

회전체 분급기의 원리 및 연구 개발 동향

송동근 · 한방우 · 김학준 · 김용진* · 정상현 · 홍원석
한국기계연구원 그린 환경기계연구본부
(2008년 8월 26일 접수, 2008년 10월 8일 채택)

Research and development of centrifugal classifiers: A review

Dong Keun Song, Bangwoo Han, Hakjoon Kim, Yong Jin Kim*,
Sang Hyun Jeong and Won Seok Hong
*Environmental Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials,
104 Sinseongno, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Korea*
(Received 26 August 2008, accepted 8 October 2008)

Abstract

Concerns on centrifugal classifiers, of which have cut sizes are below few micrometers, have been increased and it is prospected to be used in extensive industries, such as manufacturing the fine minerals, cosmetics, advanced electric materials, and life science. This paper reviews the recent progress of research and development on the centrifugal classifiers. General categorization of classifiers for feeds was assessed and separation mechanism of the classifiers was followed. History of centrifugal classifiers was explored and some points to be improved were briefly indicated. Fundamental theory of the classification by centrifugal classifiers was pearly studied, and advanced and further understandings on factors affecting the separation or grading efficiency are described. Factors determining the classification precision and efficiency of centrifugal classifiers, such as geometry, rotational speed and inclined angle of rotating vanes, feed and air flow rates, and rotor dimensions are reviewed.

Key words : Centrifugal classifier, Rotating classifier, Submicron particles, Cut size

1. 서 론

분체의 크기에 따른 분급은 유체상에 포함된 분진
을 크기에 따라 미세 입자 영역 (fine fraction)과 조대

입자 영역 (coarse fraction)으로 분류하는 공정으로
세라믹, 금속 분말, 제약, 식품, 도료, 안료, 염료, 잉크
제조 공정 등의 산업에서 광범위하게 사용되고 있다.
최근의 첨단 정보 전자 산업에서의 디스플레이 및
프린터 토너 재료 및 전지 재료, 환경 산업에서의 고
효율 환경 촉매 제조, 생명과학 산업에서의 화장품,
의약품, 생화학 제품 제조, 연마 슬러리 제조 산업에

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)42-868-7475, E-mail : yjkim@kimm.re.kr

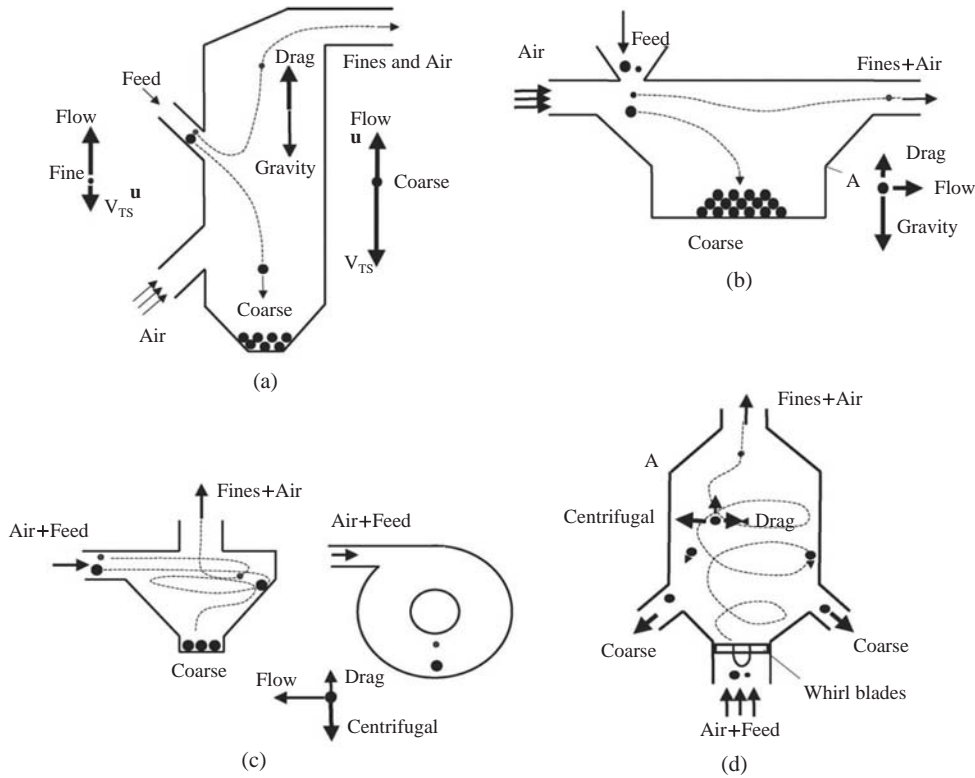


Figure 1. Separation zone: (a) gravitational-counterflow zone, (b) gravitational-crossflow zone, (c) centrifugal-counterflow zone, (d) centrifugal-crossflow zone (Shapiro and Galperin, 2005).

서 분립체 제품의 정밀화와 첨단화가 요구되고 있으며, 그 수요가 점차 증가하고 있다. 또한 분급 대상 분체 입경에 대한 요구도 점차 미세한 영역으로 이동하고 있어, 서브마이크론의 절단 입경을 갖는 분급 장치 기술에 대한 요구가 점차 증가하고 있다.

분체의 입경에 따라 분류하는 분급기는, 분급 대상 분체에 작용하는 힘의 종류에 따라 분류된다. 일반적으로 널리 사용되는 분급 장치는 분체의 크기 및 질량에 따라 작용하는 크기가 다른 중력(그림 1a, 1b)과 원심력(그림 1c, 1d) 또는 관성력을 이용하여 분체를 분급한다. 인가하는 힘의 종류와 더불어 힘의 작용 방향과 유동 방향에 따라 분류하면, 보편적으로 그림과 같이 분류할 수 있다(Shapiro and Galperin, 2005). 중력을 분급에 이용하는 분급기에 비해 원심력을 이용하는 분급기의 분급 입경이 미세하며, 분급에 소요되는 시간 및 분급 성능도 우수하다.

본 논문에서는 앞서 언급한 분급기 중, 수 마이크

로 입자의 분급이 가능한 회전체 분급기의 종류와 분급 원리 및 분급 이론, 최근 연구 개발 동향에 대해 소개하고자 한다.

2. 회전체 분급기

원심력을 이용하여 분체를 분급하는 장치 내부로 공급되는 분체들은 입자와 유동의 속도 차이에 기인하는 항력, 중력과 같은 필드 힘, 원심력과 입자의 관성 운동에 의한 관성력의 적용을 받아 크기에 따라 다른 경로를 따라 이동하게 된다. 일반적으로 입자에 작용하는 항력은 $F_D = f(d^n)$ 과 같이 입경의 함수로 표현되고, 이때 지수 n 은 1과 2사이의 값을 갖는다. 반면, 관성력, 중력, 원심력 등은 입자 질량의 함수로 $F_f = f(d^3)$ 로 표현된다. 따라서, 분급 입경이 감소함에 따라, 입자의 관성력보다는 입자에 작용하는 항력이

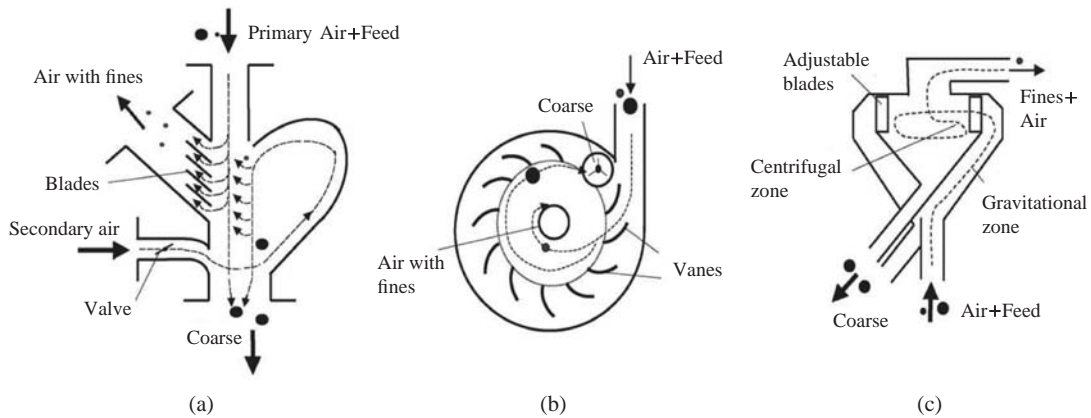


Figure 2. (a) Franken/Buell gravitational-inertial classifier, (b) Vortex classifier, and (c) gravitational-centrifugal classifier (Shapiro and Galperin, 2005).

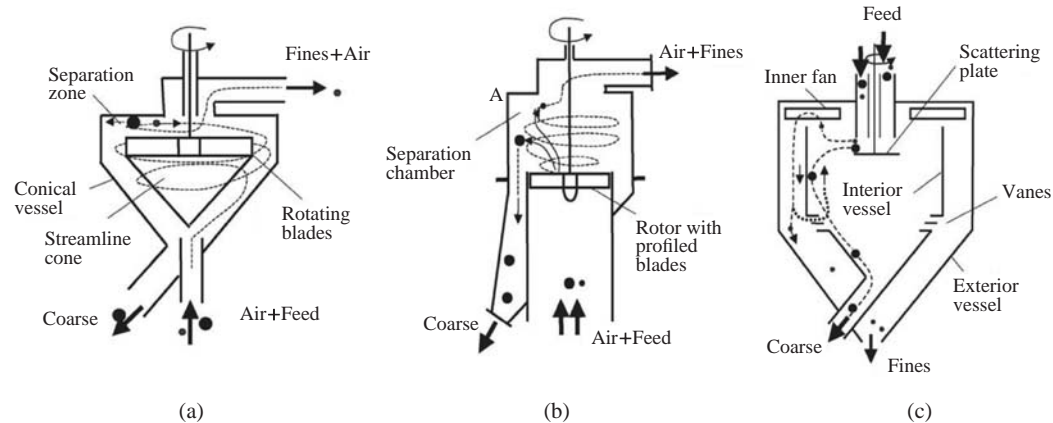


Figure 3. (a) Rotor classifier, (b) classifier with profiled blades, and (c) circulating air classifier (Shapiro and Galperin, 2005).

분급 입경 결정에 보다 중요한 역할을 하게 된다.

원심력을 이용하는 분급기는 공기를 회전시켜 소용돌이를 만드는 방식에 따라 크게 두가지로 분류된다. 소용돌이 분급기(Vortex classifier; 그림 2)에서는 정지된 베인이나 접선 방향으로의 공기 유입을 통해 공기의 회전을 발생시키고, 회전체 분급기(Rotor classifier; 그림 3a)에서는 회전하는 블레이드를 이용하여 공기의 회전을 만든다.

Vortex air classifiers

Rumpf (1952)의 고안에 기초한, 소용돌이 챔버를 포함한 납작하고 평평한 분급기로 Alpine A-G 제품

들이 대표적이다. 분체를 포함한 유동이 경사진 베인을 따라 내부 챔버로 유입되어 나선형 경로를 가지며 이동하고 미세 입자는 중심부의 출구로 배출된다. 미세 분체의 분급에 주로 사용되며 분급 입경은 5~100 μ m 범위를 갖는다.

Gravitational-centrifugal air classifiers

중력에 의한 분급 영역과 원심력에 의한 분급 영역을 갖는 2단계의 분급 장치로 블레이드에 의해 공기의 회전을 발생시킨다. 외곽 원추 하단을 통해 분체가 공급되고 매우 큰 입자는 중력에 의해 분급된다. 남은 분체들은 블레이드를 통과해 원심력에 의한

분리영역으로 이동하며, 회전을 발생시키는 블레이드는 각도를 조절함으로써 분급 입경의 조절이 가능하다. 처리 용량은 20 t/h에 이를 정도이며 시멘트 공장이나 석탄 분급에 주로 사용된다.

Rotor classifiers

회전날을 이용하여 공기의 회전을 만드는 분급기로 하부로부터 유입된 함진 공기가 원추형 용기를 따라 상승한다(그림 3a). 분급 입경은 회전 속도를 조절함으로써 변경이 가능하고, 처리 용량은 1.5 t/h,

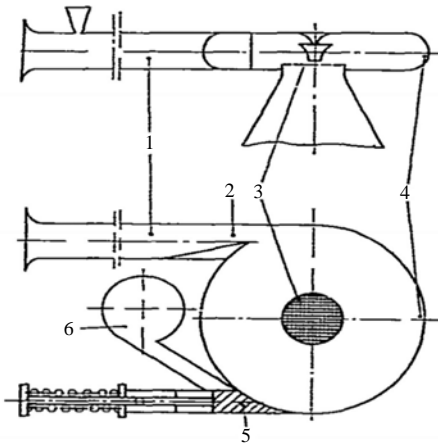


Figure 4. Schematic design of the centrifugal transverse flow classifier proposed by Leschonski & Rumpf (1968/69).

분급 입경은 20~100 μm, 조대 입자 회수율은 70~80%이다. 축 방향의 압축 기능을 하는 프로파일 블레이드를 사용하는 분급기도 여기에 속한다(그림 3b).

Circulating air classifiers

시멘트 산업에서 가장 널리 사용되는 분급기로 대표적인 구조는 그림 3c와 같다. 분체는 상부로 공급되어 회전하는 분산판에 의해 내부 용기로 혼합 공급되어 용기 주변으로 이동한다. 내부 팬의 회전에 의해 상승 기류가 발생하여 미세 입자를 끌어 올리고, 조대 입자는 하부로 밀어내는 기능을 한다. 처리 용량은 800 t/h 정도이고, 분급 입경 조절이 어려우며 분급 성능은 매우 열악한 편이다.

원심력을 이용한 초기의 분급기는 소용돌이 공기 분급기로 원형의 분급기 접선 방향으로 유입되는 공기에 의한 자유 소용돌이 (Free Vortex)를 이용하여 분체를 분급하였다(그림 4). 유입 공기에 의한 소용돌이의 발생을 용이하게 하기 위해 경사진 안내 배인을 설치한 분급기가 고안되었다(그림 5).

유입 공기로 발생할 수 있는 공기의 회전에는 한계가 있었으며 이를 극복하기 위해 분급기 내부에 회전하는 배인을 이용하여 강제적으로 회전 흐름을 발생시키는 회전체 분급기가 제작되었다 (Donaldson Acucut; 그림 6).

고정 배인에 의한 유입 공기의 자연 회전과 고정

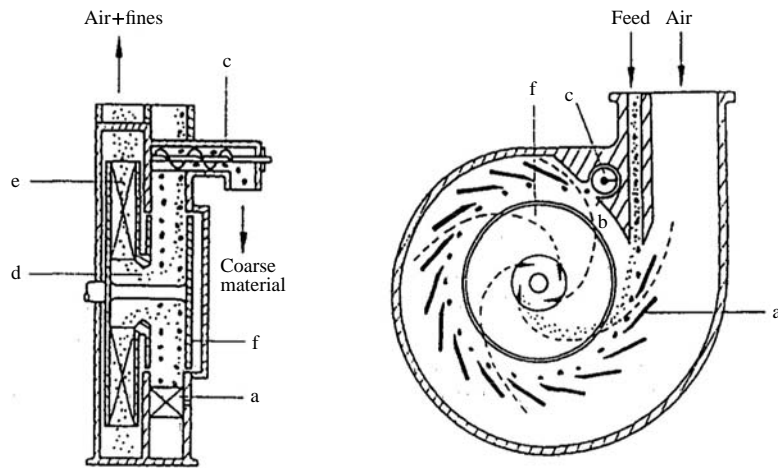


Figure 5. Free vortex classifier Alpine Mikroplex: (a) Adjustable guide vane, (b, c) coarse fraction discharge, (d) fines outlet, (e) fan, (f) rotating walls.

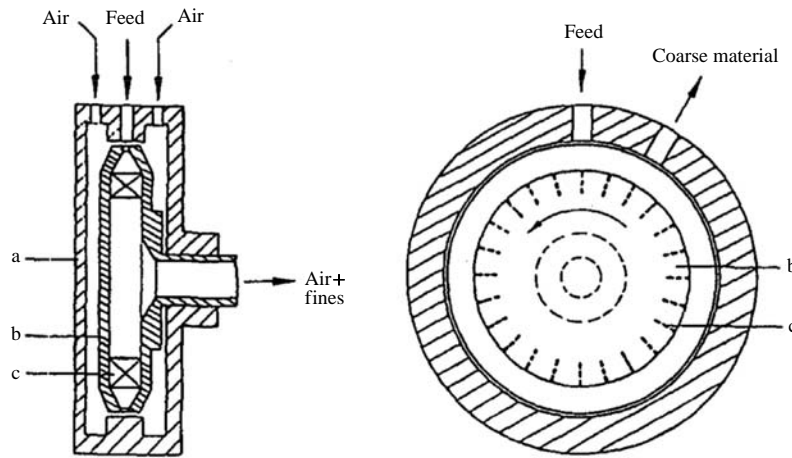


Figure 6. Deflector wheel classifier Donaldson Acucut: (a) Housing, (b) rotor, (c) vanes.

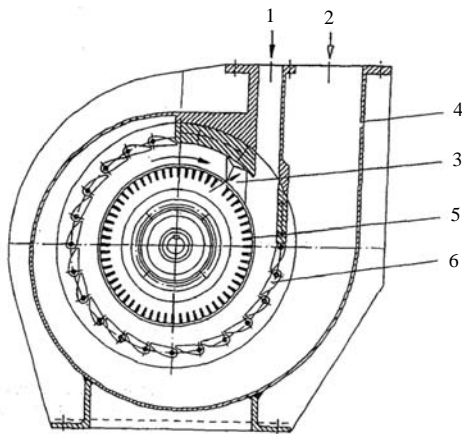


Figure 7. Schematic drawing of the CFD-HD classifier. 1: Product feed; 2: Air inlet; 3: Coarse fraction discharge; 4: Housing; 5: Rotor; 6: Static vanes.

베인 내부에 회전체를 이용하여 강제 소용돌이를 동시에 이용하는 분급기(CFD-HD)가 개발되어 분급 입경의 감소와 분급 성능의 향상에 커다란 진전을 가져왔다(그림 7).

MikroCut MC(그림 8)는 회전 로터(rotor) 및 2차 공기를 이용하여 강제 소용돌이(forced vortex)를 생성하고 미세 영역으로 이동하는 미세 입자의 양을 증가시켜 분급 기율기를 증가시킨다. 강제 소용돌이(forced vortex)를 인가하면, 접선 방향으로 유입되는 공기에 의해서만 소용돌이를 발생하는 자유 소용돌

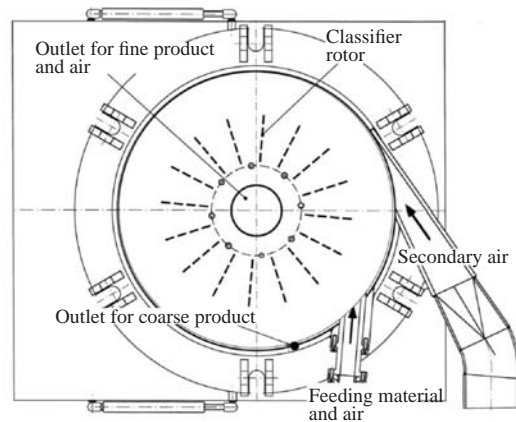


Figure 8. MikroCut MC (Galk *et al.*, 1999).

이 (free vortex) 방식보다 유체와 분진 사이의 운동량 교환을 줄일 수 있어 분급 기율기의 증가를 달성할 수 있다. $15,000 \times g$ 에 해당하는 원심 가속도를 인가하여 d_{97} 값이 $2 \mu\text{m}$ 이하를 달성하였다(그림 9). 이때 선속도는 100 m/s 이며, 최대 500 kg/h 의 처리가 가능하다.

자유 소용돌이만을 이용하는 MikroClassifier CC와 성능 비교(그림 10)에서 Sharpness of cut의 증가를 통해 보다 정밀한 분급이 가능함을 보였으며, 수율 94%로 MikroClassifier CC에 비해 22% 증가하였다. 미세 입자 영역으로 분급되는 입자의 최대 크기도 $20 \mu\text{m}$ 미만으로 감소하여 분급 성능의 향상을 가져

왔다. 아울러 구현할 수 있는 최저 등급 효율을 뜻하는 splitting part가 10% 이하로 감소되어 비교 대상 제품의 30~50%와 매우 큰 차이를 보였다. Mikro-Cut MC는 뛰어난 성능에도 불구하고 매우 복잡한 구조와 높은 초기 비용이 실제 산업에 적용하는 데에 걸림돌로 작용하고 있다.

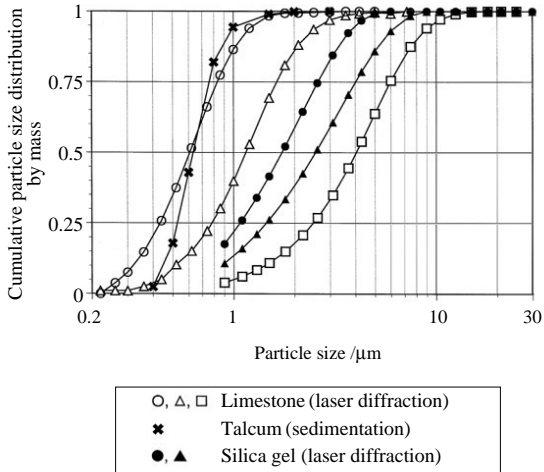


Figure 9. Possible particle size distribution of the fine fraction (Galk *et al.*, 1999).

이에 대한 대안으로 Vortex finder를 회전 로터로 대체한 사이클론 (Dynamic Cyclone)이 개발되었다 (그림 11; Jiao *et al.*, 2006, 2008). Dynamic Cyclone은 기존 사이클론의 분급 기능을 통해 매우 큰 입경의

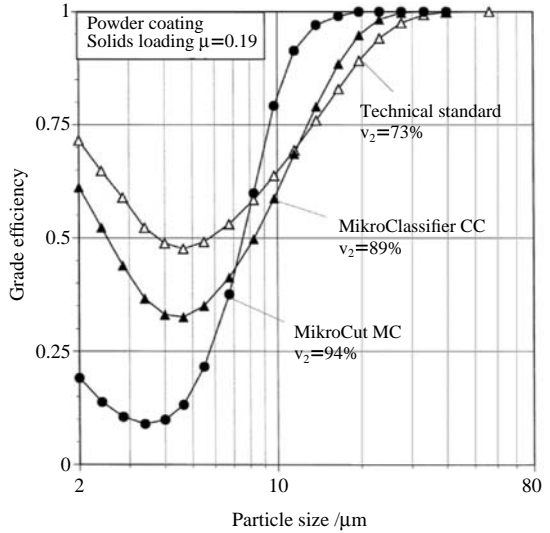


Figure 10. Grade efficiency curve for solids density of 1,500 kg/m³.

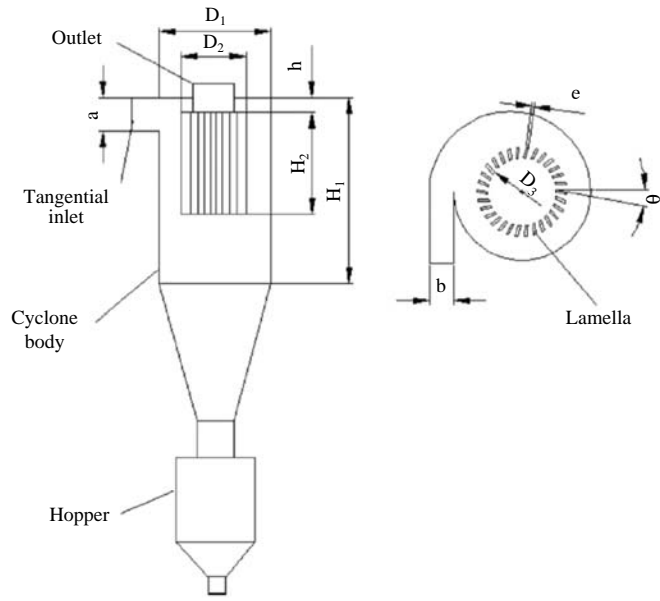


Figure 11. Configuration of a dynamic cyclone.

분체를 분급하고, 회전 로터에 의한 원심력을 이용하여 보다 작은 입경으로 분급하는 2단계의 분리 과정을 거친다. Dynamic Cyclone은 4~8 μm 의 분급 입경을 가지며, 로터의 회전수가 증가함에 따라 분급 입경이 감소함을 실험적으로 보였다 (Jiao *et al.*, 2008). 이외에도 미세 입자의 분급에 적용하기에는 너무 낮은 Cyclone 효율의 향상을 위한 다양한 노력들이 이루어졌으며, 크게 (1) 형상과 구조를 최적화하는 노력 (Stairmand, 1951; Shi *et al.*, 1993)과 (2) 추가적인 장치를 이용하려는 노력 (Ray *et al.*, 1997; Chmielniak and Bryczkowski, 2000, 2001)으로 분류할 수 있다.

3. 분급 이론

분급기의 분급 성능은 입경 (d_p)에 따라 조대 영역과 미세 영역으로 분리되는 비율(일반적으로 투입량

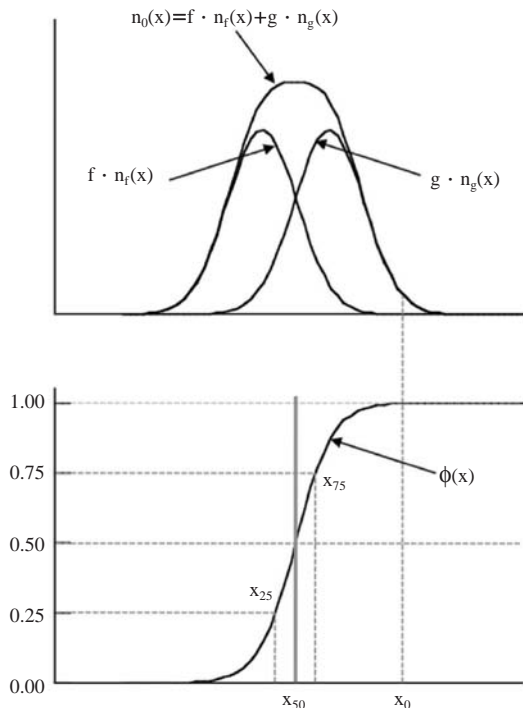


Figure 12. Frequency distribution of the feed $n_0(x)$, the fine $f \cdot n_f(x)$ and the coarse material $g \cdot n_g(x)$ of a cut and the coarse grade efficiency curve $\phi(x)$.

에 대해 조대 영역으로 분리되는 상대적인 양, $f = n_f/n_0$, 여기서 n_0 는 분급기에 투입되는 분체의 크기 분포, n_c 는 조대 영역 (Coarse fraction)으로 분급되는 분체의 크기 분포, n_f 는 미세 영역 (Fine fraction)으로 분급되는 분체의 크기 분포를 의미한다.)을 나타내는 “등급 효율 (Grade efficiency)”, “분급 곡선 (separation curve)”, “Tromp’s curve” 등으로 표현하며, 분급 곡선은 분체의 입경 이외에 분체의 부피나 질량을 기준으로 산정할 수 있다 (Leschonski and Rumpf, 1968/69).

그림 12의 $n_0(x)$ 는 투입되는 분체의 크기 분포를 나타낸다. 그 아래의 분포 곡선 $f \cdot n_f(x)$ 와 $g \cdot n_g(x)$ 는 각각 미세 영역과 조대 영역으로 분급되는 분체의 분포를 나타내며, 상대적인 비율인 f 와 g 는 $g = 1 - f$ 의 관계를 가지며, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$n_0(x) = f \cdot n_f(x) + g \cdot n_g(x) \quad (1)$$

분급 효율 곡선 (Separation efficiency curve)의 분급 성능을 나타내는 정량적인 지표로 절단 입경 (Cut size, d_{50})과 분급 기울기 (Sharpness of cut)가 통용된다. 이때, d_z 는 입경 d_z 까지의 누적 분포의 합이 전체 빈도의 $z\%$ 에 해당하는 입경을 뜻하는 것으로, 절단 입경 (d_{50})은 누적분포의 합이 전체 빈도의 절반이 되는 입경이 되고, d_{25} 와 d_{75} 는 각각 누적 분포의 합이 25%와 75%가 되는 입경을 뜻한다. 분급 기울기 (Sharpness of cut)는 절단 입경을 중심으로 분급 곡선의 기울기로 나타내며, 보통 $\kappa_{10/90} (=d_{10}/d_{90})$ 나 $\kappa_{25/75} (=d_{25}/d_{75})$ 를 사용한다. Sharpness of cut의 값이 1에 가까울수록 분급 곡선의 기울기가 가파르며, 절단 입경을 기준으로 조대 입자 영역과 미세 입자 영역이 뚜렷하게 분리되는 것을 의미한다. κ 이 1인 경우, 이상적인 분급을 의미하며, 분급 성능 곡선은 계단 함수의 형태를 갖는다.

Tromp 곡선은 분급 입경 (cut size)과 분급 성능에 의해 다음과 같이 표현된다 (Austin and Klimpel, 1981).

$$T(d) = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{d}{d_{50}} \right)^m \right] \quad (2)$$

분급기의 성능을 나타내는 지표로 수율 (Product yield)이 있으며, 투입량에 대한 회수량의 질량 비로 나타낸다. 회수하고자 하는 입자의 크기 영역에 따라

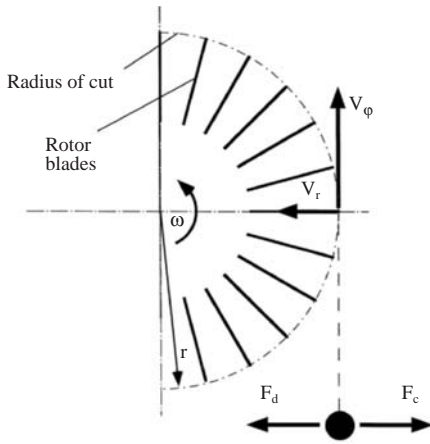


Figure 13. Principle of an impeller wheel air classifier.

$\gamma_f = m_f/m_0$ 또는 $\gamma_c = m_c/m_0$ 로 표현된다.

3. 1 이론 모델

회전체 분급기 내부에 생성되는 소용돌이 면에서 분급되는 입자에 작용하는 힘은 그림 13에 도시한 바와 같다. 질량 m 의 입자가 회전 중심으로부터 반경 r 에서 원 운동을 할 때 입자에 작용하는 힘은 반경 방향으로 원심력 (F_c)이 작용하고, 유체의 흐름을 벗어남에 따라 발생하는 유체와 입자의 속도 차이로 인해 반대 방향으로 항력 (F_D)이 작용하게 된다. 유체는 분급 베인의 외부에서 내부로 일정한 속도 V_r 로 유입되며, 이 반경 방향 속도는 반경에 반비례한다.

$$V_r = \frac{Q}{2\pi rh} \tag{3}$$

여기서 h 는 베인의 높이를 의미한다.

베인이 분당 회전수 N [rpm, revolutions per minutes]으로 회전하는 경우, 베인의 각속도 ω [rad/s]와 분급 베인의 분급 지점 r 에서 입자의 접선 방향 속도, 선속도 V_θ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\omega = 2\pi N/60 \tag{4}$$

$$V_\theta(r) = r\omega = \pi N r/30 \tag{5}$$

3. 2 원심력

분급 지점의 입자에 작용하는 원심력 F_c 는 다음과 같다.

$$F_c = m r \omega^2 \tag{6}$$

입자가 유체와 함께 회전 운동을 하는 경우, 입자 주변의 유체에도 원심력이 작용하여, 아르키메데스의 원리에 의한, 회전 반경 안쪽 방향으로 입자에 대한 부력이 작용한다. 부력은 유체 속에 있는 물체가 유체로부터 받는 외력과 반대 방향의 힘으로 크기는 유체 속에 있는 물체의 부피와 같은 부피의 유체가 받는 힘의 크기와 같다. 이 부력을 제외하고 구형 입자에 작용하는 원심력은 다음과 같다.

$$F_c = \frac{\pi d_p^3}{6} (\rho_p - \rho_a) \frac{V_\theta^2}{r} \tag{7}$$

여기서 d_p 는 입자의 직경 [m] 이고, ρ_p 는 입자의 밀도 [kg/m^3], ρ_a 는 공기의 밀도 [kg/m^3]이다.

3. 3 항력 (Drag force)과 Reynolds 수 Re_p

물체가 유체 내에서 운동할 때 받는 저항력과 두 물체가 접촉하면서 움직일 때 접촉면에 작용하는 힘을 유체 저항력이라고도 한다. 분급 베인의 분급 지점에서 원심력에 의해 반경 방향으로 가속되어 반경 방향으로 V_r 의 속도로 이동하면서 입자가 받는 항력 F_D 는 다음과 같다.

$$F_D = C_D \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{\rho_a V_r^2}{2} \tag{8}$$

여기서 C_D 는 항력 계수 (Drag coefficient)로서 레이놀즈 수 Re_p 의 함수로 표현되고, Re_p 의 범위에 따라 다음과 같이 주어진다 (그림 14).

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} & Re_p < 1 \\ \frac{24}{Re_p} \left(1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right) & 1 < Re_p < 1000 \\ 0.44 & Re_p > 1000 \end{cases} \tag{9}$$

여기서 Re_p 는 입자에 대한 Reynolds 수로 다음과 같이 표현한다.

$$Re_p = \frac{\rho_a V_r d_p}{\mu_a} \tag{10}$$

여기서 μ_a 는 공기의 점성 계수 [$\text{kg/m} \cdot \text{s}$]를 뜻한다.

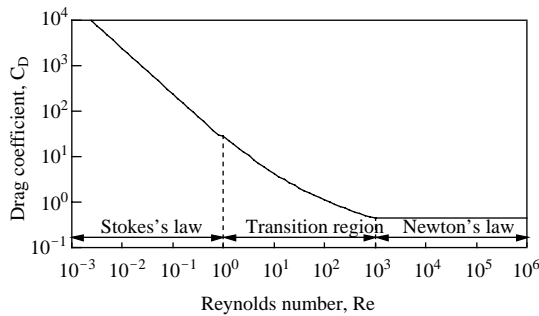


Figure 14. Drag coefficient C_D versus Reynolds number.

3. 4 분급 입경 (Cut size)

분급 베인의 분급 지점에서 분급의 기준이 되는 분체의 입경은 원심력과 항력이 평형을 이루는 입경이 되며, 이 기준 입경을 절단 입경 또는 분급 입경이라 지칭한다. 분급 입경보다 큰 입자들은 원심력이 항력보다 크게 작용하여 분급 베인의 분급 영역 외부로 밀려 조대 입자 영역(Coarse fraction)으로 분리되고, 분급 입경보다 작은 입자들은 주위 유동에 의한 항력이 우세하여 미세 영역(Fine fraction)으로 이동하는 유동을 따라 이동한다. 따라서, 이 분급 입경을 기준으로 분급 효율은 1/2의 값을 갖는다. 입자의 직경을 분급 입경 d_{pc} , 입자의 Reynolds 수 Re_p 는 1보다 작은 구형 입자로 가정할 때, 원심력과 항력이 평형을 이루면 $F_c = F_D$ 이므로, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{\pi d_{pc}^3}{6} (\rho_p - \rho_a) \frac{V_\theta^2}{r} = \left(\frac{24}{Re_p} \right) \frac{\pi d_{pc}^2}{4} \frac{\rho_a V_r^2}{2} = 3\pi \mu_a V_r d_{pc} \quad (11)$$

분급 입경 d_{pc} 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$d_{pc} = \frac{1}{V_\theta} \sqrt{\frac{18\mu_a r V_r}{\rho_p - \rho_a}} \quad (12)$$

공기 중의 입자를 분급하는 경우, 공기 밀도 ρ_a 는 입자 밀도 ρ_p 에 비하여 무시하여도 좋을 만큼 충분히 작기 때문에

$$d_{pc} = \frac{1}{V_\theta} \sqrt{\frac{18\mu_a r V_r}{\rho_p}} \quad (13)$$

로 사용하여도 무방하다.

여기서 식 (3)과 (5)를 식 (12)에 대입하면, 공급 유량 Q , 분급 베인의 높이 h 와 반경 r , 회전수 N 등의 회전체 분급기의 작동 변수와 분급 입경의 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$d_{pc} = \frac{30}{\pi N} \sqrt{\frac{Q}{2\pi r^2 h} \frac{18\mu_a}{(\rho_p - \rho_a)}} \quad (14)$$

반대로 원하는 분급 입경을 얻기 위한 분급 베인의 회전수는 다음 식 (15)와 같다.

$$N = \frac{30}{\pi d_{pc}} \sqrt{\frac{Q}{2\pi r^2 h} \frac{18\mu_a}{(\rho_p - \rho_a)}} \quad (15)$$

여기서 분급 베인의 회전수 N 와 분급 입경 d_{pc} 은 반비례 관계에 있으며, 공급 유량과 분급 베인의 크기를 변경함으로써 분급 입경을 조절할 수 있다. 공급 유량과 분급 베인의 회전수가 동일한 상황에서 분급 입경을 줄이기 위해서는 $r^2 h$ 값을 증가시켜야 하며, 설치 환경과 주변 상황에 적합한 형상 수치 결정이 필요하다.

3. 5 미세 입자 출구 (Fines outlet) 위치

회전체 분급기로부터 분급되는 분체의 분급 입경은 원심력과 항력의 균형에 의해 결정되고, 회전체 분급기의 기하학적 형상과 작동 변수에 의해 식 (13)과 같이 이론적으로 결정되며, 이는 회전하는 분급 베인의 외경 부근에서 결정되는 분급 입경이다. 분급 베인의 경계에서 분급된 미세 입자는 회전 로터 내부, 회전축에 위치한 출구로 이동해 분급된다. 회전 베인은 회전축까지 확장되어 있지 않기 때문에, 베인을 통과하는 과정에서는 강제 소용돌이(forced vortex)에 의해 분급 입경이 결정되지만, 베인 내부 영역에서는 자유 소용돌이(free vortex)에 영향을 받게 된다. 회전 로터를 갖는 회전체 분급기의 일반적인 형태는 그림 15와 같다.

식 (13)으로 표현되는 분급 입경은 분급기의 형상과 작동 변수에 의해 결정되며, 다음과 같이 간략화할 수 있다(Nied, 1996).

$$d_{pc} \propto \xi = \sqrt{\frac{V_r r}{V_\theta^2}} \quad (16)$$

즉, 분급 입경은 반경의 함수로 주어진다.

분급 베인 사이에서와 분급 베인 내부에서의 반경 방향 속도는 식 (3)과 같이 회전 중심으로부터의 거리의 함수로 동일하게 표현되지만, 접선 방향 속도는 분급 베인 사이에서와 분급 베인 내부에서의 표현이 다음과 같이 달라진다(Nied, 1996).

$$V_{\theta} \propto \begin{cases} r & r_i < r < r_a \\ 1/r & r_F < r < r_i \end{cases} \quad (17)$$

식 (3)과 식 (17)을 식 (16)에 대입하면, 반경 방향 위치에 따른 분급 입경에 대한 관계를 다음과 같이 얻을 수 있으며, 그림 15에 나타낸 바와 같다.

$$d_{pc} \propto \begin{cases} 1/r & r_i < r < r_a \\ r & r_F < r < r_i \end{cases} \quad (18)$$

그림 15에서 보는 바와 같이 분급 베인 외부에서 결정된 분급 입경은 미세 입자 출구로 이동하면서 증가하며, 베인 내부에서 베인 외부에서 결정된 분급 입경과 동일한 분급 입경이 결정되는 지점 r^* 이 존재한다. 미세 입자 배출구의 반경 r_F 가 r^* 보다 작은 경우, 분급기의 분급 입경은 분급 베인 외부에서 결정되는 분급 입경이 아닌 분급 베인 내부에서 결정되는 분급 입경으로 결정된다.

미세 입자의 배출구의 반경이 베인에 비해 작아, 분급 베인 내부에서 추가적인 분급이 발생하여, 분급 베인 외부 경계에서 결정된 분급 입경과 차이를 나타내는 문제를 해결하기 위해 그림 17과 같이 분급 베인의 길이를 증가시키고, 미세 입자 배출구의 직경도 확장하는 방안이 제안되었다(Nied, 2004).

3. 6 베인 사이 반경 방향 속도 분포

분급 베인 사이에서 반경 방향 속도는 식(3)과 같이 동일한 반경 위치에서 동일하지 않다. 상사성 원리를 적용해 Hydrocyclone에서 측정된 결과에서, 그림 16과 같이 동일한 반경 위치에서도 반경에 따라 균일도에 큰 차이를 보인다(Legenhausen, 1991).

분급 입경의 크기가 베인을 통과하여 출구에 이르는 동안 증가하다가 감소하면서 유체의 난류 유동에 의해 유입되는 조대 입자의 미세 영역으로의 이동 가능성이 증가하는 문제를 해결하기 위하여, 분급 베인 내부의 높이를 반경 방향 속도가 일정하게 유지 되도록 점차 증가시키는 형태를 제안했다(그림 18).

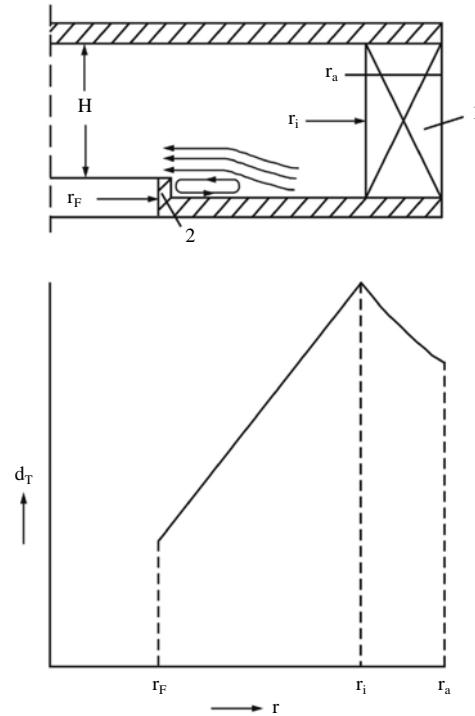


Figure 15. Cut point d_r in a vaned rotor as a function of the radius; (1) vanes, (2) co-rotating immersion tube (Nied, 2004).

3. 7 Fish-hook effect

분체를 미세 입자 영역과 조대 입자 영역으로 분급하는 분급 능력을 나타내는 분급 곡선의 실험 결과들을 살펴보면, 입자의 크기가 점차 미세한 크기로 줄어들면서 분급 곡선이 증가하는 결과를 보이며, 이를 소위 “Fish-hook effect”라 지칭한다(그림 10). 이는 초미세 입자들이 조대 영역에 포함되는 정도가 증가하는 것으로, 낚시 바늘 효과가 증가하면 전체적인 분급 성능의 정밀도가 저하될 수 있다.

이는 초미세 입자(Ultra-fine particle)에 작용하는 Van der Waals 힘에 의한 입자간의 인력이 입자의 응집을 가속화하여 발생하는 것으로 추측된다. 미세한 크기의 입자에 작용하는 Van der Waals 힘은 입자 크기와 반비례 관계에 있으며, $1 \mu\text{m}$ 크기 입자에 비해 $0.01 \mu\text{m}$ 크기의 입자에 작용하는 힘의 크기는 100배로 증가한다. 또한 입자 크기가 감소함에 따라 중력 효과에 대한 Van der Waals 힘의 영향도 크게 증가하여, 초미세 입자 영역에서 입자 응집에 기여하

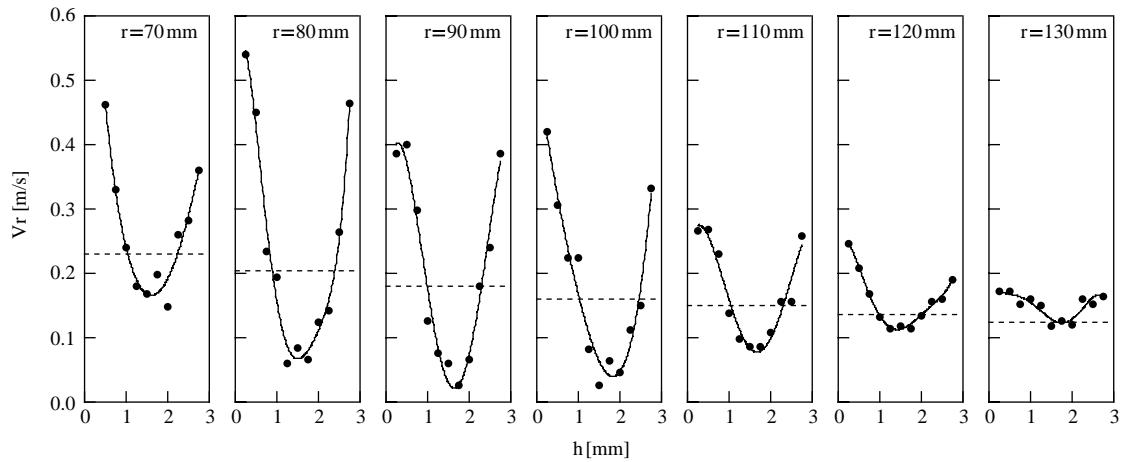


Figure 16. Radial velocity profiles in the vane-free internal area of a cylindrical rotor; h represents the vane height.

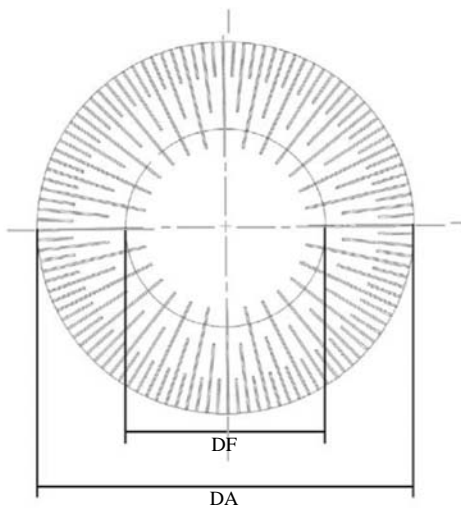


Figure 17. Classifier-wheel for classification at the outer edge of the vanes (Nied, 2004).

는 것으로 생각되며, 입자 크기 감소에 따라 응집 확률이 크게 증가하는 것도 주요 요인 중 하나로 생각된다. 초미세 입자들이 보다 큰 입자에 응집되어 조대 입자 영역으로 분리되면, 미세 입자 영역으로의 회수율이 감소하여 분급 곡선에서의 증가를 보인다.

Wang *et al.* (1999)은 입경 변화에 따라 입자에 작용하는 중력과 Van der Waals 힘의 크기를 비교하여 평형을 이루는 입경을 '임계 응집 입경' d_{ls} 으로 정의

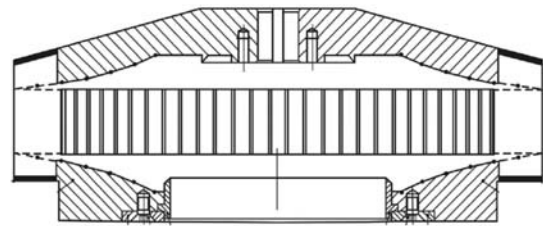


Figure 18. Convor classifier wheel for classification in the interior vane-free area (Nied, 2004).

하고, 중력에 의해 응집된 입자가 분리될 확률 $C(d_p)$ (separated probability of particles)과 응집 확률 $A(d_p)$ (agglomerated probability)을 임계 응집 입경으로 표현하였다.

$$A(d_p) = 1 - C(d_p) = \exp\left[-0.693\left(\frac{d_p}{d_{ls}}\right)^2\right] \quad (19)$$

입자 응집을 고려하지 않은 경우, 미세 입자 영역으로 분리되는 비율은 식 (2)에 표현된 Tromp 효율식을 이용하면 $1 - T(d_p)$ 으로 표현된다. 여기에 입자 응집에 의해 성장되어 조대 입자 영역으로 분리되는 부분을 제외하면, 미세 입자 영역으로 분리되는 비율은 아래와 같다.

$$[1 - A(d_p)] \cdot [1 - T(d_p)] \quad (20)$$

식 (19)를 적용한 수정 효율 곡선 (revised Tromp

curve) $T'(d_p)$ 은 다음과 같다.

$$T'(d_p) = 1 - [1 - A(d_p)] \cdot [1 - T(d_p)]$$

$$= 1 - \left[1 - \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{d_p}{d_{50}} \right)^2 \right\} \right]$$

$$\times \exp \left\{ -0.693 \left(\frac{d_p}{d_{50}} \right)^m \right\} \quad (21)$$

입계 응집 입경 변화에 따른 수정 효율 곡선은 그림 19에서 보는 바와 같다 (Wang *et al.*, 1999).

4. 작동 변수에 따른 분급 성능

분급 성능에 영향을 주는 인자로는 분급기의 기하학적 형태, 투입 유량, 투입 분체량, 회전체의 회전 속도, 회전체의 베인 각도, 분체의 종류 등이 있다. 이중 분급기의 형상에 따른 요인과 분체의 종류에 의

한 영향은 응용 분야에 따라 결정되어 크게 변동이 없으며, 분급기 회전체 베인의 각도, 회전 속도, 유입 유량의 변화에 따른 분급 성능에 대한 연구가 주로 진행되었다.

4.1 분급기 베인 각도의 영향

Wang *et al.* (1999)은 블레이드 베인의 각도의 변화에 따른 분급 특성에 대해 살펴 보았다. 반경 반향을 기준으로 유체 흐름과 동일한 방향으로의 베인 각도 (그림 20)가 각각 -30° (Backward-curved blades), 0° (Radial blades), 30° (Forward-curved blades) 인 경우에 대해 분급 비율과 분급 정밀도 및 효율을 살펴 보았다. 베인 각도가 증가함에 따라 절단 입경과 분급 정밀도가 증가하는 결과를 얻었다(표 1). 분급기의 회전체 베인 각도의 변경을 통해 절단 입경의 미세화와 분급 정밀도 향상을 모두 이루기는 어려우며, 분급기 회전체의 반경 방향과 동일하게 정렬된 베인을 사용하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다.

4.2 회전속도의 영향

분급 베인의 회전수에 따른 분급 특성의 변화는 분급기 형태에 의존적이지만, 일반적으로 회전수 증가에 따라 분급 입경이 감소하는 경향을 보인다. Turbo Air Classifier를 이용하여 로터 블레이드의 회전수를 900 rpm에서 1,200 rpm으로 증가시킨 Feng *et al.* (2008)의 실험 결과(표 2)와, Dynamic Cyclone을 이용한 Jiao *et al.* (2006, 2008)의 결과(그림 21, 22)에서 볼 수 있듯이 회전수가 증가함에 따라 분급 입경이 감소하는 경향을 보였다. 그림 21의 Separation efficiency는 조대 입자 영역으로 분리된 입자의 총합을 의미하며, 조대 입자 영역으로 분류되는 양이 증가하면 분급 입경은 감소한다.

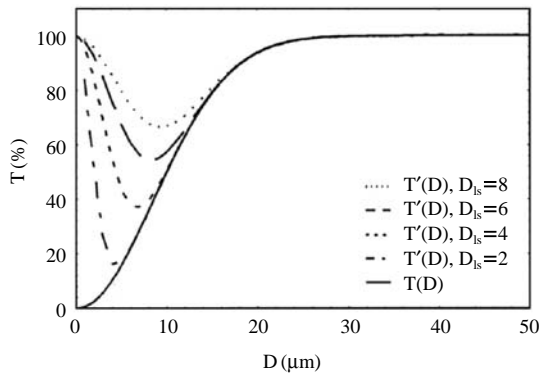


Figure 19. Revised Tromp curves ($m=2$, $d_{50}=10 \mu\text{m}$).

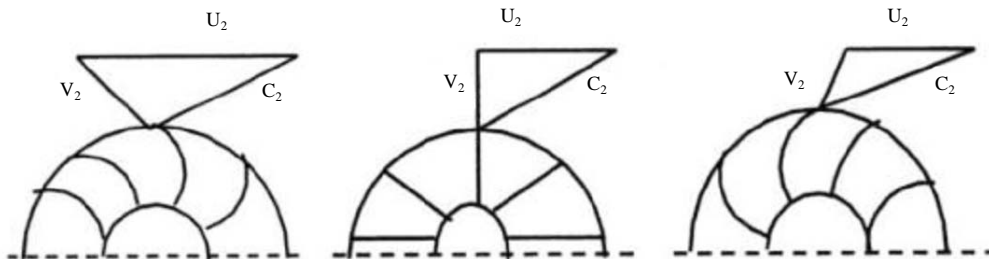


Figure 20. Shapes of centrifugal impeller blades: (a) backward-curved blades, (b) radial blades, and (c) forward-curved blades.

Table 1. Classification experiment results, classification precision and efficiency (Wang *et al.*, 1999).

Inclining angle of turbine blades	+30°	0°	-30°
Coarse powder (g)	115	135	142
Fine powder (g)	135	119	108
Raw material (g)	250	250	250
d_{50}	9.4	8.2	7.2
E_T †	1.45	2.05	2.98
η ††	1.34	1.79	2.70

† $E_T = (d_{75} - d_{25}) / 2$, †† $\eta = d_{75} / d_{25} = 1 / \kappa_{25/75}$

Table 2. Experimental results of classification from Feng *et al.* (2008).

Inlet air velocity (m/s)	Rotation speed (r/min)			
	1200		900	
Classification sharpness index	Classification particle cut size (μm)	Classification sharpness index	Classification particle cut size (μm)	
26	0.61	65.51	0.65	91.24
20	0.64	58.85	0.63	75.38
14	0.64	43.94	0.69	55.65
8	0.51	25.7	0.55	37.47

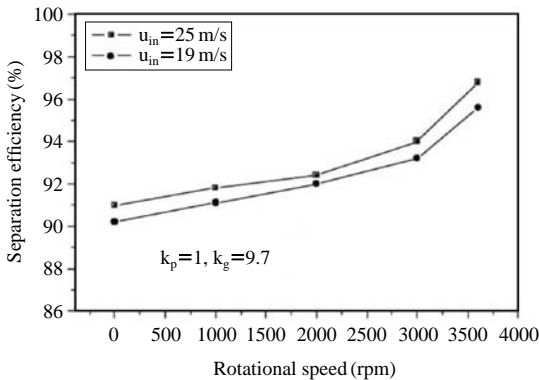


Figure 21. Effect of rotational speeds on separation efficiency (Jiao *et al.*, 2006).

4. 3 유입 공기 유량의 영향

회전체 분급기의 외벽에서 접선 방향으로 유입되는 공기의 속도 증가는 분급기 내부의 선회류 형성에 도움을 주며, 분급 입경의 감소를 도출할 수 있다. Dynamic Cyclone을 이용한 실험 결과(그림 21-23)에서 보는 바와 같이, 접선 방향으로의 입구 유속이

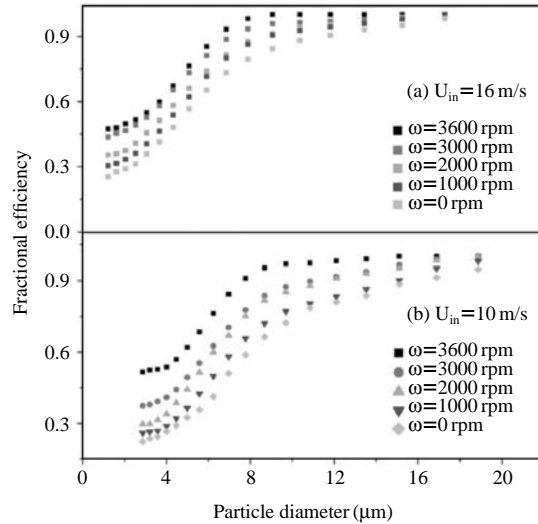


Figure 22. Effect of different rotational speeds on fractional efficiencies (Jiao *et al.*, 2008).

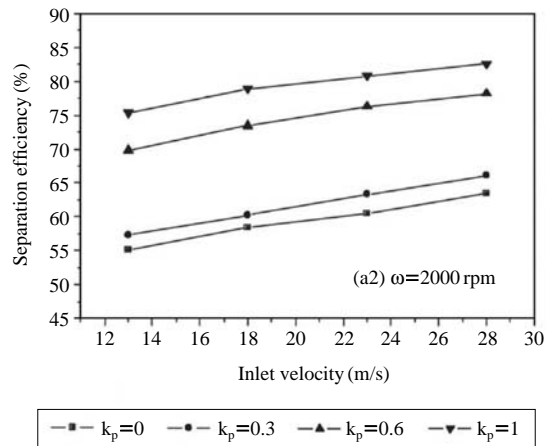


Figure 23. Effect of inlet velocities on separation efficiency (Jiao *et al.*, 2006).

증가함에 따라 분급 입경이 감소하는 결과를 얻었다. 반면, Turbo Air Classifier를 이용한 실험에서는 입구 유속의 증가로 인해 분급 입경이 증가하는 상반된 결과를 보였다(표 2; Feng *et al.*, 2008).

5. 전 망

분급 장치 가운데 가장 일반적으로 사용되는, 원심

력을 이용하는 원심 분급 장치를 회전체 분급기를 중심으로 살펴보았다. 제어 대상 입경의 미세화에 따라 회전 임펠러의 형상과 유로 등에 대한 개조 변형 설계 기술이 요구되지만, 국내에서는 이에 대한 기술이 거의 전무하여 외국 제품의 전량 수입에 의존하고 있는 실정으로, 국내 독자적인 설계 및 제작 기술의 확보가 매우 시급한 상황이다. 향후, 분립체 및 에어로졸의 이용 기술과 미세화 분급 기술은 제약, 촉매, 첨단 전자 재료, 도료, 안료 등의 산업 발달에 따라 그 수요가 지속적으로 증가할 것으로 전망되며, 특히 미세 입자의 제조 및 정밀 분리 기술은 관련 산업의 근간이 되는 핵심 기술로 전망된다. 즉, 21세기 정보 산업과 생명 공학의 발달로 신물질 및 신약 제조 산업, 전자 재료 산업 등에서 기능성 복합 에어로졸 분립체의 응용 분야는 급속도로 확대될 것으로 예상되며, 이에 따른 미세 입자 분급 장치의 수요도 크게 증가할 것으로 전망된다. 따라서, 다양한 분립체에 대하여, 미세 입자에 대한 정밀하고 효율 높은 분급 장치의 개발은 첨단 분립체 장치와 함께 적용 분야가 지속적으로 확대되는 유망 산업으로 평가된다.

참 고 문 헌

- Austin, L.G., and Klimpel, R.R. (1981). An improved method for analyzing classifier data, *Powder Technology*, 29(3), 277-281.
- Chmielniak, T., and Bryczkowski, A. (2000). Method of calculation of new cyclone-type separator with swirling baffle and bottom take off of clean gas-part I: theoretical approach, *Chemical Engineering and Processing*, 39(5), 441-448.
- Chmielniak, T., and Bryczkowski, A. (2001). Method of calculation of new cyclone-type separator with swirling baffle and bottom take off of clean gas-part II: experimental verification, *Chemical Engineering and Processing*, 40(3), 245-254.
- Feng, Y., Liu, J., and Liu, S. (2008). Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier, *Minerals Engineering*, 21, 598-604.
- Galk, J., Peukert, W., and Krahen, J. (1999). Industrial classification in a new impeller wheel classifier, *Powder Technology*, 105, 186-189.
- Jiao, J., Zheng, Y., Sun, G., and Wang, J. (2006). Study of the separation efficiency and the flow field of a dynamic cyclone, *Separation and Purification Technology*, 49, 157-166.
- Jiao, J., Zheng, Y., Wang, J., and Sun, G. (2008). Experimental and numerical investigations of a dynamic cyclone with a rotary impeller, *Chemical Engineering and Processing*, 47, 1861-1866.
- Legenhausen, K. (1991). Untersuchung der Strömungsverhältnisse in einem Abweiseradsichter. Dissertation TU Clausthal.
- Leschonski, K., and Rumpf, H. (1968, 1969). Principle and Construction of Two New Air Classifiers for Particle Size Analysis, *Powder Technology*, 2, 175-185.
- Nied, R. (1996). CFS-HD: A new classifier for fine classification with high efficiency, *International Journal of Mineral Processing*, 44-45, 723-731.
- Nied, R. (2004). Fine classification with vaned rotors: at the outer edge of the vanes or in the interior vane area? *International Journal of Mineral Processing*, 74S, S137-S145.
- Ray, M.B., Luning, P.E., and Hoffman, A.C. (1997). Post cyclone (PoC): An innovative way to reduce the emission of fines from industrial cyclones, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 36(7), 2766-2774.
- Rumpf, H., and Kaiser, F. (1952). Weiterentwicklung des Spiralwindsichters, *Chem.-Ing.-Technik*, 24, 129-135.
- Shapiro, M., and Galperin, V. (2005). Air classification of solid particles: a review, *Chemical Engineering and Processing*, 44, 279-285.
- Shi, M., Sun, G., Wang, Y., and Wu, X. (1993). Proceedings of the Sixth World Filtration Congress, Nagoya, Japan.
- Stairmand, C.J. (1951). The design and performance of cyclone separators, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 29, 356-383.
- Wang, X., Ge, X., Zhao, X., and Wang, Z. (1999). Study on horizontal turbine classification, *Powder Technology*, 102, 166-170.