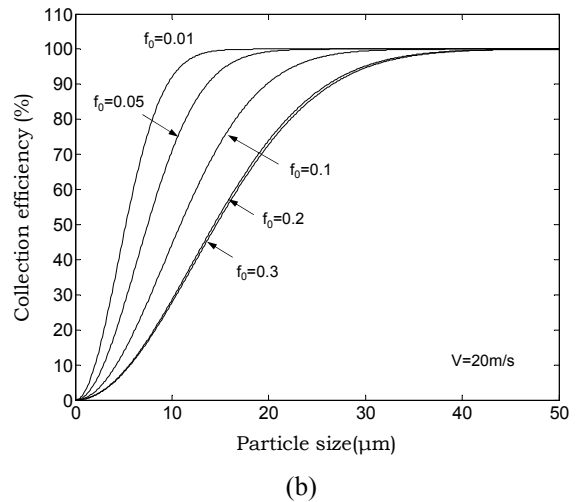
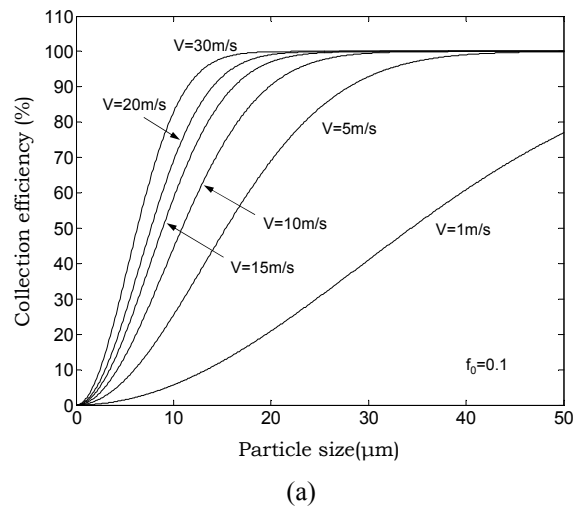


Fig. 3 Simulated collection efficiency as a function of particle size at various (a) inlet velocities and (b) friction coefficients

되는 사이클론 하단부의 유동속도 V_{in} 과 V_{out} 에 따라 달라지며, V_{out} 은 연속방정식(continuity equation)에 따라 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{out} = \frac{Q_b}{Q_0} \frac{a_0}{a_b} V_{in} \quad (5)$$

여기서 a_b 와 Q_b 는 각각 입자가 분리되는 사이클론 하단부의 유동너비와 유량이다. a_b 는 $0.1D_3$ 로 가정⁽¹⁰⁾할 수 있으며, Q_b 는 사이클론 내벽의 마찰을 고려하여 다음과 같이 유도된다.⁽⁹⁾

$$Q_b = \left(\frac{a_b}{a_0} \right)^{\frac{f_0 L}{a_0 - a_b}} Q_0 \quad (6)$$

여기서 f_0 는 사이클론 내벽의 마찰계수, L 은 사이클론 내부의 유동길이를 나타낸다.

식 (4)-(6)을 활용하여 최종적으로 입자의 분리 효율 η 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\eta = 1 - \frac{\dot{m}_{p-out}}{\dot{m}_{p-in}} \quad (7)$$

상기의 이론적 모델을 활용하여 입자의 크기 및 공정변수에 따른 사이클론 분리기의 성능을 예측하기 위하여 Al_2O_3 입자($\rho_p=1100 \text{ kg/m}^3$)가 공기에 혼합되어 있는 것을 가정하고 시뮬레이션을 실시하였다. 사이클론의 치수는 몸체직경에 대한 각부의 치수를 표준화하여 사용하는 경우가 많으며, 본 연구에서도 Table 1 에 나타난 것과 같은 사이클론의 형상 및 치수를 가정하였다.

Fig. 3 은 이론적 모델에 의하여 사이클론의 분리효율을 예측한 결과를 보여주고 있다. 입자의 크기가 크고 사이클론 유입속도가 증가할수록 입자에 작용하는 원심력의 크기가 증가하여 분리효율이 상승하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 마찰계수가 0.1 인 경우 크기 $40\mu\text{m}$ 이상의 입자는 유입속도 5m/s 이상의 조건에서 모두 분리가 가능하였다 하지만 $5\mu\text{m}$ 이하의 미립자는 30m/s 의 빠른 속도 조건에서도 약 50% 이하의 분리효율을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 유입속도의 증가가 분리효율을 향상시키는데 기여하지만 10m/s 이상의 속도에서는 효율의 증가가 둔화되는 경향을 보였다. Fig. 3(b)에서 볼 수 있는 것처럼 사이클론 벽면의 마찰계수도 분리효율에 현저한 영향을 미치는 것으로 판단되며, 작은 마찰계수 조건인 경우 높은 분리효율을 기대할 수 있다. 사이클론 입구의 유입속도를 20m/s 로 고정했을 때 마찰계수 0.2 이하에서 마찰계수 감소에 따른 분리효율을 증가가 두드러졌고, 그 이상의 값에 대해서는 영향이 미미했다. 마찰계수가 0.05 이하인 경우 $10\mu\text{m}$ 이하의 입자에 대한 분리효율이 최대 70% 까지 가능하나 마찰계수가 0.2 이상인 경우에는 분리효율이 30% 미만이었다. 마찰계수가 0.01 인 경우에는 $5\mu\text{m}$ 크기의 입자도 약 50% 이상 분리가 가능하였다. 이와 같은 마찰특성의 영향은 입자의

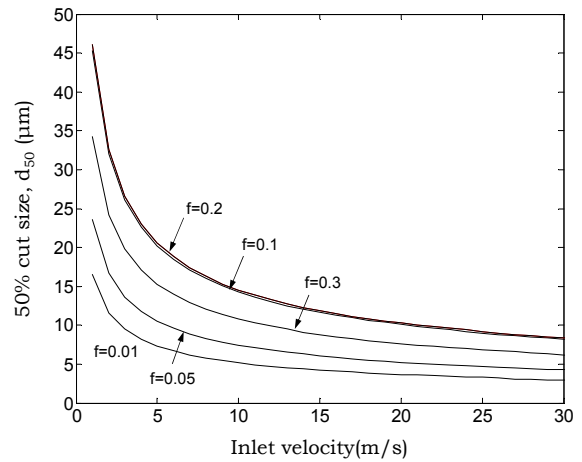


Fig. 4 Simulated values of the 50% cut size of the cyclone separator

유동속도와 관련이 있는 것으로 보인다. 마찰계수의 증가하면 유체의 선회운동시 접선방향 속도를 저하시키기 때문에 벽면으로 밀어내어지는 입자의 양이 상대적으로 감소하여 분리효율에 영향을 미치게 된다.

사이클론의 성능을 평가하기 위한 기준으로 50%의 분리효율을 가지는 입자의 크기로 정의되는 절단입경 d_{50} 을 Fig. 4 에 나타내었다. 입구속도 5m/s 부근에서 사이클론의 분리성능이 급감하는 것을 볼 수 있으며, 30m/s 이상의 속도에서는 마찰특성에 관계없이 절단입경이 $10\mu\text{m}$ 이하의 값을 가졌다. 또한 $5\mu\text{m}$ 이하의 절단입경을 가지기 위해서는 0.01 이하의 표면 마찰계수와 10m/s 이상의 입구속도가 요구되었다.

본 절에서는 이론적 모델링을 통해 사이클론 분리기의 분리효율 및 절단입경을 예측하였으며, 다양한 공정변수들이 사이클론의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 향후 원하는 크기의 미립 물질 분리와 성능 향상 위한 사이클론 분리기의 설계 및 최적화에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

3. 실험결과

사이클론 성능평가 및 이론적 모델의 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 5 와 같은 실험장치를 설계 및 제작하였다. 사이클론의 몸통 직경은 175mm 로 설계하였고 나머지 부분의 치수는 Table 1 에 따라 결정하였다. $10, 15, 20, 30\mu\text{m}$ 크기의 Al_2O_3 입자를 공기에 혼합시켜 사이클론에 공급하였으며, 송풍기의 흡입력에 의해서 사이클론 내 선회운동을 유도하였다. 유량계를 통해 입구 속도를 $5\sim 17\text{m/s}$ 범위로 조절하였으며 집진통의 입자를 채취하여 입도별 농도를 분석하였다.

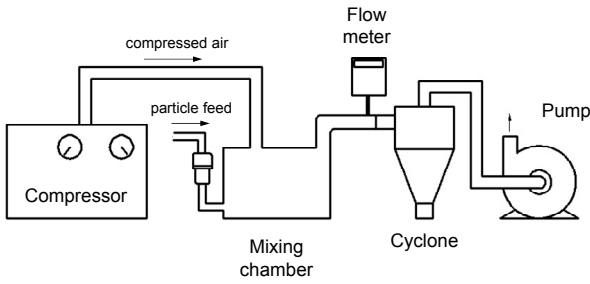


Fig. 5 Schematic diagram of experimental system set up

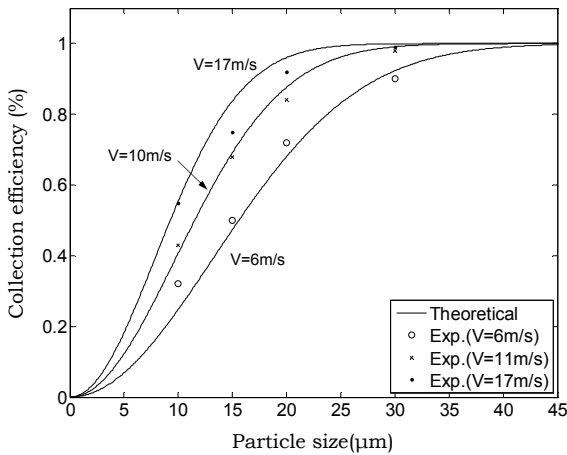


Fig. 6 Comparison of the collection efficiency as a function of particle size

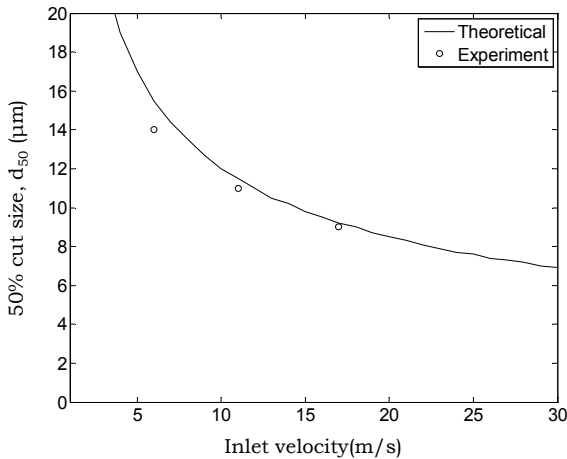


Fig. 7 Comparison of the cut size as a function of inlet velocity

사이클론에 유입되는 입자 크기와 입구 속도에 따른 사이클론 분리효율을 Fig. 6 에 나타내었다. 이론적 모델링으로부터 회귀분석 한 결과 사이클론 내벽의 마찰계수는 0.12 로 예측되었다. 실험 결과는 이론적 모델은 통하여 예측한 분리효율 값과 매우 유사함을 확인할 수 있다. 이론적 모델링에서 언급한 것처럼 입자의 크기와 입구 속도가

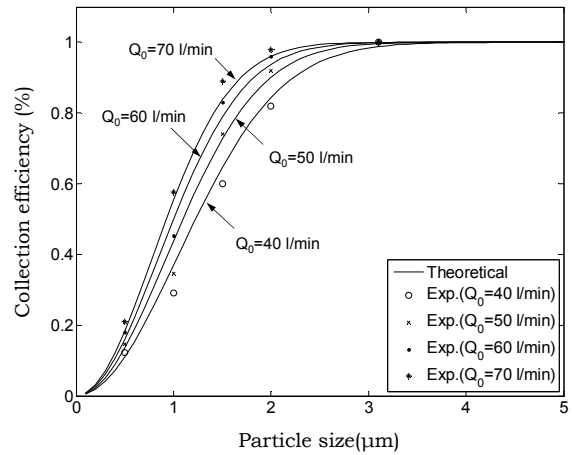


Fig. 8 Comparison of the theoretical model with experimental measurement⁽³⁾ for small particles

증가할수록 분리효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 30 μ m 크기의 입자는 저속조건(i.e. 6m/s)에서도 약 90% 이상을 분리할 수 있었지만, 10 μ m 입자의 경우에는 고속조건(i.e. 17m/s)에서도 60% 미만의 분리효율을 보였다. 10 μ m 미만의 입자의 분리를 위해서는 사이클론 입구속도를 더욱 증가시키거나 사이클론의 재질 및 표면에 대한 연구를 통해 마찰계수를 감소시킬 필요가 있다. 또는 사이클론의 치수의 재 설계하여 미립 물질을 효율적으로 분리할 수 있는 사이클론의 형상을 결정할 필요가 있다.

Fig. 7 은 절단입경 측면에서 이론적 모델링과 실험을 비교한 결과를 보여주고 있다. 이론적 모델링을 통한 절단입경 예측값도 실험결과와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 6, 11, 17m/s 의 입구 속도에 대해서 각각 14, 11, 9 μ m 의 절단입경 값을 얻을 수 있었으며 5m/s 이하의 속도에서는 절단입경 값이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 특히 20m/s 이상의 속도에서는 절단입경 값 d_{50} 의 감소가 둔화되는 것을 볼 수 있는데, 이는 10 μ m 미만의 작은 입자를 분리하기 위해서는 입구속도의 조절만으로는 성능향상에 한계가 있고, 원하는 분리입자 크기에 맞는 사이클론의 재 설계가 필요함을 의미한다.

본 연구에서는 10 μ m 이상의 크기를 가지는 입자에 대한 실험과 모델링 검증을 실시하였으나, 최근 산업계에서는 5 μ m 이하의 크기를 가지는 입자의 분리에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 이전 연구⁽³⁾에서 수행된 실험 결과를 참고하여 작은 입자를 대상으로 이론적 모델과 실험결과를 비교하였다. Kim⁽³⁾ 등은 유리를 이용하여 몸통직경

30mm의 소형 사이클론을 제작하였고, 0.5~2 μ m 크기를 가지는 PSL 입자 (Monodispersed polystyrene latex)를 대상으로 사이클론의 분리효율을 측정하였다. Fig. 8에 나타난 것처럼 설계된 사이클론은 3 μ m 이상의 크기를 가지는 입자를 모두 분리할 수 있었다. 또한 본 연구의 이론적 모델은 0.5 μ m의 매우 작은 입자에 대해서도 비교적 정확하게 분리효율을 예측할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

사이클론은 대기에 혼합되어 있는 다양한 크기의 미립 물질을 선별하여 수집하고 농축하기 위한 장비로 산업계의 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 사이클론의 작동 메커니즘에 대한 근본적인 이해를 넓히기 위하여 이론적, 실험적 연구를 수행하였다.

(1) 사이클론 분리기의 기하학적 특성과 유동 파라미터가 미치는 영향을 고려하여 사이클론의 분리효율과 절단입경을 계산하기 위한 이론적인 연구를 진행하였다. 사이클론 입구속도가 증가하고 내벽의 마찰계수가 감소할수록 사이클론의 성능은 향상되었으며, 이론적 모델링을 통해 이를 정량적으로 분석할 수 있었다.

(2) 소형 사이클론 분리를 설계, 제작하였고 이론적 모델의 견실성을 검증하였다. 0.5~30 μ m 범위의 크기를 가지는 입자를 대상으로 비교한 결과, 이론적 모델을 통한 분리효율과 절단입경의 예측 결과는 실험을 통한 측정 값과 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

(3) 입자의 크기, 유동 속도, 마찰계수 등의 공정변수는 사이클론 분리기의 성능에 현저한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 하지만 공정변수의 변화만으로 사이클론의 성능을 향상시키는 데에는 한계가 있었고 사이클론의 재 설계가 요구되었다. 따라서 향후 원하는 크기의 입자에 맞는 사이클론

구조 및 형상에 대한 연구가 필요하며, 다양한 형상 변수 및 공정 파라미터들의 영향 및 상호작용에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Choi, C. R., 2007, "Flow Characteristics and Residence Time of Activated Carbon in the Cyclone for Optimized Design of an Adsorption/Catalysis Reactor," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 31, pp. 416~424.
- (2) Stairmand, C. J., 1951, "The Design and Performance of Cyclone Separators," *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, Vol. 29, pp. 356~383.
- (3) Kim, J. C. and Lee, K. W., 1990, "Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 1003~1015.
- (4) Iozza, D. L. and Leith, D., 1990, "The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 598~606.
- (5) DeOtte, R. E. Jr., 1990, "A Model for the Prediction of the Collection Efficiency Characteristics of a Small, Cylindrical Aerosol Sampling Cyclone," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 12, pp. 1055~1066.
- (6) Grane, R. L., Barbaris, L. N. and Behrouzi, P., 1992, "Particulate Behavior in Cyclone Separators with Secondary Gas Extraction," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, pp. 765~768.
- (7) Wedding, J. B., Weigand, M. A. and Carney, T. A., 1982, "A 10 μ m Cutpoint Inlet for the Dichotomous Sampler," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 16, pp. 602~606.
- (8) Zhao, B., 2005, "Development of a New Method for Evaluating Cyclone Efficiency," *Chem. Engineering and Process.*, Vol. 44, pp. 447~451.
- (9) Avci, A. and Karagoz, I., 2003, "Effects of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators," *Aerosol Sci.*, Vol. 34, pp. 937~955.
- (10) Avci, A. and Karagoz, I., 2001, "Theoretical Investigation of Pressure losses in Cyclone Separators," *Int. Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, pp. 107~117.