

분리장치의 형상에 따른 미립자 유동특성

Flow Characteristics of Fine Particles for Separated Device Shapes

황선경¹, 이성수^{2,✉}, 정효상³

Seon Kyeong Hwang¹, Seoung Soo Lee^{2,✉}, and Hyo Sang Jung³

¹ 건국대학교기계설계과 (Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk Univ.)

² 건국대학교기계설계과 (Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Konkuk Univ.)

³ 경기과학기술대학교기계설계과 (Dept. of Mechanical Design, Gyeonggi College of Science and Technology.)

✉ Corresponding author: sslee@konkuk.ac.kr, Tel: +82-2-450-3480

Manuscript received: 2012.11.2 / Accepted: 2013.2.26

Recently high speed mixer, which is mixing, grinding, dispersion for liquid-liquid material, has been widely used several industries such as food, cosmetics, pharmaceuticals, fine chemicals, electronic material. This high speed mixer has a core element part called particle separation device. Particle separation device, which makes mixed liquid and liquid material using shear forces from a rotor and a stator, is a decisive factor in the distributed parts. In this study, we examined the velocity distribution of the two models of particle separation device using computation fluid dynamics, so that we were able to see the difference of the velocity distribution according to the shape. Also, by experiment, we observed that the use of rotor-screen type is deemed more suitable in case of accurately considering the effect of improving of the dispersibility through the circulation of the future.

Key Words: Rotor-Stator (로터-스테이터), Rotor-Screen (로터-스크린), High Speed Mixer (고속믹서), CFD (전산유체역학), Flow Pattern (유동패턴), Separated Device (분리장치), Fine Particle (미립자)

기호설명

k = turbulent kinetic energy

ε = dissipationrate of the turbulent energy

V = tip speed of rotor(m/s)

g = gap distance(m)

1. 서론

최근 식품, 화장품, 제약, 정밀화학, 신소재, 전자재료, 잉크, 나노 산업에 이르기까지 다양한 화학 산업에서 광범위하게 활용되고 있는 고속믹서는 액상(液狀)의 두 물질을 혼합, 분쇄 또는 분산하는 장치이다.¹ 이러한 고속믹서를 구성하는 부품

중에서도 가장 핵심부품이라 할 수 있는 미립자 분리장치는 회전자(rotor)와 고정자(stator or screen)를 이용하여 액체상태로 혼합되어있는 미립자를 분쇄 또는 분산 시키는 작용을 하는 것이다. 이때 회전자와 고정자에 의하여 발생하는 전단 효과를 이용하게 된다. 따라서, 미립자를 효율적으로 분리할 수 있는 고속믹서를 제작하기 위해서는 미립자 분리장치의 설계가 매우 중요하다.² 그러므로 미립자 분리장치의 형상이나 회전속도의 변화에 따른 유동현상에 대한 규명이 절실하지만 내부의 유동특성이 복잡하여 정량적인 실험데이터의 확보가 곤란한 현실이다.

지금까지 이와 관련한 유사 연구³⁻⁸는 보고되어 있으나, 산업현장에서 직접적으로 필요한 분산

효율과 분산 안정성에 대한 연구는 이루어 지지 않고 있다.

본 연구는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 기법을 적용하여, 고속믹서에서 미립자 분리 장치에 의한 액체 상태인 물질의 내부 유동 특성을 파악하기 위함이고, 이를 구현하기 위하여 미립자 분리장치에 대한 축 방향의 속도분포 고찰을 통하여, 미립자 분리 장치의 축 방향 속도 분포에 따른 유동 패턴에 대하여 규명 한다. 구체적으로는 산업현장에서 많이 사용 하고 있는 고속믹서용 미립자 분리장치 모델을 참고하여 3D CAD설계 프로그램인 Solidworks 2010과 CFD 소프트웨어인 FloLab 을 이용하여 서로 다른 두 가지 형태의 미립자 분리장치에 대한 분산 성능을 예측하고, 실제로 입자를 분산하는 경우에는 최적의 미립화를 기대 할 수 있는 미립자 분리장치 선정을 목적으로 하였다. 더불어 인쇄잉크로 이용되는 유기안료인 PR-117 (graphthol yellow RL)을 이용하여 분산실험을 하고, 그 결과에 대하여 고찰하였다.

2. 분산 성능

2.1 무차원 성능계수

분산을 이용한 유체 혼합에서 가장 중요한 요소는 분산에 걸리는 시간과 이 때에 소모되는 동력을 들 수 있다.

$$\begin{aligned}
 N_{R_s} &= \frac{F_i}{F_v} = \frac{Nd^2\rho}{\mu} \\
 N_{Fr} &= \frac{F_i}{F_g} = \frac{N^2d}{g} \\
 N_{W_s} &= \frac{F_i}{F_\sigma} = \frac{Nd^3\rho}{\sigma} \\
 N_p &= \frac{Pg}{N^3d^5\rho} \\
 N_Q &= \frac{Q}{Nd^3}
 \end{aligned} \tag{1}$$

이러한 분산 시간과 동력 소모량과 같은 것을 일반적으로 분산 성능이라고 하며, 분산 성능은 회전자의 형상 및 직경, 탱크 내의 위치, 혼합 유체의 밀도 등, 여러가지 변수를 이용하여 나타낼 수 있다. 분산 성능을 나타내기 위해서 가장 많이 사용하는 것이 변수의 조합에 의한 무차원 계수이며, 이러한 무차원 계수에는 N_{R_s} , N_{Fr} , N_{W_s} , N_p , N_Q

등이 있다.

식 중에서 N 은 회전수(rpm), d 는 회전자의 직경(mm), ρ 는 유체의 밀도(kg/m^3), μ 는 유체의 점도계수이다. N_{R_s} 는 회전자의 속도에 의한 유체의 관성력과 점성력의 비율이며, N_{Fr} 은 유체의 관성력과 중력간의 비율이며, N_{W_s} 은 관성력과 표면장력의 비율이다. N_p 는 공급된 힘과 질량과 가속도의 곱과의 비율이며, N_Q 는 회전자의 특성에 따른 토출 능력을 나타낸다.

2.2 동력계산식과의 관계

고속믹서에 소요되는 동력은 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$P(kW) = \frac{N_p \times \rho \times (N/60)^2 \times d^5 \times \mu \times f}{102 \times g \times \eta} \tag{2}$$

여기에서 N_p 는 회전자의 파워넘버[-], ρ 는 유체의 밀도[kg/m^3], N 은 회전수[rpm], d 는 회전자의 직경[mm], μ 는 점도계수[-], f 는 회전자 단수 계수[-], g 는 중력 가속도[m/s^2], η 은 기계효율[-]이다.

N_p 값은 회전자의 형태에 따라 실험값에 의해 정해져 있으며, μ 는 유체의 점도에 따라 분산 동력 계산 시 보정하여 주는 점도 계수이며, f 는 회전자가 다단일 경우 적용하는 값으로 업체에 의하여 규정되어 있다. 따라서 식을 검토하면, 회전자의 특성에 따라서 성능이 달라지는 것을 알 수 있다.⁹

3. 유동해석

3.1 지배방정식

CFD 기법은 일련의 방정식들을 수치해석적으로 풀어줌으로써, 유동의 평균 속도 및 벡터장의 계산을 가능하게 한다. 정상상태의 비압축성 3차원 난류유동에 대한 지배방정식¹⁰은 연속 방정식과 운동량 보존 법칙을 사용한다.

$$\nabla \cdot (\alpha_i \cdot \rho_i \cdot U_i) = 0 \tag{3}$$

식 중의 α_i , ρ_i , U_i 는 i 상(액체 또는 기체)의 부피분율, 밀도, 속도 벡터를 각각 나타낸다. 아울러, 교반탱크 내 액체 표면이 공기와 접해 있으므로 액체와 기체의 두 가지 상태를 고려 한다.¹¹

$$\alpha_L + \alpha_G = 1 \tag{4}$$

식 중의 α_L , α_G 는 각각 액체와 기체의 부피 분율을 나타낸다.

$$\nabla \cdot (\alpha_i \cdot \rho_i \cdot U_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \cdot \tau + R_i + F_i + \alpha_i \rho_i g \quad (5)$$

위 식은 운동량 보존 법칙으로 p 는 압력, τ 는 응력텐서(stress tensor), R_i 는 두 상간의 운동량 교환 항, F_i 는 회전에 따라 발생하는 원심력, g 는 중력 가속도를 나타낸다.

$$\tau = \mu_{eff} (\nabla U_i + (\nabla U_i)^T) \quad (6)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T \quad (7)$$

식 중의 μ_{eff} 는 유효점도, μ_T 는 난류점도를 나타낸다.

$$F_i = -2\alpha_i \rho_i \omega \times U_i - \alpha_i \omega \times \omega \times r \quad (8)$$

식 중의 ω 는 각속도를, r 은 회전축으로 부터의 위치를 나타낸다.¹⁰

3.2 형상특징

Fig. 1은 일반적으로 많이 사용되고 있는 산업용 미립자 분리장치와 교반탱크 모델을 나타내고 있다. 탱크는 지름이 140mm인 원통 형상이며, 미립자 분리장치는 교반탱크 중심 바닥으로부터 각각 70mm의 높이에 위치하고 있다.

Fig. 2와 Fig. 3은 해석에 사용된 두 가지 형태의 미립자 분리장치의 형상을 보여주고 있다. 두 가지 형상 모두 회전자의 직경(D)은 30mm이다. 로터-스테이터(rotor-stator)는 적어도 하나의 공동부를 구비한 하우징(housing)과 복수개의 원형 구멍과 내벽부와 외벽부로 구성되어 있는 고정자, 그리고 회전이 가능하도록 장착된 구동축으로 부터 반경 방향으로 뺏어나와 내벽부로부터 미세한 간격을

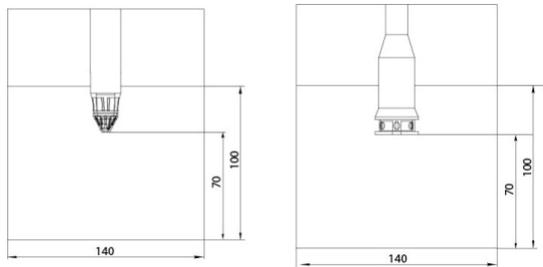


Fig. 1 Dimensions of experimental equipment

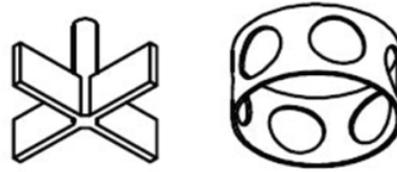


Fig. 2 Rotor-stator type

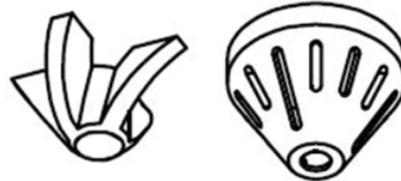


Fig. 3 Rotor-screen type

유지하고 있는 회전자로 이루어져 있다. 로터-스크린(rotor-screen)은 고속믹서의 회전자만 회전하는 기존의 방식이 아니고, 회전자와 고정자가 함께 움직이며, 회전자의 회전 날개부는 리드각을 포함한 특수 형상으로 이루어져 미립자 분리 장치가 서로 역회전하면서, 회전자로부터 흡인된 운동에너지를 받은 미립자가 좁은 슬릿(slit)부를 통과하는 구조로 이루어져 있다.

3.3 모델링 및 해석

모델링에는 일반적으로 많이 사용되고 있는 3D CAD 프로그램인 Solidworks2010을 이용하였으며, CFD 소프트웨어 또한 기존의 연구자용으로 개발된 소프트웨어가 아닌 실제 설계를 담당하고 있는 엔지니어를 위하여 CAD 프로그램과 통합된 환경을 제공하는 FloLab을 사용하여 해석하였다.

격자 생성(mesh generation)은 유체와 구조물이 만나는 경계층에 대해서 부분 메쉬(partial mesh) 기법을 사용하여, 복잡한 모델도 되도록 형상을 그대로 유지하면서 해석을 진행하여, 격자생성에 소요되는 시간을 크게 단축하였다.

수렴기준은 모든 셀의 유체방정식 질량값(residual)의 합을 유체의 총질량으로 나눈 값으로 정의한다. 기존의 연구에서도 동일한 수렴판정 기준을 사용한 바 있으며,³ 탱크의 벽과 바닥에서의 유체 속도는 0으로 가정하였고, 유체와 공기에 의해 형성되는 경계면은 자유표면으로 설정하였다.

또한 본 연구에서는 난류 유동의 해석을 위해 현재까지 가장 범용적으로 이용하고 있는 난류 모델인 Launder와 Spalding의 표준 k-ε 모델을 사용하

Table 1 A term of numerical analysis

Component	Conditions
Analysis type	Internal; Exclude cavities without flow conditions
Physical features	No physical features are selected
Wall conditions	Adiabatic wall, default smooth walls
Initial & ambient	Default conditions

여 구현하였다.¹² 표준 k-ε 모델은 레이놀즈 응력 성분들을 계산하기 위해 난류운동 에너지 (k)와 이 에너지 소멸률(ε)에 관한 두 개의 방정식을 부가적으로 계산하여, 난류점성을 표현하는 모델로서 회전 유동의 예측과 벽 근처의 저 레이놀즈 영역에서 다소 부정확한 것으로 알려져 있으나¹³ 복잡한 유동을 계산할 때 수렴성이 뛰어나고, 계산 시간을 단축하는 장점이 있어서 최근에 많이 이용하고 있다.¹⁰

모델링은 해석 영역별로 나누어 케이싱과 미립자 분리장치에 대하여 각각 하였으며, 이는 분리장치의 형상 및 회전속도만이 주요 변수로 작용할 경우에 적용할 수 있기 때문이다.

4. 해석결과

4.1 회전각도에 따른 유동

회전자의 회전에너지에 의해 생성되는 강한 전단력(shearing force)에 의해 분리장치 사이를 지나가는 분산 대상물들의 입자를 잘게 부수어지도록 하는 것이 분리장치의 원리이다. 이러한 전단력은 다음에 주어지는 식에 의해 결정되며, 식에서 팁속도(tip speed)는 회전자의 날개 또는 회전자의 순간속도를 의미하는데 같은 모터의 회전 속도라 해도 회전자의 날개와 회전자의 직경에 따라 팁속도가 달라지게 된다.¹⁴

아래 식에서 간격(clearance)은 고정자와 회전자 날개 사이의 간격(gap between rotor and stator), 또는 회전자와 탱크 벽 사이의 간격 (gap between rotor and tank wall)을 의미한다.

$$\text{Shearing force} = \frac{\text{tip speed}}{\text{clearance}} \quad (9)$$

회전자의 길이가 30mm, 회전속도는 20000rpm

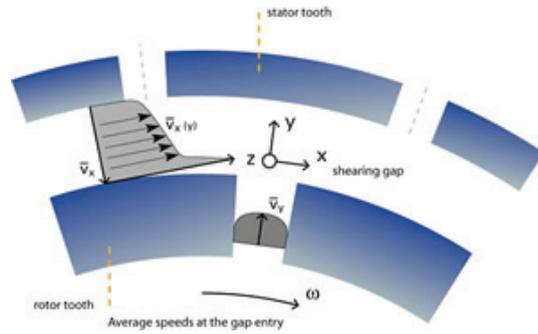


Fig. 4 Average speed at the gap entry

인 경우에 팁속도를 구하면 31.415 m/s 이고, 회전자와 고정자 사이의 간격을 0.2 mm로 하여 식(9)에 대입하여 값을 구하면 157.075이다.

이 전단력에 의해 분산대상물이 매우 빠른 속도로 분리장치 사이를 통과하게 된다. 이때 분리장치 사이의 간격은 0.1~0.2mm 정도로 매우 좁으며, 분산대상물이 강한 회전속도로 좁은 분리장치 사이를 통과할 때, 전단효과에 의하여 입자의 크기가 순간적으로 아주 잘게 잘라진다.

점성이 있는 물질의 경우, 교반 효율을 최대로 올리거나 팁속도를 증가시키기 위해서는 회전자의 회전속도를 증가시키고, 회전자 주위에 배플 플레이트(baffle plate)를 설치하여, 간격을 좁게 하여준다.¹⁵

Fig. 5에서부터 Fig. 7은 20000rpm의 회전속도를 기준으로 하여 미립자 분리장치에서 회전자의 회전날개 경사각을 -30°, 0°, 30°로 각각 변화 시켰을 경우의 유동특성을 나타내고 있다.

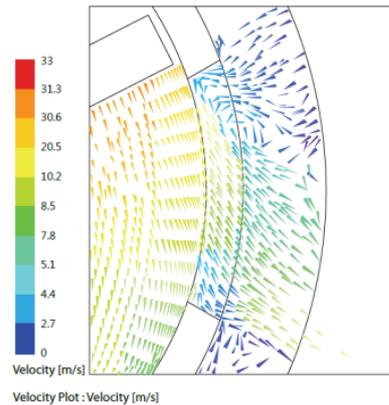


Fig. 5 Calculated velocity vectors around the screen hole on blade at θ = -30°

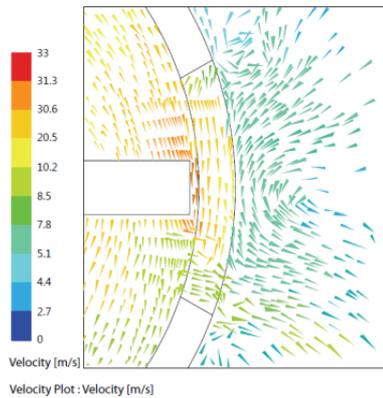


Fig. 6 Calculated velocity vectors around the screen hole on blade at $\theta=0^\circ$

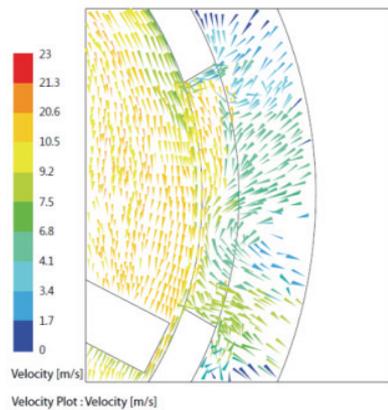


Fig. 7 Calculated velocity vectors around the screen hole on blade at $\theta=30^\circ$

회전하는 회전자의 속도에 의해 외부 분리 장치의 끝단부에 전단 혼합 유동영역이 발생하여 경사각에 따라 영역이 점차 확산되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 경사각이 작을 때는 많은 차이를 보이지 않지만 경사각이 커질수록 그 차이가 점진적으로 커지는 것을 알 수 있다.

4.2 형상에 따른 유동

Fig. 8과 Fig. 9는 미립자 분리장치의 형상에 따른 전체적인 속도분포를 나타내고 있다.

이 분포도는 전산해석으로 얻어진 분리장치 주위에서의 난류에 대한 강도분포를 나타내며, 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)가 8, 13, 23, 43m/s 단위 확인으로 나타났으며, 이러한 난류 운동 에너지를 주 유동 성분과 독립적인 섭동 성분의 크기

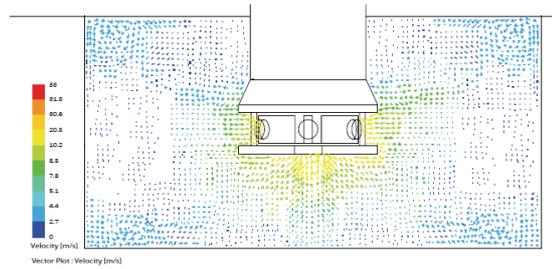


Fig. 8 Velocity vectors at 20000rpm by rotor-stator type

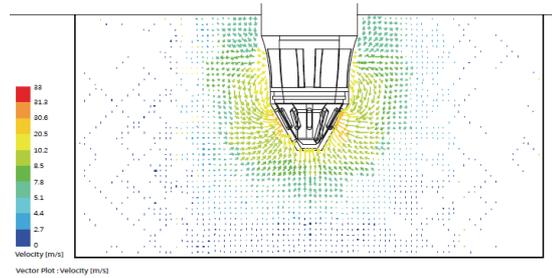


Fig. 9 Velocity vectors at 20000rpm by rotor-screen type

와 관련이 있다. 즉 유체의 혼합이 중요한 공정에서는 분리장치 부근과 같은 혼합이 활발한 영역의 격자를 조밀하게 할 필요가 있다.

로터-스테이터 회전자의 회전에 의해 교반탱크 내에서 상·하부 모두 반시계 방향으로 회전하는 유동이 확인되었으며 회전자와의 거리에 따라 속도는 점차 감소함을 알 수 있다. 로터-스크린의 해석 결과, 분리장치 끝단에서의 평균속도가 22.8m/s로 가장 크게 나타났으며, 전체적인 유동은 케이싱부에서 토출된 입자가 분리장치에 고속으로 유입되어 순환되는 결과를 보여주고 있다. 따라서 Fig. 9에서 나타내고 있는 것 처럼 속도가 큰 난류가 관찰되는 분리장치 부근에서 혼합이 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

5. 재료 실험

5.1 실험 조건 및 방법

두 가지 형태의 분리장치를 이용하여 증류수(A액)과 PR-177(B액)을 혼합하여 안료 미립자를 만들었다. 분석기기로는 입도분포 [UPA-UT151] / TEM [일본전자, JEM-2100F], UV [(株)津 제작소, UV-2450] / XRD [Panalytical, X'PertPRO MPD], IR [JASCO, FP-6500] / 컬피셔수분계 [교토전자공업, MKC-610] 를 사용하였다.

Run1은 로터-스테이터, Run2는 로터-스크린 타입을 이용하여 실험하였다. 속도 20000rpm, A액은 600mln, B액은 10ml, 온도는 5℃로 일정하게 하고, 운전 조건을 동일하게 하여 실험하였다.

실험 조건을 기준으로 하여 만들어진 입자에 대하여 토출액을 여과한 후에, 순수로 세정하고, 건조한 분체로써 회수하였다. 회수한 건조 분체 및 사용한 원료에 대해서 입도분포, TEM, UV, XRD, IR, 수분율의 측정을 한 후에 그 결과에 대하여 검토하였다.

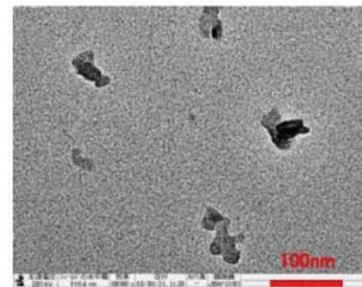
5.2 실험결과

입도 분포 측정결과 50ml의 샘플병에 분말 0.1g, 분산제 BYK-2000 (유효성분 40%) 0.25g, 용제 (PGMEA:PGME=4:1의 혼합용액) 9.65g을 더한 후에 120분 동안 분산처리를 실시하고, 입도분포를 측정하였다. Fig. 11에 Run1의 입도분포와 Run2 장치 제작 분말 분산액의 입도분포를 각각 나타내었다.

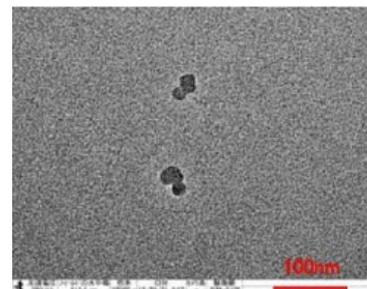
입도분포의 측정 결과, Run1의 분산액은 $D_{50} = 110.3\text{nm}$, $D_{90} = 295.2\text{nm}$ 으로 대략 큰 분포 밀도와 분산이 고르게 되지 않은 것을 확인할 수 있었다. Run2 분산액의 경우 $D_{50} = 30.9\text{nm}$, $D_{90} = 67.3\text{nm}$ 으로,

Run1에 비하여 분쇄가 잘게 되었고, 분산 상태도 고른 것으로 확인하였다.

이와 같이 입도분포 측정을 실시한 시료를 코로지온막 동메쉬막에 떨어뜨리고, 건조 후 TEM 관찰을 실시하였다. Run1의 TEM상을 Fig. 12에 각각 나타내었다. TEM관찰에 의하면 Run1의 미립자는 1차 입자지름이 30~70nm의 부정형 입자이며, Run2로 만들어진 미립자의 1차 입자지름은 10~20nm인 구형 입자이다. 결과적으로 입자 직경이 크게 차이는 없지만 Run2로 제작된 입자가 분쇄가 잘게 이루어진 것을 알 수 있다.



(a) Rotor-stator



(b) Rotor-screen

Fig. 11 TEM of the powder produced

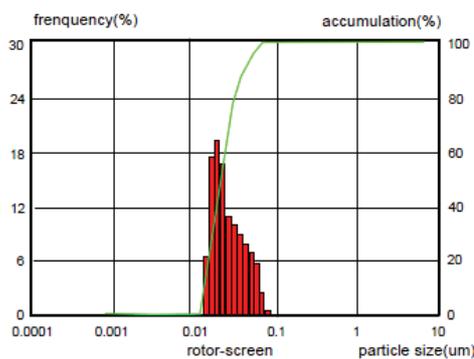
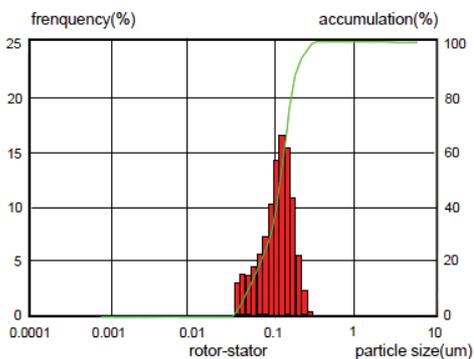


Fig. 10 Particle size distribution measurements

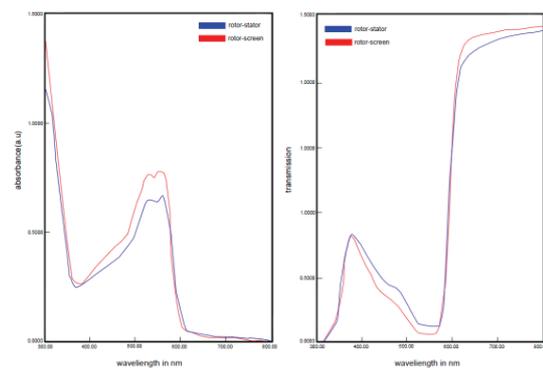


Fig. 12 UV spectrum measurements

분산액을 용제(PGMEA:PGME=4:1의 혼합 용액)에서 안료농도 0.002%(투과 스펙트럼 측정용)과 0.001%(흡수 스펙트럼 측정용)에 희석해 UV측정을 하였다. 그 결과를 Fig. 12에 나타내고 있다.

UV의 측정 결과, Run2로 제작한 분말분산액은 Run1보다 적색영역(600nm) 이상 투과스펙트럼이 35% 정도로 투과율이 높고, 흡수스펙트럼도 16% 정도로 높았다.

만들어진 분말의 XRD 측정 결과를 Fig. 13에, IR 측정 결과를 Fig. 14에 각각 나타내고 있다. Run2로 만들어진 분말의 XRD패턴은 Run1의 패턴과 일치했지만 완전한 구형 형태의 입자 모양이

아닌 브로드클로스(broadcloth)상태였다.

IR스펙트럼에서는 큰 차이가 없었다. 수분율을 측정한 결과, Run1에서 만들어진 분말의 수분 함유량은 552ppm, Run2에서 만들어진 분말의 수분 함유량은 295ppm이다. 따라서 수분율은 약 두 배 정도의 차이를 보였다.

6. 결론

유동해석 프로그램과 실제 고속믹서 장비를 이용하여 미립자 분리장치의 형태에 따른 교반탱크 내 유체 흐름 패턴과 입자에 미치는 분산성의 영향을 관찰, 분석하였다. 분리장치의 회전자를 수직으로 하는 것 보다 각도를 주어 사선으로 함으로써 부하를 적게 받도록 하고, 홀더장치를 이용하여 유체의 흐름이 순환류를 형성하도록 하였다. 또한 직접 시료를 이용하여 분쇄와 분산의 실험을 하고, 다양한 측정기를 이용하여 측정한 결과, 로터-스크린 형상을 이용할 경우, 분쇄뿐만 아니라 분산성이 안정화 되는 것을 확인하였다. 따라서 앞으로 순환류를 통한 분산성의 향상 효과를 정확하게 고려할 경우, 로터-스크린 기법을 사용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Kim, Y. J., "Nano Particles and It's Applications in Micromachining," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 30, No. 3, 2003.
2. Pacek, A., Baker, M., and Utomo, A. T., "Characterization of Flow Pattern in a Rotor Stator High Shear Mixer," Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6), Copenhagen, pp. 16-20, September 2007.
3. Shunsuke, H., Ryota, O., Makiko, K., and Yoshiro, I., "Enhancement Effects on Laminar Chaotic Mixing with Alternative Pitched Paddle Impeller in Stirred Tank," International Symposium on Mixing in Industrial Processes7, 2011.
4. Gustavo, A. and Padron, A., "Effect of Surfactants on Drop Size Distributions in a Batch Rotor-Stator Mixer," Chemical Engineering, Doctor of Philosophy, the Graduate School of the University of Maryland, 2005.
5. Verzicco, R., Fatica, M., Iaccarino, G., and Orlandi, P.,

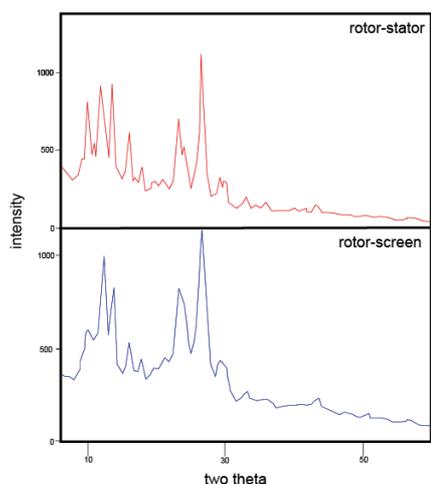


Fig. 13 XRD measurements

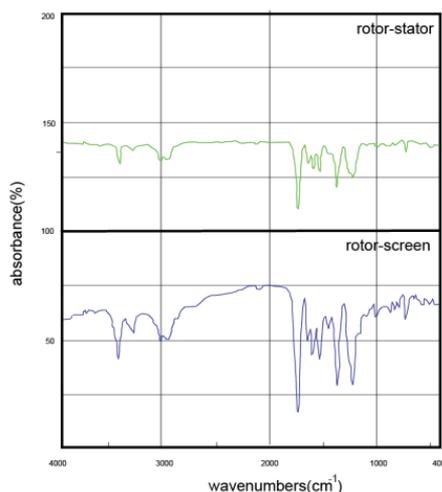


Fig. 14 IR measurements

- “Flow in an Impeller-Stirred Tank Using an Immersed-Boundary Method,” Fluid Mechanics and Transport Phenomena, 2004.
6. Niclasen, D. A., Rudman, M., Blackburn, H. M., and Wu, J., “Flow Simulation of a Mixing Vessel Incorporating Blade Element Theory,” Inter Conference on CFD in Mineral & Metal Processing and Power Generation, 1997.
 7. Kerdouss, F., Bannari, A., and Proulx, P., “CFD Modeling of Gas Dispersion and Bubble Size in a Double Turbine Stirred Tank,” Chemistry, Eng. SCI. Vol. 61, No. 10, pp. 3313-3322, 2006.
 8. Kim, M. J., Lee, K. M., and Park, K. Y., “Analysis of Fluid Flows in a Stirred Tank Using Computational Fluid Dynamics,” Korean Chem. Eng., Vol. 48, No. 3, pp. 337-341, June 2010.
 9. Park, Kyeong, Il., “Study on Floating Features of Agitator using Abnormal Condition and Suitability of Agitation Theory,” Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Yonsei University, 2001
 10. Solidworks, “Flow Simulation 2010 Technical Reference,” 2010.
 11. AEA Technology, “CFX4 Solver Manual,” 1997.
 12. Launder, B. E. and Spalding, D. B., “The Numerical Computation of Turbulent Flows,” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 3, pp. 269-289, 1972.
 13. Kim, K. Y., “Computational Study on the Swirling Turbulent Flow with Recirculation,” Ph. D, D Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1987.
 14. Young Jin Corporation., “An Understanding of Mixing Dispersing Homo-mixing,” 2008.
 15. Cho, C. Y., Shin, D. H., and Chung, T. Y., “A Study on CFD Simulation of Rotational Flow in Stirred Tanks,” The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, pp. 1406-1411, 2009.