

Effect of internal pressure variation on the ceramic particle separation characteristics : computer simulation

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

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

(Received October 21, 2003)

(Accepted October 28, 2003)

Abstract By controlling the internal pressure in the cyclone separator, we investigated the separation characteristics of Al_2O_3 , Fe_2O_3 particles with the internal pressure variation. 3-dimensional Lagrangian approach was applied for the analysis of the particles separation, and then the minimum cut diameter of the separated particles and the separation rate were calculated through tracking the particle trajectories. The density of the argon gas for transporting particles was decreased corresponding the pressure decrease, consequently, caused the internal pressure drop in the cyclone separator. For the reason the finer particles were separated as the pressure was changed from an atmospheric pressure to a low pressure. Specifically, at 50 torr pressure, Al_2O_3 particles of the size of about $4\mu m$ and Fe_2O_3 particles of about $3\mu m$ could be separated.

Key words Computational Fluid Dynamics (CFD), Lagrangian approach, Cyclone separator, Ceramic particle separation Disperse multiphase modeling

분리기 내부 압력 변화에 따른 세라믹 입자 분리 거동 전산모사

우효상, 심광보, 정용재[†]

CPRC, 한양대학교 세라믹공학과, 서울, 133-791

(2003년 10월 21일 접수)

(2003년 10월 28일 심사완료)

요약 분리기 내 압력 조절을 통하여 압력 변화가 세라믹 입자 Al_2O_3 , Fe_2O_3 분급에 미치는 영향을 수치 해석적으로 분석하였다. 입자 분급 해석을 위해 3차원 Lagrangian approach를 이용하였으며, 이를 통해 입자의 분리기 내 거동 경로를 추적하여 각 압력에 따른 분리 가능한 최소 입자 크기(cut-diameter)와 분리율(separation rate)을 계산하였다. 압력 감소는 입자를 운반하는 아르곤 가스의 밀도를 감소시키면서, 분리기 내부 압력 손실을 줄이는 원인이 되었다. 이로 인해 상압에서 분리기 압력이 저압 상태로 변함에 따라, 더 미세한(수 μm) 입자가 분리 가능함이 예측되었다. 특히 50 torr의 저압 하에서 계산된 세라믹 입자의 분급 양상을 분석하면, Al_2O_3 입자는 $4\mu m$, Fe_2O_3 의 경우는 $3\mu m$ 크기의 입자 분리가 가능하였다.

1. 서론

가스나 유체로부터의 고체 입자 분리 공정이나, 입자의 입도 분석 그리고 분류 공정은 공정기술 분야에서 중요한 영역이다. 이러한 공정을 위한 장치인 사이클론 분리는 간단한 구조적 형태와 경제적 절감의 이유로 분말 입자 분급에 광범위하게 사용되고 있다[1, 2]. 실제 분리기 내에서 일어나는 유체의 유동과 입자 거동 분석은 매우 복잡한 이유로 기존의 입자 분리 공정에서는 주

로 실험적 방법에 의해 입자분리를 위한 공정분석이 수행되었다[3, 4]. 하지만 최근 들어 입자 거동 및 가스 유체 유동을 해석하기 위한 이산화된 다상 유동에 대한 다양한 수치 해석적 접근이 이루어지고 있으며[1, 5, 6], 이러한 수치 해석적 방법을 이용하여 분리기 내 입자 거동을 보다 유용하게 설명할 수 있게 되었다. 또한 수치 해석적 방법을 이용하면 원하는 공정 변수들의 조절이 쉽기 때문에, 손쉽게 공정 조건 수정이 가능하며 공정 조건의 최적화가 용이하게 된다.

사이클론 분리기내의 유동 및 입자 거동에 영향을 미치는 변수는 분리의 구조적 변수, 가스 주입속도 및 방향, 압력 등의 공정적 변수로 나눌 수 있다. 기존 연구에서 이미 분급 효율을 향상시킬 수 있는 다양한 분리

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

기 구조에 대한 결과들이 보고되었기 때문에[7, 8], 본 연구에서는 공정적 변수 측면으로 접근하였다. 특히 입자 분리 공정에서 부각되고 있는 관심사로, 내부 압력 감소를 줄이고 분리 효율을 높일 수 있도록 하기 위해 공정 변수 중 하나인 분리기 압력 조절을 통하여 다양한 압력 변화에 따른 입자의 거동 양상을 수치 해석적으로 해석하여 압력이 입자 거동에 미치는 영향을 예측, 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 운반가스인 아르곤 가스에 분산된 세라믹 입자 Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 분리기내 내부 압력 변화에 대한 거동양상 변화를 3차원 Lagrangian approach를 이용하여 수행되었다[9]. 지배적인 수치 알고리즘은 가스 내에 분산된 많은 수의 이산화된 상의 거동 방정식의 계산에 기초를 두고 있으며, 이러한 방정식 계산을 위해 상용화된 전산 유체 코드인 CFD-ACE(version 6.6) 패키지를 이용하여 해석하였다[10].

3차원 Lagrangian approach는 전형적인 사이클론 분리기 내에서의 가스 유동 해석 조건에서 가스와 입자, 두 상 사이에 작용하는 힘을 고려하여 입자의 경로를 추적한다. 가스 내 입자 거동양상의 형성을 위해서는 입자에 작용하는 항력과 중력이 고려된다. 입자 거동을 지배하는 방정식은 다음과 같은 뉴턴의 운동방정식에서 유도된다.

$$m \frac{dv_p}{dt} = F \quad (1)$$

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

위 식(1)에 항력과 중력에 의한 힘을 적용하면, 다음과 같다.

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

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

위 방정식을 각각의 시간 간격에 따른 적분법을 통해 각 입자의 분리기 내부에서의 거동 거리를 계산하여 입자 경로가 추적되며, 입자가 분리기 내벽에 충돌 시에는 입자의 반발계수를 이용한 입자의 모멘텀 손실을 통해 입자의 거동 경로가 수정된다[9].

해석을 위한 분리기[11]는 Fig. 1에서 나타난 바와 같이 3차원 형태로 7개의 계산 영역으로 구성되어 있으며 각 영역은 정사면체 형태의 유한 요소로 구성하였다. 그

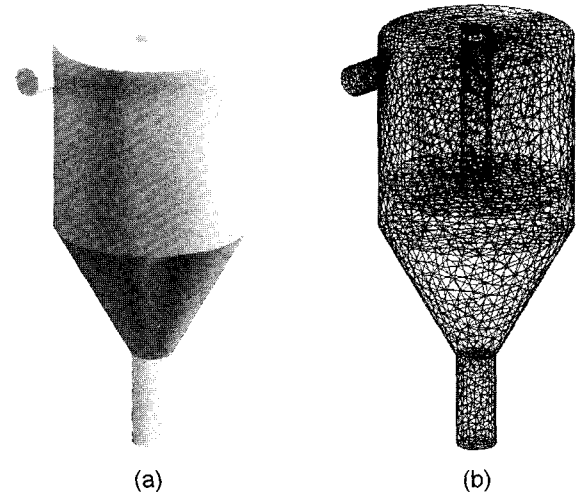


Fig. 1. (a) Geometry and (b) Mesh quality of cyclone separator (*model dimensions : [9]).

Table 1
Properties of the carrier gas and dispersed particles

	Density (kg/m ³)	Coefficient of restitution	Kinematic viscosity (m ² /s)
Argon	Ideal gas law	-	2.29E-005
Al_2O_3	3970	0.8	-
Fe_2O_3	5250	0.8	-

리고 아르곤 가스는 분리기의 입구를 통해서 주입된 후 가스 배출 출구를 통해 분리기를 빠져나간다. 입자 Al_2O_3 , Fe_2O_3 (Table 1)는 일정 주입 속도를 가지면서 입구의 입구의 위치에 주입되고 분리기 내에서의 거동 경로가 추적된다. 압력 조절은 상압(760 torr)을 기준으로 초기 정적 압력을 감소시키면서 분리기를 구성하고 있는 전체 계산 영역에 감소된 압력을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

입자 운반의 역할을 하는 아르곤 가스의 밀도는 이상 기체 방정식을 따르기 때문에, 분리기 내부 압력 변화는 아르곤 가스의 밀도와 관계가 깊다. 즉, 내부 압력의 변화는 분리기내 존재하는 가스의 밀도의 변화를 의미하게 되며, 이러한 변화는 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 상압(760 torr)과 저압(50 torr)의 분리기 내부 가스 밀도 사이의 상대적 차이를 가져오는 것처럼 압력이 감소함에 따라 가스 밀도도 감소하였다. 이러한 가스 밀도의 감소는 식(2)에 의해 고려된 바와 같이, 가스 내에 분산되어 있는 세라믹 입자에 저항력으로 작용하는 항력의 감소를 동반하기 때문에, 저압 하에서 실제 입자의 거동은 상압에 비해 운반하는 유체(아르곤 가스)에 의한 저항을 적게 받을 것으로 사료된다. 따라서, 상압 하에서 입자의

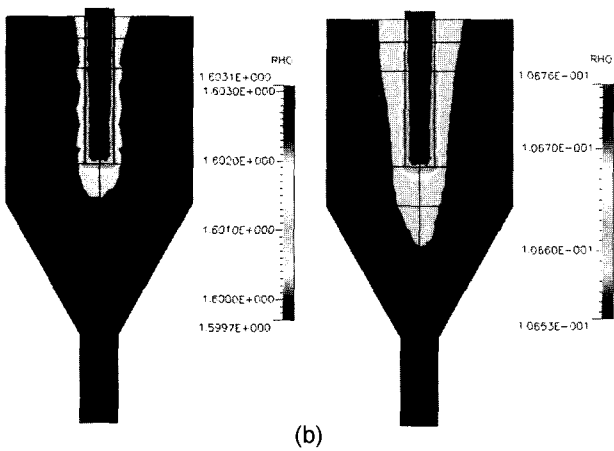
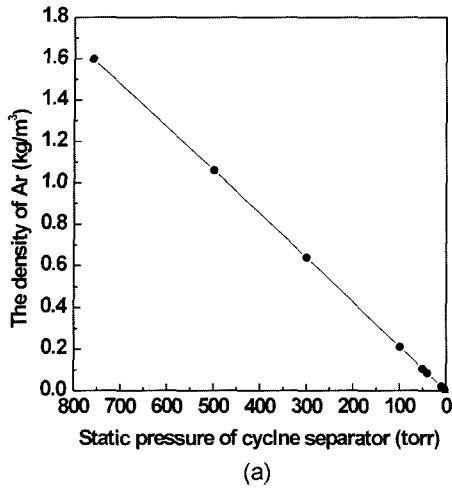


Fig. 2. (a) Density of the argon gas for the static pressure (b) Comparative contour of density at 760 torr and at 50 torr.

거동성보다는 저압 하에서 입자의 분리기 내 거동이 보다 자유로워 질 수 있고, 이는 분리를 통한 입자의 분급을 더 효율적으로 진행시킬 수 있을 것으로 예측할 수 있다.

다양한 압력(760, 350, 50 torr)하에서, Al₂O₃ 입자의

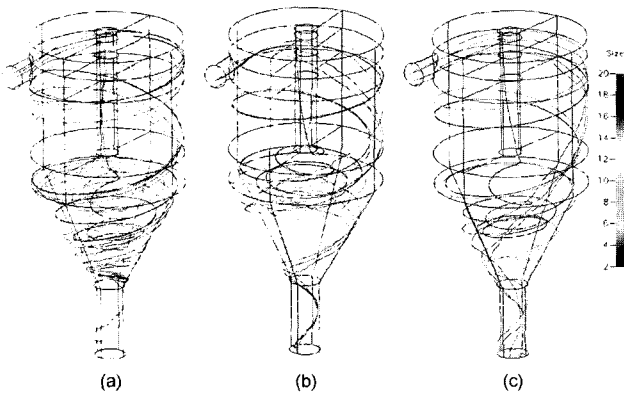


Fig. 3. Trajectory of Al₂O₃ particles for static variation in cyclone separator (inlet velocity = 10 m/s, density = 3970 kg/m³). (a) 760 torr (b) 350 torr (c) 50 torr.

실제 분리기 내부 거동인 입자 거동 경로를 Fig. 3을 통해 비교하였다. 입자는 2~20 μm 범위에서 2 μm 크기 단위로 10개의 등급으로 입자를 구성하여 주입되었으며, 각각의 거동 경로는 각 크기에 해당하는 입자의 거동 경로를 나타내고 있다. 상압의 경우 대부분의 입자들이 분리기내에서 분리되지 못한 채 아르곤 가스와 함께 벗어났으며, 단지 18 μm 이상의 입자만이 분리기 내 하부 영역에 잔류하였다. 하지만 압력이 점차 낮아 질수록 보다 미세한 입자들이 분리기 하부 영역으로 이동하면서 내부에서 분리되었다. 350 torr 압력 하에서는 약 10 μm 이상의 입자가 분리되기 시작했으며, 특히 50 torr의 압력 하에서는 약 4 μm 이상의 입자들이 외부로 방출되지 못하고 분리를 통해 분리되었다. 이는 Fig. 2를 통해 확인한 내부 아르곤 가스의 밀도 감소로 인해 입자가 받는 저항력이 감소되었기 때문이라고 사료되며, 위의 예측과 실험적으로 일치하였다.

압력 변화에 따른 입자의 거동 변화 및 분급 현상을 좀더 구체적으로 살펴보기 위해, 위와 같은 조건 하에서 더 다양하게 압력을 변화시키면서 분리기내에서 분리되는 최소의 입자 크기(cut diameter)와 압력 손실을 계산하여 Table 2에서 나타내었다. 압력 변화에 따라 각 압력에서 분리되는 최소 입자의 크기는 명확하게 작아지고 있음을 재차 확인할 수 있었으며, 또한 분리기 내부 압력 손실도 줄어들음을 확인할 수 있었다. 이러한 내부 압력 손실의 감소는 분리 한계 입자 크기(cut diameter)의 감소의 원인이 된다. 왜냐하면 실제 내부 압력 손실은 분리기 내에서의 가스의 유동을 이끌어 내는 원동력으로 작용하므로[12], 압력 손실이 적어지게 되면 내부 가스의 유동 속도가 감소하게 되어 가스 내에 분산되어 있는 입자의 거동에 대한 가스 유동의 구속이 적어지기 때문이다. 따라서, 미세한 입자 분급을 위해서는 분리기 내의 저압 조절이 중요한 공정 변수임을 알 수 있었으며, 압력이 낮아질수록 더 미세한 입자 분리가 가능하였다.

저압(50 torr) 하에서 각 입자의 거동을 해석을 통하여 세라믹 입자의 분급 정도를 분석하기 위해, 다양한 각 입자 크기에 대한 분리율(separation rate)을 계산하였다.

Table 2 Pressure drop and cut diameter for static pressure variation

Pressure (torr)	*Pressure drop (%)	**Cut diameter (μm)_ Al ₂ O ₃
760	31.89	18
500	28.66	16
300	27.42	12
100	23.15	8
50	21.34	4

*Pressure loss = (static pressure at the gas exit/at the entrance) × 100.

**Cut diameter : minimum particle diameter that can be separated.

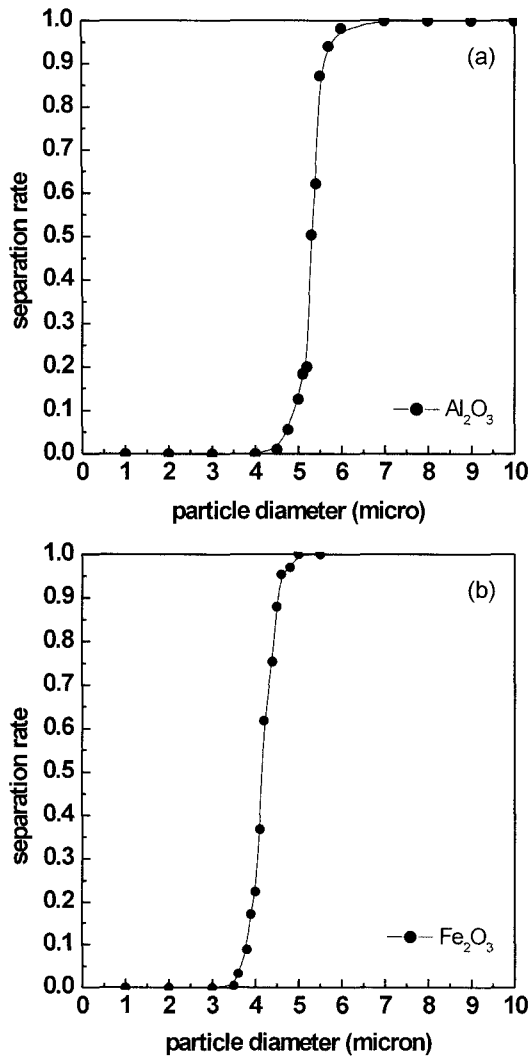


Fig. 4. The separation rate of (a) Al₂O₃ (b) Fe₂O₃ at 50 torr in cyclone separator (inlet velocity = 10m/s).

계산된 분리율은 주입된 입자의 개수(concentration)와 분리기 내를 벗어나는 입자 개수 비를 이용하였다[13].

$$\text{Separation rate} = 1 - \frac{N_{p,\text{out}}}{N_{p,\text{in}}} \quad (3)$$

이 식을 통해 계산된 분리율을 바탕으로 일정 압력 하에서 각 입자의 크기에 따른 분리 양상을 분석하였다. 일정한 주입속도(inlet velocity = 10 m/s)로 가스가 유입되는 조건에서 Al₂O₃에 대한 분리율을 Fig. 4(a)에서 나타내었다. 해석된 입자의 수로 각 크기 당 500개의 입자를 주입시켜 전체 입자 거동 경로를 추적하여 계산된 결과이다. Al₂O₃ 입자의 경우에는 저압 하에서 4 μm 이상의 입자부터 분리기 내에서 잔류하기 시작했으며, 7 μm 이상의 입자는 100 % 분급이 가능한 것으로 예측되었다. 이전 보고한 연구에 의하면 상압 조건에서는 굵은 세라믹 입자(약 10~20 μm)들의 분급을 확인하였으나[11], 저

압 하에서는 분리율의 변화 양상이 상압 조건 하에서와 다소 차이를 보였으며 입자 크기에서도 보다 미세한(수 μm) 입자 분급이 가능함을 확인할 수 있었다. 이는 분리 공정을 위해 적용되는 압력의 감소가 운반 가스인 아르곤 가스의 밀도를 감소시킬 뿐 아니라 내부 압력손실을 줄임으로써, 입자 거동에 미치는 유체 가스의 영향력을 줄여 입자의 거동 속도(momentum)와 경로(trajjectory)의 변화를 야기시켰기 때문에 발생한 것으로 사료된다. Fig. 4(b)에서는 다른 세라믹 입자인 Fe₂O₃에 대한 분리율을 나타내고 있다. Al₂O₃ 입자와 비교해 볼 때, 분급되는 경향성은 유사하였으나, 최소 분리 입자 크기는 3 μm였으며 100 % 분급 가능한 입자 크기는 5.5 μm 이상으로 다소 작아졌음을 정량적으로 확인했다. 이는 Al₂O₃와 Fe₂O₃ 입자가 가지는 밀도를 비교해 볼 때, 밀도(질량)가 큰 입자일수록 가스 유동의 영향을 덜 받고 중력의 영향이 더 크기 때문에 하부 영역으로 이동하려는 확률이 높아져 분리 가능한 한계 입자 크기가 작아진 것으로 사료된다. 그러나, 두 입자의 밀도 차이에 비해 계산된 한계 입자 크기는 그 값 차이가 미세하였으며, 결국 저압 하에서는 입자가 가지는 밀도(질량)에 의한 차이가 입자의 분급 양상을 크게 지배하지는 않는 것으로 사료된다.

결론적으로 입자 분급을 위해 공정 조절 변수인 압력의 감소는 입자의 가스 저항력 감소와 압력 손실의 감소를 유발하기 때문에, 압력 감소는 분리를 통해 보다 미세한 입자를 분리하고 입자의 분리 효율성을 높이기 위한 중요한 공정 변수임을 본 연구를 통해 확인할 수 있었다.

4. 결 론

분리기의 압력 조절은 세라믹 입자 분급을 위한 중요한 공정변수 이다. 본 연구에서는 세라믹 입자 분급에 대한 조절 변수인 압력의 영향을 분석하기 위해 3차원 입자 거동의 수치 해석을 이용하여 입자의 거동 경로를 추적하였다. 분리공정에서의 저압(수십 torr)으로의 조절은 입자의 분리 한계 입자 크기(수 μm)를 감소시킬 수 있었으며, 실제 입자 분급 공정에서 보다 미세한 입자의 분리가 가능하게 하는 공정 조건임을 확인하였다. 이런 현상이 발생한 원인은 분리기 압력이 감소하면서 운반 가스인 아르곤의 밀도 감소와 분리기 내부 압력 손실의 감소를 유도하여, 분산되어 있는 입자에 미치는 가스 영향력(항력)을 감소시켰기 때문으로 규명할 수 있었다. 따라서 분리를 통해 보다 미세한 입자 즉, 수 μm 크기의 입자를 분리하기 위해서나 특정크기의 입자 분리 효율을 높이기 위해서는 분리기의 압력을 수십 torr 정도의 저압 상태로 유지하는 것이 중요하다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Th. Frank, Q. Yu, E. Wassen and J. Schneider, "Experimental and Numerical investigation of Particle separation in a symmetrical double cyclone separator", in Proceeding of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference (1999) Paper No. FEDSM99-7865.
- [2] H. Yoshida, "Three-dimensional simulation of air cyclone and particle separation by a reversed-type cyclone", Col. and Surf. A 109 (1996) 1.
- [3] L.X. Zhou and S.L. Soo, "Gas-solid flow and collection of solids in a cyclone separator", Powder Tech. 63 (1990) 45.
- [4] G. Solero and A. Coghe, "Experimental fluid dynamic characterization of a cyclone chamber", Exp. Therm. And Fluid Sci. 27 (2002) 87.
- [5] L. Ma, D.B. Ingham and X. Wen, "Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones", J. Aerosol Sci. 9 (2000) 1097.
- [6] J. Averous and R. Fuentes, "Advances in the numerical simulation of hydrocyclone classification", *Canadian Metallurgical Quarterly* 36 (1997) 309.
- [7] H. Yoshida, K. Fucui, K. Yoshida and E. Shinoda, "Particle separation by iinoya's type gas cyclone", *Powder Technol.* 118 (2001) 16.
- [8] W. Peng, A.C. Hoffmann, P.J.A.J. Boot, A. Udding, H.W.A. Dries, A. Ekker and J. Kater, "Flow pattern in reverse-flow centrifugal separator", *Powder Tech.* 127 (2002) 212.
- [9] Th. Frank, E. Wassen and Q. Yu, "Lagrangian prediction of dispersion gas-particle flow in cyclone separator", in CD-ROM Proceedings of the 3rd International Conference on Multiphase Flow-ICMF98 (1998) 1.
- [10] CFD Research Corporation, "CFD-ACE(U) modules", ver. 6.6, (CFDRC press, 2001) 14.
- [11] H.S. Woo, K.B. Shim and Y.-C. Chung, "Numerical investigation of ceramic particle movement for injected gas flow rate in cyclone separator system", *J. Kor. Cryst. Growth* 13 (2003) 145.
- [12] A. Avci and I. Karagoz, "Theoretical investigation of pressure losses in cyclone separators", *Int. Comm. Heat Mass Trans.* 28 (2001) 107.
- [13] A. Avci and I. Karagoz, "A mathematical model for the determination of acyclone performance", *Int. Comm. Heat Mass Trans.* 27 (2000) 263.