

Numerical investigation of ceramic particle movement for injected gas flow rate in cyclone separator system

Hyo Sang Woo, Kwang Bo Shim and Yong-Chae Chung[†]

CPRC, Department of Ceramic Eng., Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received April 22, 2003)

(Accepted May 1, 2003)

Abstract Using computational fluid dynamics (CFD) method, we investigated three-dimensional fluid flow field and particle movement with respect to the injected gas flow rate variation in typical cyclone separator system. The results of numerical investigation were deduced by coupling the analysis of fluid flow field with Navier-stokes equation and the tracking of the particle trajectory with Lagrangian approach. It was shown that the increasing of injected gas flow rate resulted in the increasing of pressure loss in the separator. This change of inner pressure had an effect on an aspect of the fluid flow in the separator. Particle movement was determined by fluid flow in the separator and was fully depended on a diameter of particles under the fixed flow rate. Increasing of injected gas flow rate was led to an increasing of the trace of particle, so the particles moved to the lower part of the separator. For this reason, the minimum diameters of the particles were decreased and increased the separation rate under the fixed particle diameter. In conclusion, the changes of injected gas flow rate have an important factor to the fluctuation of the fluid flow field and particle trajectory in the separator.

Key words Cyclone separator, Particle separation, Particle movement, Ceramic particle, CFD (Computational Fluid Dynamics)

사이클론 분리기 시스템 내에서의 가스 주입 유속에 따른 세라믹 입자 거동 전산모사

우효상, 심광보, 정용재[†]

CPRC, 한양대학교 세라믹공학과, 서울, 133-791

(2003년 4월 22일 접수)

(2003년 5월 1일 심사완료)

요약 전산유체역학을 이용하여 전형적인 구조를 갖는 사이클론 분리기 시스템 내에서의 주입 가스 유동 및 입자 거동해석을 통해 가스 주입 유속에 따른 입자 거동 양상을 3차원적으로 해석하였다. 해석 결과는 Navier-stokes 방정식을 이용한 유체 유동 현상과 Lagrangian 접근법을 이용한 입자 거동 경로 추적을 결합시켜 도출되었다. 주입 유속이 증가함에 따라 내부 압력 손실이 증가하였고 이런 내부 압력 변화는 분리기 내의 유체의 유동 양상에 영향을 미쳤다. 입자의 거동은 유체의 유동에 의해 결정되었으며 일정 유속에 대해서는 입자의 크기에 크게 의존하였다. 그리고 주입 유속의 증가는 입자의 경로를 증가시키면서 분리기의 하부 영역으로 이동시켰다. 이로 인해 분리기내에 존재하는 입자의 최소 크기가 작아지며 일정 크기의 입자의 경우 분리율이 증가하였다. 결론적으로 가스 유입 유속의 변화는 내부의 유체 유동 변화와 입자 거동 양상에 중요한 요인이 된다.

1. 서론

사이클론 분리기는 간단한 구조와 경제적 절감의 이유로 가스와 같은 유체내에 분산되어 있는 입자를 분리해 내는 장치로 광범위하게 사용되고 있으며, 내부의 유동

에 의해 발생하는 원심력을 이용하여 가스로부터 입자를 분리하는 원리를 이용한다. 따라서 분말합성과 같은 입자의 입도 분석이나 분류가 필요한 공정에서 사이클론 분리기는 중요한 역할을 한다[1].

현재까지 다양한 형태의 사이클론 분리기에 대한 이론적, 실험적, 수치해석적인 접근[2-5]이 이루어 졌으며, 특히 수치해석을 이용한 접근 방법은 분리기내의 유동현상과 입자 거동을 설명하기 위해 매우 유용하다. 이러한 방법은 사이클론 분리기내의 유체의 복잡한 유동현상과

[†]Corresponding author
Tel: +82-2-2290-0507
Fax: +82-2-2281-5308
E-mail: yongchae@hanyang.ac.kr

유체 내에서 이동하는 입자의 거동양상을 수식적으로 확인할 수 있으며, 공정 변수 조절이 자유롭기 때문에 손쉽게 조건 수정이 가능하고 공정조건을 최적화 하는 것이 가능하다. 따라서 수치해석의 정확한 예측은 실제 공정을 위한 필수적인 정보 제공을 위해 중요한 역할을 할 수 있다.

입자가 일정한 속도를 가지고 원운동을 할 때, 비록 크기는 변하지 않지만 속도 벡터의 방향은 연속적으로 변한다. 이러한 속도 방향의 변화는 속도 크기의 변화에 의한 입자 가속처럼 입자의 가속도 운동을 이끌어 낼 수도 있다[6]. 이처럼 내부의 속도의 방향과 크기 변화는 유체내에 존재하고 있는 입자의 거동과 상호 연관성이 있으므로 본 연구에서는 주입 유속 변화에 의해 영향을 받는 내부의 복잡한 유동 하에서 입자들이 어떠한 거동을 가지는 지에 대해 수치해석 방법을 통해 예측하고자 하였다.

2. 실험 방법

사이클론 분리기내의 유체유동과 입자거동은 3차원적인 유체-입자 유동해석 방법을 통해서 수행되었다. 사이클론내 입자 거동에서는 전체 사이클론 내 입자의 농도가 매우 작기 때문에 유체와 입자의 상호 작용은 무시되었으며[2] 이러한 가정 하에 유체유동과 입자들의 거동은 각각 독립적인 수치해석이 적용되었다. 즉, 분리기내의 유체 유동의 계산을 선 수행하여 유체 유동을 해석한 다음 해석된 유체 내에서 입자 거동에 영향을 미치는 항력(drag force)과 중력을 고려하여 유체 내 입자의 거동경로 해석이 수행되었다[3, 4]. 본 연구에서는 이러한 유동 및 입자 거동해석을 위해서 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 위한 상용 코드인 CFD-ACE 패키지를 이용하였다.

2.1. 사이클론 분리기

유동해석 수행을 위해 사용된 사이클론 분리기는 Fig. 1에서 보여지는 것과 같이 KOVACO(KO-RYEO VACUUM CO.)에서 제안된 전형적인 사이클론 분리기 형태이다. 분리기내에서는 주입구를 통해 입자가 분산되어 있는 운반 가스가 주입되면 분리기내에서 소용돌이 유동이 발생하게 되고, 이러한 유동에 의해 유도되는 원심력 때문에 분산된 입자들이 분리기내의 벽쪽으로 이동하는 현상이 발생한다. 이동된 입자들은 일차 소용돌이 유동에 의해 유도되는 이차 유동의 영향으로 분리기의 입자 분리 챔버(settlement chamber)를 향해 이동하게 되고, 입자가 분리된 가스는 중간 튜브(gas exit tube)를 통해 사이클

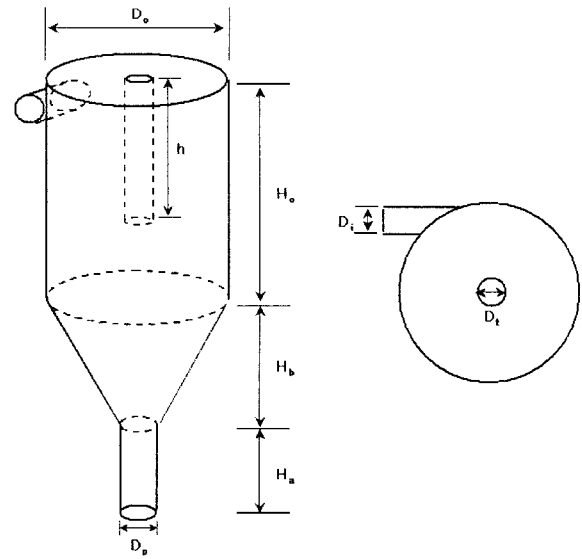


Fig. 1. Schematic diagram of cyclone separator (KOVACO model).

론 분리기에서 빠져나간다[1-4]. 본 연구에서는 이러한 수치해석을 수행하기 위해 사이클론 분리기를 6개의 계산영역으로 구성하였으며, 분리기 내부 격자는 unstructured mesh를 통해 사면체형태로 해석요소를 생성시켰다.

2.2. 수치해석법

2.2.1. 유체 유동해석

입자가 분산되어 있는 가스의 분리기내 유동 해석은 각 경계조건에 따른 속도(모멘트)와 압력에 대한 편미분방정식 해석을 통해 수행된다. 해석을 위한 가스는 steady 및 incompressible 유체로 가정하였으며[3] 이러한 유동을 해석하기 위해서 전형적인 유체방정식인 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 방정식의 일반적인 형태는 다음과 같다[7].

$$\nabla \cdot (\rho Vv) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{Mx^i} \quad (1)$$

여기서 ρ , V , v , μ 는 각각 유체의 밀도, 속도벡터, 속도, 점성이며 p 는 정적압력, x^i 는 좌표 성분, 그리고 S_{Mx^i} 는 모멘트 소스이다.

2.2.2. 입자 거동에 관한 해석

유체 내에서의 입자 거동은 입자의 이동 방향과 속도에 대한 상미분방정식을 Lagrangian 접근법을 이용하여 풀고 이를 통해 각 입자들의 경로를 추적하는 방법을 통해 해석되었다[3, 4].

입자 거동을 지배하는 기본 방정식은 일반적인 운동량 방정식을 이용한다[2].

$$m \frac{dv_p}{dt} = F \tag{2}$$

여기서 m 은 입자의 질량, v_p 은 입자의 속도, 그리고 F 는 입자에 영향을 미치는 힘이다.

사이클론의 경우 입자를 이동시키는 유체의 밀도보다 입자의 물리적 밀도가 상당히 크면 유체를 통해 이동하는 입자에 영향을 미치는 가장 지배적인 힘은 항력(drag force)이기 때문에 입자에 영향을 미치는 힘에 항력과 입자의 미치는 중력을 함께 고려하였다. 이를 식(2)에 적용하면, 다음과 같다[7].

$$m \frac{dv_p}{dt} = C_D \rho (U-v)|U-v| \frac{A_p}{2} + mg \tag{3}$$

여기서 C_D 는 drag coefficient, ρ 와 U 는 각각 가스(유체)의 밀도와 속도, A_p 는 입자의 면적 혹은 부피, 그리고 g 는 중력가속도이다.

이러한 방정식을 바탕으로 식(3)을 각각의 시간 간격에 따른 적분방법을 통하여 각 입자의 내부 거동 경로를 추적하였다. 그리고 입자가 사이클론 내 벽에 충돌 시에는 입자의 반발계수에 의한 모멘텀 손실을 통해 입자의 경로가 수정될 수 있도록 하였다[3].

2.3. 입자 분리율 계산

위의 유체의 유동과 유체 내 입자 거동 경로 해석을 통해 유체의 주입 유속변화에 따른 각각의 입자에 대한 분리율을 계산하였다. 입자 분리율은 주입구에서 주입된 입자의 개수(concentration)와 가스 튜브를 통해 방출된 입자의 개수를 이용하여 다음 식을 통해 얻었다.

$$\text{separation rate} = 1 - \frac{N_{p,\text{out}}}{N_{p,\text{in}}} \tag{4}$$

여기서 $N_{p,\text{in}}$ 와 $N_{p,\text{out}}$ 는 주입구와 배출구에서의 입자의

Table 1
Dimensions of separator and properties of gas and particle

Geometric dimensions of cyclone separator (KOVACO)	
Diameter of the cyclone separator	D_c 500 mm
Diameter of the gas exit tube	D_t 78.3 mm
Diameter of the inlet cross section	D_i 78.3 mm
Diameter of the particle settle chamber	D_p 101.8 mm
Height of the gas exit tube	h 395 mm
Height of the upper cylinder of cyclone separator	H_c 605 mm
Height of the middle cone of cyclone separator	H_b 351.26 mm
Height of the lower cylinder of cyclone separator (the settlement chamber of particles)	H_a 238 mm
Properties of the carrier gas and dispersed particle	
Argon gas (Ar) kinematic viscosity	2.29E-005 m ² /s
Quarts particle density	2500 kg/m ³ coefficient of restitution 0.8

개수(concentration)이다.

본 연구는 위의 수치해석 방법 및 절차를 통해 상용코드를 이용하여 해석 모델을 생성한 후 실제 실험에서 사용되는 입자 운반 가스인 아르곤 가스(Table 1)의 유체 해석을 수행하고 가스에 분산되어 있는 입자인 quartz계 입자(Table 1)를 주입구면의 random한 위치에 각각의 크기를 갖는 입자 500개를 주입하여 각 입자에 대한 거동 경로 해석을 통해 주입 유속 변화에 따른 분리율을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유체유동해석

입자의 운반 역할을 하는 아르곤 가스를 일정 유속으로 분리기내로 주입시켜 내부 속도 및 압력 변화에 의한 사이클론 분리기내 가스 유동 양상을 확인하였다. Fig. 2는 분리기내의 유체의 속도 벡터 방향을 나타내는 것이며 이를 통해 분리기내에서 발생하는 소용돌이에 의한 일차 vortex 유동과 분리기 내의 벽과 가스 배출 튜브의 벽을 따라 발생하는 유도된 이차 유동 및 분리기내에서 국부적인 영역에서의 순환 유동을 확인할 수 있다. 이와 같이 사이클론 분리기 내에 유입된 유체는 복잡한 유동 현상을 가지면서 주입구로부터 가스 배출구 방향으로 이동하고 있다. 이러한 이차 유동과 순환 유동에 의한 복잡한 유체 유동은 입자의 움직임에 영향을 미쳐 입자 거동 경로를 결정하는데 중요한 역할을 하게 되고 가스로부터 입자를 분리시켜 분리된 입자를 분리 챔버를 향해

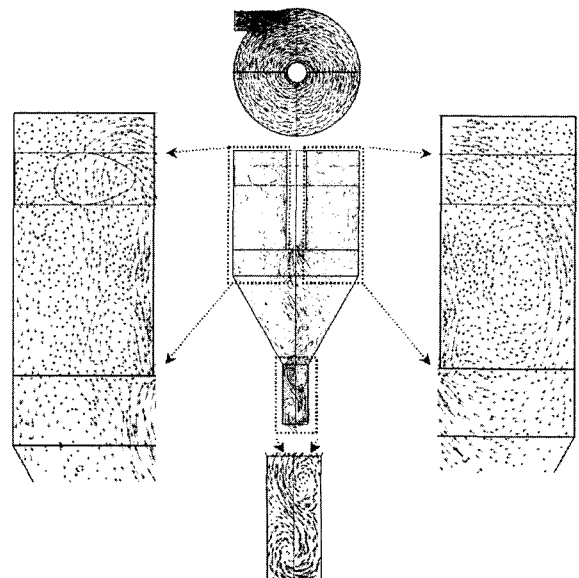


Fig. 2. Gas velocity vector plot in cyclone separator.

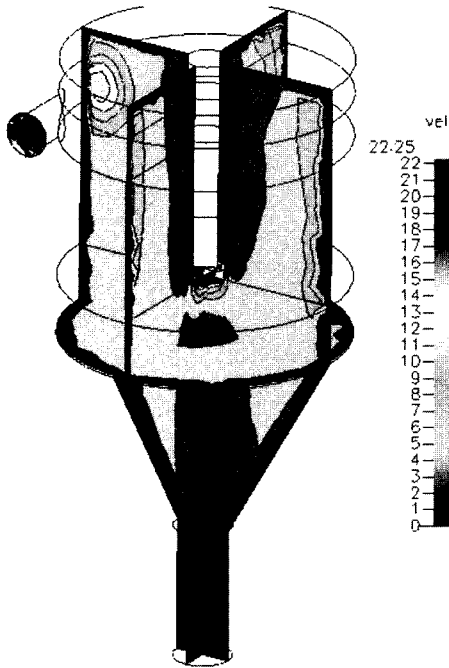


Fig. 3. Gas velocity magnitude and velocity distribution in separator (inlet velocity = 17.5 m/s).

분리기내 하부 영역으로 유도하는 역할을 한다. 따라서 입자를 운반하는 가스의 내부 유동현상은 사이클론 분리기 내에서 입자분리 과정을 결정하는데 중요한 역할을 한다.

Fig. 3은 해석된 분리기내 유체의 속도 벡터 크기에 대한 분포를 나타내고 있다. 분리기내 유체의 속도 분포는 가스 배출 튜브를 중심으로 전형적인 비대칭형 분포를 가지고 있으며, 유체의 내부 속도는 분리기 내부보다는 벽 부근에서의 속도 크기가 더 큰 것을 볼 수 있고 가스 분리기 내부 유동의 속도 중에서 가스 배출구 부근

에서 가장 빠른 속도 크기를 갖고 있다. 이는 가스의 내부 유동의 속도 분포는 내부에서 발생하는 정적 압력 차이에 의해 결정되며 특히 가스 배출 튜브 부근에서는 다른 영역보다 압력 기울기가 상대적으로 크기 때문에 출구 부근에서의 빠른 속도를 가지는 것으로 사료된다. 따라서 내부의 유체 유동의 속도와 내부 압력 변화는 밀접한 상호 관계가 있음을 확인할 수 있다[8].

주입 유속의 변화에 따른 분리기 내부의 압력 변화를 알아 보기 위해 다양한 주입 유속에서의 내부 압력 손실을 계산하였다. 내부 압력 손실은 유체의 복잡한 내부 유동에 의해 발생하는 것으로 주입구에서의 유체의 정적 압력과 가스 배출구에서의 정적압력의 차이로 측정되었으며[9] Fig. 4(a)는 다양한 주입 유속 변화에 따른 분리기내의 압력 손실을 나타낸다. 보여지는 바와 같이 유체의 주입 속도가 증가함에 따라 내부 압력 손실도 증가하였다. 이는 기존의 실험 결과들과 그 경향성이 잘 일치한다[3, 5]. 결국 주입 유속이 증가함에 따라 내부의 압력 손실이 증가하므로 이는 분리기 내부의 각 지점에서의 유체의 속도도 증가시킬 것으로 사료된다. Fig. 4(b)는 일정한 주입속도(inlet velocity = 25 m/s)에서 가스 배출구의 압력변화에 의한 영향을 살펴보고자 내부 압력손실과 가스 배출구에서의 최고 속도를 나타낸 것으로, 가스 배출구의 압력이 낮아질수록 내부 압력 손실이 증가하였고 이는 배출구를 통해 빠져나가는 가스의 속도증가를 가져왔다. 따라서 사이클론 분리기내의 내부 압력 손실은 가스의 주입유속과 실제 펌프를 통해 가스를 빨아들이는 배출 압력에 의해 영향을 받아 결정될 수 있음이 예측된다.

3.2. 분산된 입자의 거동해석

수행된 유체 유동해석을 바탕으로 운반 가스와 함께

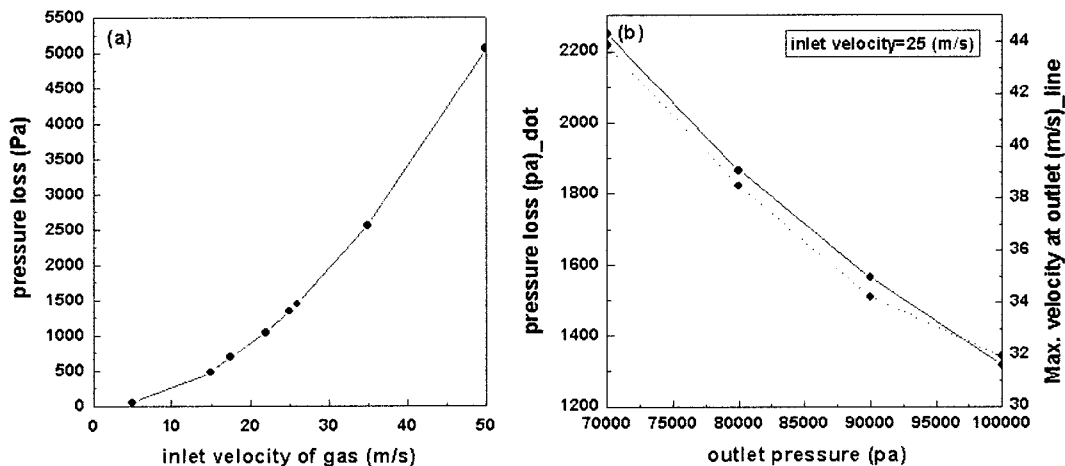


Fig. 4. (a) Static pressure loss in separator for gas inlet velocity variation (b) Static pressure loss and outlet max. velocity in separator for outlet static pressure variation (inlet velocity = 25 m/s).

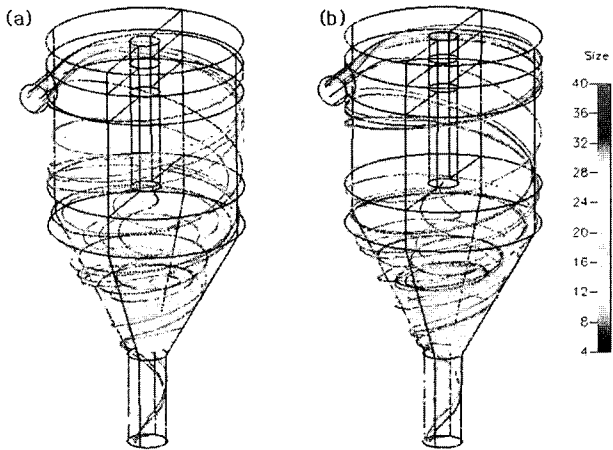


Fig. 5. Particle trajectories (a) for gas inlet velocity = 17.5 m/s (flow rate = 5.05 m³/min) (b) for gas inlet velocity = 22 m/s (flow rate = 6.35 m³/min).

분리기내로 주입된 입자의 거동을 각각의 시간 간격으로 추적하여 입자 경로를 해석하였다. 기존의 연구에 따르면 일반적으로 고정된 유체 유속에 대하여 발생한 사이클론 내 입자의 거동은 주로 입자의 크기에 의존한다고 보고된 바 있다[5]. 본 연구에서는 일정 유속에 대한 입자의 거동 양상의 입자 크기 의존성을 알아 보기 위해 가스 주입속도 17.5 m/s(가스 유속 5.05 m³/min)일 때의 각각의 크기(4 μm~40 μm, 10 classes)를 갖는 입자의 거동 경로를 추적하여 Fig. 5(a)에 나타내었다. 해석된 입자의 경로를 보면 주입구를 통해 운반 가스와 함께 주입된 입자들은 분리기내의 벽을 따라 이동하면서 입자의 크기에 따라 다른 입자 거동 경로를 나타내고 있다. 그 중 20 μm 이상의 큰 입자들은 분리기 내의 아래쪽 지역으로 유도되어 분리기의 conical 하부 영역에 머물다가 그 영역의 벽 근처에서 정체되었으며, 특히 약 30 μm 이상의 입자에 대해서는 분리 챔버 내로 입자들이 이동하는 거동 양상을 나타내었다. 20 μm 이하의 작은 입자들의 경로는 유체의 유동에 따라 하강하다 특정 영역에 이르러 가스 튜브를 향하는 상승 유동에 의해 가스 튜브를 통해 분리기내를 빠져나가는 것을 볼 수 있었다. 이를 종합해 보면 주입된 입자들은 유체의 소용돌이 유동에 의해 발생한 원심력의 영향을 받아 벽을 따라 이동하여 내부 유체의 유동에 의해 거동하다 입자의 크기에 따라 그 입자가 내부에 분리되거나 외부로 방출되는 것이 결정된다고 할 수 있다. 이러한 현상은 크기가 작은 입자보다 크기가 큰 입자에 가속이 걸려 내부 유동의 속도에 의한 영향을 덜 받기 때문이라 사료된다. Fig. 5(b)는 주입속도가 22 m/s(가스 유속 6.35 m³/min)일 때의 입자 거동경로를 보여주고 있다. 유체 유속이 작을 때와 같이 주입된 입자들은 분리기 벽을 따라 이동을 하였지만 주입 유속의 증가에 의해 입자들이 이동하는 경로 즉, 분

리기 내에서 이동하는 입자의 회전 횟수가 상대적으로 증가하였으며 각 입자들이 분리기 내의 더 낮은 영역까지 이동하는 거동양상을 나타내었다. 특히 낮은 유속에서는 분리기를 벗어났던 크기의 입자 가운데 16 μm~20 μm 범위의 입자들이 주입 유체의 유속이 증가함에 의해 분리기내를 벗어나지 못하는 현상이 일어났다. 이는 위에서 언급된 바와 같이 유속의 증가로 인해 입자가 상승 유동의 내부 속도가 적은 영역 내로 이동되어 적은 유속에서 받았던 유동의 영향을 상대적으로 덜 받았기 때문에 발생한 것으로 사료된다. 본 연구를 통해 주입 가스와 함께 유입된 입자의 거동은 일정 주입 유속에서는 기존 연구에서 보고 된 것[5]과 같이 입자의 크기에 따라 거동양상이 크게 영향을 받고 있음이 확인되었다. 그리고 같은 크기의 입자에 대해서는 그 입자의 거동 양상은 주입 유속 변화의 영향으로 경로가 변하며 이러한 거동 경로의 변화는 입자의 거동이 운반하는 유체의 분리기내 유동 양상 변화에 크게 의존함을 알 수 있다. 즉 주입되는 유체의 유속 변화는 내부 유동에 영향을 미치게 되어 이러한 유체 내에 존재하는 입자의 거동양상을 결정한다.

3.3. 입자의 분리율

이미 해석된 입자 운반 가스 유체의 분리기내 유동해석과 그러한 유동 내에서 영향을 받는 분산 입자의 거동 해석을 결합하여 다양한 가스 주입 유속에 따른 분리기내 계산된 입자의 분리율 관계를 분석하였다. Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 주입 유속이 17.5 m/s(가스 유속 5.05 m³/min)일 경우 19 μm 이하의 입자들은 유입된 가스 유동에 의해 분리기를 벗어났으며 19 μm 이상의 입

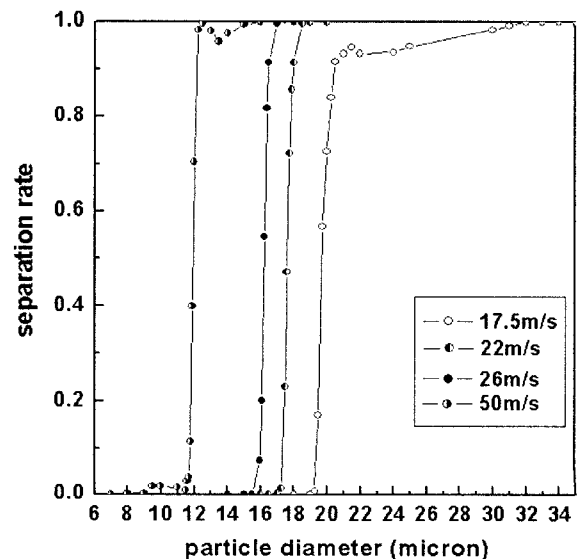


Fig. 6. Effect of inlet velocity on Particle separation rate.

자 크기에 이르러 입자 분리기내에서 입자들이 잔류하기 시작했다. 증가양상을 살펴보면 19 μm ~20 μm 범위의 입자들은 분리율이 급격하게 증가하고 있으며, 30 μm 입자 크기에 도달하자 그 이상의 크기를 갖는 입자들은 분리기내에 전부 잔류되었다. 앞에서 언급된 바와 같이 입자의 거동양상은 주입유속에 영향을 받기 때문에 주입 유속이 증가하면 유체속에 분산되어 있는 입자의 속도도 증가하게 되어 분리기내에서 수집되는 입자의 크기에 영향을 미치게 된다. 이를 위해 주입유속을 증가시킨 결과 유속이 증가함에 따라 분리율의 증가 양상은 전체적으로 유사한 경향성을 가졌으나 분리기내에 잔류하는 입자의 최소 크기 및 50%의 분리율을 갖는 입자들을 비교해 볼 때 그 크기가 감소함을 볼 수 있다. 즉, 주입 유속이 26 m/s(가스 유속 7.51 m^3/min)일 경우 낮은 유속에서는 분리기내를 벗어났던 15~16 μm 크기를 갖는 입자들도 분리기 내에 약 10% 정도는 잔류하고 있다는 것을 알 수 있다. 결국 주입 유속이 증가함에 따라 더 작은 크기의 입자들을 분리해 낼 수 있으나 만약 다양한 입자 크기로 분산되어 있는 입자일 경우에는 분리기 내부에 작은 크기의 입자들도 잔류하기 때문에 실제 분리기내에 존재하는 입자들의 크기는 일정한 분포를 가지지 못한다는 사실을 고려할 필요는 있다. 본 연구의 분리기내에서 각 주입 유속에 따른 입자의 분리율 계산을 통해 분리기 내에서 얻을 수 있는 한계 입자 크기는 주입되는 유체의 주입 유속에 의해 영향을 받아 결정이 되며, 고정된 크기의 입자의 경우에는 유속을 증가 시킴으로써 그 입자의 분리율 증가를 가져올 수 있다는 사실을 알 수 있다. 결국 입자 운반 가스의 주입 유속 조절을 통해 원하는 크기의 입자 분리 및 입자 분리율 향상이 가능하다. 유체에 의해 분리기를 벗어나지 못하고 잔류한 입자들은 주로 크기에 따라 분리기 내의 특정 영역에 분포하게

된다[1]. Fig. 7(a)는 주입 유속 17.5 m/s(가스 유속 5.05 m^3/min)일 때의 잔류하는 입자의 분리기내 분포양상을 보여주고 있다. 크기가 작은 입자들은 분리기 중앙의 다양한 영역의 벽 부근에서 잔류를 하고 있지만 크기가 증가할수록 입자들은 일정 영역(분리기의 하부 영역)에 대부분 잔류를 한다. 이는 입자의 크기가 큰 입자일수록 가지는 질량이 증가하게 되고 이로 인해 복잡한 내부 유체 유동의 영향을 덜 받기 때문으로 사료된다. 실제 원하는 크기의 입자를 분리하기 위해서는 분리 챔버(settlement chamber) 영역까지 입자 이동이 필요하지만, 해석에 의한 결과에 의하면 약 27 μm 이상의 입자들만 분리 챔버로 이동하여 잔류하는 양상을 보이며 이보다 작은 크기를 갖는 입자들은 대부분 분리 챔버 영역까지 이동하지 못하고 분리기 conical 하부 영역(separator height 0.3 m 부근)과 가스 출구 입구 주변(separator height 0.7 m 부근)에 잔류하였다. 이는 입자의 거동이 분리기내의 유체 유동에 의한 영향을 받기 때문으로, 다시 말하면 질량이 작은 입자들의 거동은 유체의 유동 변화에 의해 많은 영향을 받기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다. 특히 분리기내에는 아래방향으로 향하는 유동과 윗부분을 향하는 유동이 동시에 존재[5]하므로 이러한 유동이 상충하는 영역에서의 입자 정체현상으로 인해 입자의 크기에 따라 특정 영역에 잔류하는 현상이 발생하는 것으로 사료된다. Fig. 7(b)는 주입 유속 변화에 따른 약 50%의 분리율을 가지는 입자들에 대한 분리기 내 분포양상을 나타내고 있다. 일정 유속 하에서는 대부분 입자들은 가지는 질량에 의해 잔류하는 영역이 결정되었지만, 일정한 범위 내에서의 주입 유속 변화에 따른 입자의 분포영역은 주입 유속에 따른 입자의 거동 경로 변화에 의해 대부분 분리기의 conical 하부영역에 집중적으로 분포하였다. 결국 분리기내에서 잔류되는 입자의

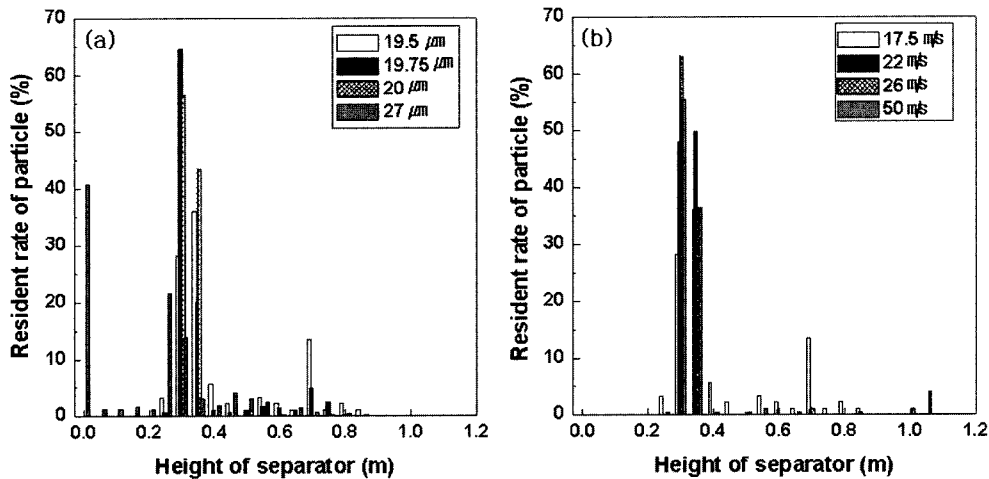


Fig. 7. Particle distribution (a) for gas inlet velocity = 17.5 m/s (flow rate = 5.05 m^3/min) (b) with about 50% separation rate for gas inlet velocity variation in separator.

분포 영역은 일정 유속 하에서는 질량에 의존하며 주입 유속 변화에 의해서는 입자의 거동 경로에 의해 많은 영향을 받는다고 볼 수 있다. 왜냐하면 주입 유속이 증가할수록 약 50%의 분리율을 갖는 입자의 크기가 작아지면서 입자의 질량이 감소하였지만, 분포영역은 특정지역(conical 하부영역)으로 대부분 한정되기 때문이다. 그러나 유속이 50 m/s(가스 유속 14.45 m³/min)일 경우처럼 어느 한계점 이상 증가하게 되면 분리기내의 존재하는 입자 중 일부 입자는 주입구가 존재하는 분리기의 상부영역(separator height 1.0~1.1 m 부근)에 유체 유동에 의해 구속되어 잔류하는데 이러한 분포 현상은 실제 입자 분리를 위한 방해 요인이 될 수 있다. 결국 입자의 분리율 및 분포양상은 주입 유속과 입자 질량에 의존한다는 사실을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구를 통해 분리기내에서의 복잡한 유체 유동 현상을 확인할 수 있었으며, 이러한 유동은 분리기 내부 압력 변화에 의해 발생함을 알 수 있었다. 또한 주입 유속과 분리기의 내부 압력 변화와의 관계를 통해 내부 압력 변화는 유체의 주입 유속과 배출구의 압력에 의해 영향을 받으며 분리기 내부 유체 유동양상에 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 유체 내에 분산되어 있는 세라믹 입자의 거동은 유체의 내부 유동 양상에 의존하기 때문에 유체의 주입 유속 변화는 입자의 거동 경로를 변화시켜왔다. 일정 유속에 대해서는 입자 거동은 주로 입자의 크기에 따라 내부 유체 유동의 영향이 결정되어 경로변화가 발생하였으며, 같은 크기의 입자에 대해서는 주입 유속의 변화가 입자의 거동경로 변화를 발생시키는 중요한 요인이 되었다. 유체의 유동해석과 유체 유동 내에서 이동하는 입자의 거동 해석을 바탕으로 계산된 분리율과 분리양상을 통해서서는 각 주입유속에 의한 잔류

최소 입자 크기의 결정이 가능하였으며, 분리기내 입자의 분포영역은 입자의 질량 및 주입 유속에 따라 특정영역으로 결정된다는 사실을 확인했다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 차세대 신기술개발 사업 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Yoshida, K. Fucui, K. Yoshida and E. Shinoda, "Particle separation by iinoya's type gas cyclone", Powder Technol. 118 (2001) 16.
- [2] L. Ma, D.B. Ingham and X. Wen, "Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones", J. Aerosol Sci. 31(9) (1999) 1097.
- [3] Th. Frank, E. Wassen and Q. Yu, "Lagrangian prediction of disperse gas-particle flow in cyclone separator", IMCF'98 Proceeding No. 217 (1998).
- [4] Th. Frank, Q. Yu, E. Wassen and J. Schneider, "Experimental and numerical investigation of particle separation in a symmetrical double cyclone separator", 3rd ASME/JSME Proceeding No. FEDSM99-7865 (1999).
- [5] H. Yoshida, "Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by a revised-type cyclone", Colloids and Surfaces: A 109 (1996) 1.
- [6] K.B. Schnelle and C.A. Brown, "Air pollution control technology hand book", Ch.21 (CRC press LLC, 2002).
- [7] CFD Research Corporation, "CFD-ACE(U) Modules", Version 6.6 manual (2001).
- [8] L.X. Zhou and S.L. Soo, "Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator", Powder Technol. 63 (1990) 45.
- [9] F.L. Fassani and L. Goldstein Jr., "A study of the effect of high inlet solids loading on a cyclone separator pressure drop and collection efficiency", Powder Technol. 107 (2000) 60.