

다구찌 기법과 다상유동해석을 이용한 분급기 운전조건 최적화진병주^a, 박민호^a, 윤태종^a, 김영주^b, 강봉용^c, 심지연^c, 김일수^{a*}**Optimization of Classifier Operation Conditions Using Taguchi Method and Multiphase Flow Analysis**Byeong-Ju Jin^a, Min-Ho Park^a, Tae-Jong Yoon^a, Young-Joo Kim^b,
Bong-Young Kang^c, Ji-Yeon Shim^c, Ill-Soo Kim^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University,
1666, Yeongsan-ro, Chonggye-myeon, Muan-gun, Jeonnam-do, 58579, Korea^b Convergence Agricultural Machinery R&D Group, KITECH,
119, Jipyeongseonsandan 3-gil, Baksan-myeon, Gimje, Jeonbuk-do, 54325, Korea^c Carbon&LightMaterials Application R&D Group, KITECH,
222, Palbok-ro, Deokjin-gu, Jeonju, Jeonbuk-do, 54853, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	21	February	2017
Revised	26	April	2017
Accepted	11	May	2017

*Keywords:*Multiphase analysis
Classifier
Taguchi method
CFD analysis**ABSTRACT**

Generally, classifiers have been used as machines to crush raw materials and classify suitable particle sizes in all industrial fields, such as food, chemical, and mineral. However, the technique for classifying micron-sized particles between 5 and 20 μm is inferior. In particular, numerous experiments and considerable experiences are required to predict the particle size, because the classifier particle size is determined according to the internal flow. However, it is quite difficult to set the driving conditions so that the desired particle size can be classified only by experience and experimentation. Therefore, this study proposes a method of predicting the average particle size by employing multiphase flow analysis and the Taguchi method; this method is subsequently verified.

1. 서론

분급(classification)기술은 식품과 의약품, 그리고 각종 화공약품과 광물질 등 산업 전 분야에 걸쳐서 분쇄된 원료를 사용처에 적합한 크기의 초미세분체를 분급하는데 사용되어지고 있는 핵심 요소이다. 기존의 중력식 분체 분급기는 석탄, 시멘트, 모래산업에 주로 사용되었으나, 최근 식품산업의 발전과 더불어 미세입자를 이용한 사용처가 증가되고 있는 실정이다. 특히, 5~20 μm 범위의 초미세 분체입자의 분급기술은 식품산업에서 생산되는 제품의 첨

가제로 사용되어 품질과 영양을 한 단계 상승시키는 역할을 한다¹⁾.

이러한 초미세 분체입자는 일반적인 분쇄시스템인 개회로 분쇄 시스템을 적용하게 되면 충분한 분쇄가 이루어지지 않으므로, 불충분하게 분쇄된 원료를 재 분쇄 할 수 있는 폐회로 시스템에 적합한 분급기가 요구된다. 식품산업과 제약 산업 등 원료의 오염이 생기지 않기 위해서는 오염과 변성을 최소화하는 분쇄방식인 건식분쇄 방식을 사용하여야 한다. 건식분쇄장치 중 초미세 분쇄가 가능한 대표적인 분쇄장치로는 제트밀, 드럼밀 등 유체에너지를 이용하여 분쇄기 내부에서 고속으로 선회하는 원료들의 충돌로 미분쇄하는

* Corresponding author. Tel.: +82-61-454-3455

Fax: +82-61-452-6376

E-mail address: ilsookim@mokpo.ac.kr (Ill-Soo Kim).

방식을 적용한다²⁾. 이러한 분쇄장치는 분쇄된 분말을 운송하기 위해 출구에서 토출압력이 발생되므로 분급기 내부에서 유체의 흐름을 발생시킨다. 결론적으로 초미세의 입자를 분급하는데 적합한 분급기 방식은 중력과 공기의 흐름을 이용한 분체분급기가 적합하다고 판단된다³⁻⁵⁾.

분급장치의 기본적인 원리는 챔버의 형태를 테이퍼형식으로 설계하여 벽면의 원심력이 약해지면 무거운 분체가 내려가는 방식인 원심 분급 장치를 기본구성으로 설계된다. 본 논문에서 연구하는 분급장치의 구성은 분쇄장치로부터 유입되는 토출압력을 분산시켜 사이클론 기류를 유도하는 다단 가이드 베인(guide vane), 분쇄기와 흡입구에서 발생하는 상승기류보다 무거운 쇄료를 재분쇄할 수 있도록 분쇄기로 유도하는 호퍼 및 챔버, 목표 입자 크기의 분리를 위한 로터(rotor)장치, 미분쇄된 분말의 운송을 위한 흡입장치로 구성되어 있다. 이러한 분급장치는 3개의 출·입구와 2개의 압력생성장치로 이루어져 있어, 특정 평균입도를 가진 운전조건을 구하기 위해서는 다구짜 실험계획법⁶⁾을 통해 전산유체해석(computational fluid analysis)계획을 수립하였다.

대상이 되는 초미크론 크기의 입자를 전산유체해석기법 중 고체상(solid phase)과 기체상(gas phase)을 연성 해석하는 다상유동해석기법을 통해 해석결과를 도출하고 다구짜 분석을 통해 확보한 최적운전조건을 실험을 통해 검증하여 평균입도 15 μm 분급성능을 가진 분급기의 최적운전조건을 연구하고자 한다.

2. 다구짜 실험계획법

2.1 인자 및 수준의 설정

원심 분급기에서 분급되어 집진되는 평균 입자의 크기는 다양한 인자들에 의해 결정된다. 이러한 인자들의 영향의 정도를 정량적으로 판단하기 위해 모든 인자들을 고려하여 해석과 실험을 수행하였을 경우 해석과 실험 횟수는 크게 늘어나게 된다. 그러므로 실험 횟수를 최소화하기 위해 다구짜 실험계획법을 통해 해석계획을 설계하고 해석에서 획득한 데이터를 분석하여 최적의 운전조건을 예측한다. 최종적으로 해석을 통해 예측된 최적의 운전조건에서 분급기 실험을 하여 예측한 평균입도와 비교한다.

다구짜 방법은 제어할 수 있는 인자들 중 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향을 최대로 하여 외부요인의 영향을 최소화 시키는 방법이다. 이러한 다구짜 방법에서는 SNR (signal to noise ratio)를 사용한다. SNR은 신호대 잡음의 비율을 뜻하며 제어인자의 힘과 외부요인이 주는 영향의 힘의 비율로서 나타낸다.

SNR은 특성치의 목표에 따라 정의가 상이하게 되는데 특정한 목표값이 있고 목표값보다 작거나 크면 만족하지 못할 경우 망목(normal is best)특성, 목표값이 작을수록 좋은 망소(lower is

Table 1 Taguchi experimental parameters

Control factor	Unit	Level		
		1	2	3
Discharge pressure (DP)	Pa	500	1,000	1,500
Suction pressure (SP)		900	1,800	2,700
RPM	rev/min	800	1,600	2,400

best)특성, 목표값이 클수록 좋은 망대(higher is best)특성으로 나누어진다.

본 연구에서는 다상유동해석상에서 특정크기의 입자를 유입하여 출구에서 토출되는 입자의 양이 많을수록 특정 평균입도를 만족하게 되므로 망대특성을 사용하여 해석결과를 분석하였다. 이러한 망대특성의 SNR은 다음과 같은 식으로 계산되고 식에서 n 은 실험 횟수, y_i 는 실험에서 얻어진 데이터, i 는 실험의 순서를 의미한다.

$$SNR = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

2.2 해석계획 설계

일반적으로 실험계획법에 사용되는 완전요인배치법을 사용하여 해석을 진행할 경우 시간의 소요가 급격히 증가되므로 다구짜 실험계획법을 통해 직교배열표⁷⁾ 형식의 실험계획을 설계하였다. 직교배열표는 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횟수씩 나타나도록 구성되어 있다. 즉, 적은 수의 실험으로도 많은 효과를 얻을 수 있다. 또한, 본 실험에서는 제어인자의 값의 영향이 큰 쪽이 좋은지 작은 쪽이 좋은지 판단하기 위해 3수준의 직교 배열표를 사용하여 실험계획을 작성하였다. 직교 배열표는 양식은 3인자 3수준 직교 배열표(L₉3³)를 이용하였고 3인자 3수준에 적합한 요소를 적용하여 총 9회 해석할 수 있도록 배치하였다.

Table 1은 다구짜 실험계획법을 통한 실험조건을 나타내며, 분급기 내부의 선회기류 생성에 영향이 크다고 판단되는 3개의 디자인 요소를 배치하였다. 1열에 흡입 압력, 2열에 토출 압력, 3열에 로터의 회전수를 할당하였다.

3. 다상유동해석

3.1 다상유동해석 이론

본 연구에서 다루는 분급기 내부의 선회기류를 통해 분체입자의 집진현상을 연구하기 위해 전산유체해석의 상용툴인 ANSYS사의 CFX 17.0을 사용하여 다상유동해석⁸⁾을 수행하였다.

분급기 내부의 분체의 거동과 출·입구에서 발생하는 기류의 해석을 위해 Eulerian-Eulerian Multiphase 모델을 사용하여 수행하

였다. FEM모델은 많은 수의 입자 추적이 용이하고 다양한 입자크기 해석이 가능하며, 각 상(phase) 마다 n 개의 운동량방정식과 연속방정식을 풀게 되어 입자들의 움직임을 예측할 수 있다.

Eulerian 모델의 다상유동해석의 연속방정식과 운동량방정식은 식 (2), (3)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(a_q \rho_q) + \frac{\partial}{\partial x_i}(a_q \rho_q v_{q,i}) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2)$$

여기서, a_q 는 부피율, ρ_q 는 밀도, v_q 는 상 q 의 속도를 나타낸다. 또한, i, j 는 3차원 공간좌표를 나타내는 첨자이다.

$$\begin{aligned} a_p \rho_q \frac{\partial v_{q,i}}{\partial t} + a_p \rho_q v_{q,j} \frac{\partial v_{q,i}}{\partial x_j} = & -a_q \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_q}{\partial x_i} \\ & + a_q \rho_q g_i + \sum_{p=1}^n (R_{pq,i} + \dot{m}_{pq} v_{pq,i} - \dot{m}_{qp} v_{qp,i}) \\ & + (F_{q,i} + F_{lift,q,i} + F_{vm,q,i}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, F_q 는 외부 체적 힘(external volume force), $F_{lift,q}$ 는 양력, $F_{vm,q}$ 는 가상 질량 힘(virtual mass force), R_{pq} 는 각 상 사이의 간섭력(interaction force), p 는 모든 상에서 공유하는 압력을 나타낸다. 또한, $\bar{\tau}_q$ 는 상 q 의 응력-변형률 텐서(stress-strain tensor)이며 다음과 같이 나타낸다.

$$\bar{\tau}_q = a_q \mu_q \left(\frac{\partial v_{q,u}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{q,i}}{\partial x_j} \right) + a_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \frac{\partial v_{q,i}}{\partial x_j} \bar{I} \quad (4)$$

여기서, \bar{I} 는 단위 텐서(unit tensor)이다.

다상유동해석에서 분체들의 상승에 필요한 항력의 계산은 고체 입자가 내부에서 차지하는 부피 분율이 작고 단일 구형의 입자의 계산에 사용되는 Schiller Naumann 모델을 사용하였으며 해석을 수행하게되면 관성영역에서 다음 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re}(1 + 0.15 Re^{0.687}), 0.44\right) \quad (5)$$

여기서, C_D 는 항력계수, Re 는 레이놀즈수를 나타낸다.

3.2 경계조건 설정 및 의존성 검토

다상유동 해석에 사용된 분급장치의 전체적인 형상, 입자의 생성과 움직임 및 경계조건은 Fig. 1에 나타낸바와 같이 분쇄된 분체들과 분쇄기의 토출 압력이 들어가는 air inlet (discharge pressure)과 분급된 분체들이 나가는 outlet (suction pressure), 낙하된 분체들이 재분쇄할 수 있도록 분쇄기에 투입할 수 있는 opening으로 구별하였다. 분급기의 주요제원인 입·출구의 직경과 재 분쇄 투입구, 분급팬의 직경과 날개수를 Table 2에 나타내었다. 분급장치 내부의 기체상과 고체상의 해석은 3차원 정상유동해석(steady-state analysis)을 수행하였으며, 입자의 관성을 고려하기 위하여 중력가

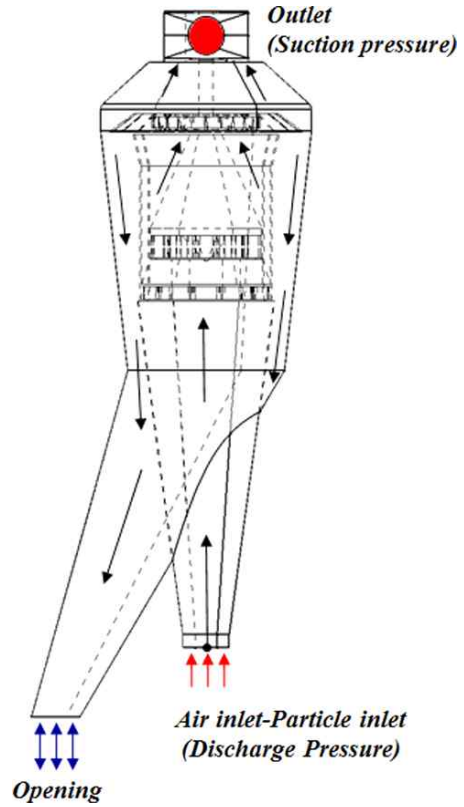


Fig. 1 A Schematic diagram for boundary conditions

Table 2 Main design parameters

Parameter	Value	Unit
Diameter of air inlet	77	mm
Diameter of opening	80	
Diameter of outlet	60	
Diameter of blade	320	
Number of blade	24	unit

속도를 적용하였다. 난류모델의 선정은 K- ϵ model, K- ω model, SST model 3개의 난류모델을 이용하여 동일한 운전조건에서 시뮬레이션 후 결과 값을 비교하였다. 결과 데이터가 큰 차이가 나타나지 않아 회전유체기계 해석에 비교적 정확한 해석결과를 도출하는 SST model을 선정하였고 정상상태 해석에서 주로 회전좌표계 중 단일회전 좌표계(single rotating frame)를 사용하여 등속 회전 운동에 대해 정상상태 해석을 수행하였다.

격자 의존성 검사를 수행하기 위해 격자의 크기를 5 mm, 10 mm, 15 mm로 설정하여 해석 후 특정 결과 값을 비교분석한 결과 큰 차이가 나타나지 않았으나 추후, 정밀한 후처리 과정을 진행하기 위해 5 mm 격자를 선정하였다. 격자의 구성은 분급기 내부의 격자는 tetrahedral 격자를 사용하였고 벽면과 가까운 격자는 inflation으로 설정하였으며 유동현상이 급격히 변하는 분급팬 주위의 격자는 조밀하게 구성하였다. 격자의 형상 및 분급기 3D모델

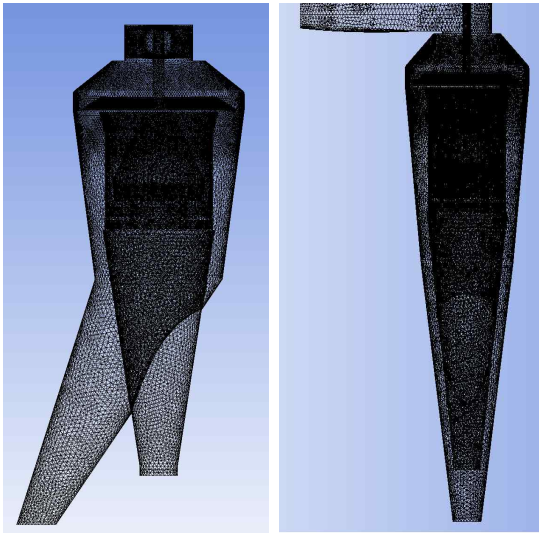


Fig. 2 The shape of the grid and classifier 3D model

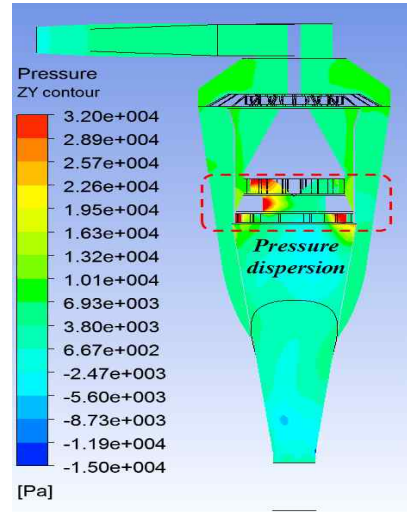


Fig. 3 Result of pressure distribution

Table 3 Numerical method and boundary conditions

		Analysis setting			
Numerical method	Analysis type	Steady state			
	Fluid type	Multiphase			
	Turbulence model	SST model			
	Particle shape	Sphere			
	Mass flow rate	kg/s	0.0139		
	Specified diameter	μm	15		
	Particle density	kg/m ³	1200		
	Mesh size	mm	5		
	Gravity	m/s ²	9.81		
Boundary condition	Air inlet (DP)	Pa	500	1,000	1,500
	Opening		0		
	Outlet (SP)	900	1,800	2,700	
	RPM	rev/min	800	1,600	2,400
	Wall	No-slip			

의 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

입·출구의 흡입 및 토출압력, 분급팬의 회전수의 요인배치는 다 구찌 실험계획법을 통해 설정하였고, 벽면은 No-slip 조건으로 적용하였으며, 입자의 유입은 목표하는 특정 크기의 입자를 질량유량이 50 kg/hr로 유입되도록 설정하였다. Table 3에 분급기 내부 다상유동해석에 사용된 경계조건 및 해석설정을 나타낸다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 다상유동해석 결과

분급기 내부에서 초미세의 입자를 포함하여 입·출구에서 압력

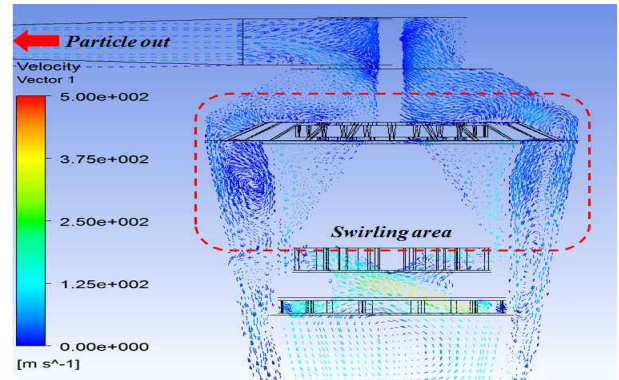


Fig. 4 Velocity distribution in the swirling area

이 발생하게 되면 Fig. 3의 압력분포도에 나타난 바와 같이 테이퍼 형식으로 이루어진 다단 가이드 베인에서 1차적으로 유입된 압력을 분산시켜 분급기 상부의 압력을 입자가 유입되는 입구영역보다 상승시킨다.

Fig. 4의 속도분포도를 확인하게 되면, 분급기 상부에서 선회하는 초미세의 입자는 분급팬의 회전 운동에 의해 분급팬 주위를 선회하게 되고, 선회하는 입자들이 분급팬 챔버 부근으로 이동되면 출구에서 흡입되는 압력에 의해 입자들이 집진기로 운송된다.

입자들의 이동경로 확인하기 위해 CFD-Post의 particle track을 사용하여 2만개의 입자 중 25개의 임의의 입자들의 이동경로를 확인하여 Fig. 5에 나타내었다. 입자들은 다단 가이드 베인에서 낙하되어 재 분쇄되는 경로로 이동하는 것을 확인하였다.

특정 입도에서 분급되는 분급기의 정량적인 데이터를 확인하기 위해 출구에서 초당 토출되는 입자량을 측정하여 Table 4에 나타내었다. 9가지 운전 조건에서 흡입압력 500 Pa, 토출압력 1,800 Pa, 분급팬의 회전수 800 RPM 조건으로 설정하였을 경우 가장 많은 입자들이 출구에서 측정되었음 확인하였다.

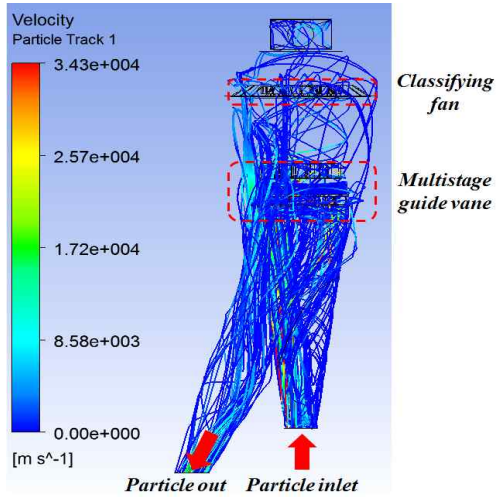


Fig. 5 Particle tracking and velocity distribution

Table 4 Results of particle number on outlet

Case No.	DP [Pa]	SP [Pa]	RPM [rev/min]	Averaged particle number rate
1	500	900	800	114,227
2	1,000	900	1,600	269,088
3	1,500	900	2,400	192,619
4	500	1,800	800	539,388
5	1,000	1,800	1,600	0
6	1,500	1,800	2,400	258,461
7	500	2,700	800	72,726
8	1,000	2,700	1,600	191,401
9	1,500	2,700	2,400	93,558

4.2 해석결과 데이터 SNR 분석

다구찌 실험계획법에서 설계한 제어조건들이 해석 결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특징치로 변환하여 산포를 작게 하는 조건들의 값을 찾아내므로 각 요소별 SNR을 계산하면 최적의 운전조건을 도출할 수 있다⁹⁻¹³. Table 5는 다상유동해석에서 해석 조건별로 산출된 출구에서 입자들의 평균 토출량을 SNR값으로 계산하여 나타낸 것이다.

Table 6는 SNR분석을 통해 다구찌 실험계획에서 수립한 수준간의 차이를 Delta값을 구하여 정의하였고, 각 요인 별로 15 μm의 입자의 분급 성능에 미치는 영향의 순위는 출구에서의 흡입압력, 분급팬 회전수, 분쇄기에서의 토출압력 순서로 계산되었다.

4.3 SNR분석을 통한 최적운전조건 예측

다상유동해석에서 획득한 대두분말과 동일한 밀도를 가진 15 μm 크기의 입자를 일정하게 유입하여 출구에 분급되는 입자의 양을 측정하여 각 운전조건별로 다구찌 기법을 통해 획득한 SNR 데이

Table 5 Results of SNR

Case No.	Averaged particle number rate	SNR [dB]
1	114,227	103.181
2	269,088	108.598
3	192,619	105.694
4	539,388	114.638
5	0	-
6	258,461	108.248
7	72,726	97.234
8	191,401	105.639
9	93,558	99.422

Table 6 Response results for SNR

Parameter factor	DP	SP	RPM	
SNR	1	104.3	105.8	105.7
	2	107.1	111.4	107.6
	3	104.5	100.8	101.5
Delta	2.8	10.7	6.1	
Rank	3	1	2	

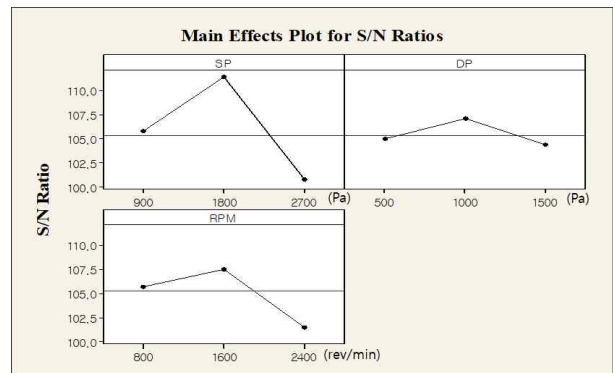


Fig. 6 SNR graphs with respect to each factor

터를 이용하여 그래프를 작성하면 Fig. 6과 같이 나타나게 된다.

망대특성으로 분석하면 SNR값이 가장 높은 값이 최적의 조건이 되므로 다구찌 기법을 통해 획득한 최적의 운전조건은 출구에서의 흡입압력이 1,800 Pa, 분쇄기에서의 토출압력이 1,000 Pa, 분급팬의 회전수가 1,600 RPM일 때, 15 μm 이하의 입자들이 분급되어 누적되면 예기치 못한 현상으로 목표입도 크기이상의 입자가 분급이 발생되더라도 최종적인 평균입도는 15 μm으로 산출될 것으로 예상된다.

4.4 평균입도 검증 실험

해석의 신뢰성을 확보하기 위해 다구찌 기법을 이용하여 얻은 조건을 적용하여 최적조건을 사용한 분급장치의 분급성능을 확인

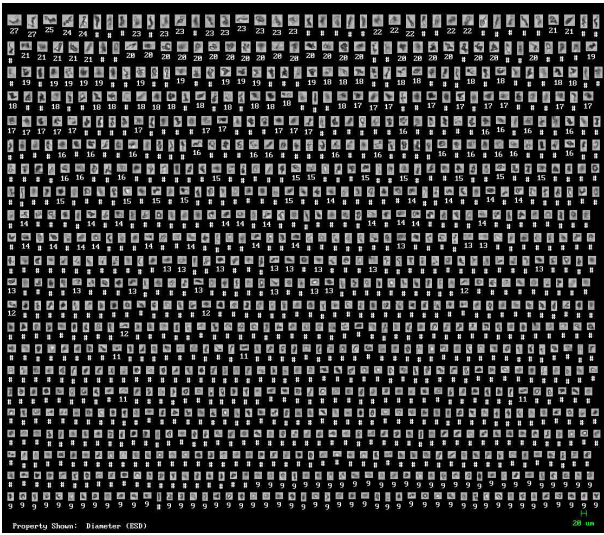


Fig. 7 Distribution of particle size



Fig. 8 Flow cam (PV-40)

하였다. 분급기의 성능 확인에 사용된 분체는 기류식 분쇄기에 의해 분쇄 되는 대두분말을 이용하여 분급성능 측정하였다. 평균입도 측정을 위해 분급기 출구에서 대두분말의 채집하여 입도분석을 수행하였으며 분석된 입도의 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

입도분석에 사용된 분석 장비는 Fig. 8에 나타난 5~300 μm 범위의 입도 분석이 가능한 Fluid Imaging Technologies, Inc의 입도분석시스템인 FlowCAM (PV-40)을 이용하여 측정하였다.

분석방법은 4,063개의 입자들을 2분 26초 동안 측정되는 입자들을 계산하였다. 분체들의 입자직경의 측정 방법은 입자를 5도 간격으로 회전하면서 36회 측정하여 직경의 평균값을 내는 equivalent spherical diameter (ESD)방법을 사용하였으며, 전체 입자들의 평균 입도값의 산출은 ESD방법에 입자들의 체적을 가중치로 계산하여 평균 직경을 구하였다.

입도분석시스템을 통하여 분급된 입자들을 측정된 결과, 30 μm 이하의 입도들만 검출되었으며 평균 입도값은 14.27 μm 로 검출되었다. 입도분석을 통해 검출된 입자들의 빈도수를 직경에 따라 확인 한 결과를 Fig. 9에 그래프로 나타낸 바와 같이 15 μm 이하의 입자크기에서 대부분의 입자들이 검출되었으며, 15 μm 이하의 체적비율이 15 μm 이상의 체적비율에 비해 높은 것을 확인 할 수

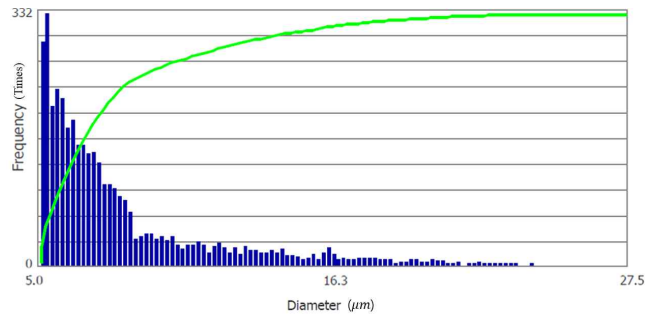


Fig. 9 Particle diameter/frequency graph

있었다.

다상유동해석에서 특정 크기 입자를 대상으로 하여 출구에 검출되는 입자의 수를 확인하여 운전조건을 최적화한 결과 목표하는 평균입도와 95.13% 일치하는 것을 확인하였다.

5. 결론

특정크기의 입자를 분급할 수 있는 분급기의 운전조건의 설정은 실험을 통해 많은 기초데이터를 확보하고 경험적인 측면에서 접근하는 경우가 있었다. 그러나 본 논문에서 적용한 다상유동해석과 최적화 기법을 통해 목표하는 평균입도크기를 예측하는 방법에 대해 다음과 같은 결론이 도출되었다.

다상유동해석은 목표하는 평균입도의 크기의 입자를 생성하여 출구영역에서 측정되는 입자의 수를 검출한다. 검출된 데이터를 이용하여 SNR분석을 통해 최적 운전조건을 예측하고 예측된 운전조건을 이용하여 실험한 결과 목표한 평균입도의 크기와 95.13% 일치하는 것을 확인하였다 이처럼, 초미세 입자의 크기를 가진 입자 중 특정 크기의 평균입도가 필요할 경우, 실험과 경험에 의해 분급기의 운전조건을 확보하는 것보다 다상유동해석과 다구찌 기법을 활용한 평균입도 예측방법을 사용하면 보다 효과적으로 평균입도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Lim, J. A., Lee, J. H., 2015, Quality and Antioxidant Properties of Cookies Supplemented with Black Sesame Powder, J. Korean Society of Food Science and Nutrition, 44:7 1058-1063.
- [2] Hitoshi, I., 2007, The Association of Power Process Industry, Seongdang, Korea.
- [3] Shah, K. V., Vuthaluru, R., Vuthaluru, H. B., 2009, CFD Based Investigations into Optimization of Coal Pulveriser Performance: Effect of Classifier Vane Settings, Fuel Processing Technology, 90:9 1135-1141.

- [4] Galk, J., Peukert, W., Krahen, J., 1999, Industrial Classification in a New Impeller Wheel Classifier, *Powder Technology*, 105:1 186-189.
- [5] Johansson, R., Evertsson, M., 2012, CFD Simulation of a Gravitational Air Classifier, *Minerals Engineering*, 33 20-26.
- [6] Taguchi, G., 1986, *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*, Japan.
- [7] Ross, P. J., 1996, *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*.
- [8] ANSYS Inc., 2016, *ANSYS CFX manual*, ANSYS Inc.
- [9] Kim, S. G., Park, Y. C., Park, J. H., 2010, Optimization of Pre-form for Manufacturing of Automobile Crum Clutch Hub Products Using Taguchi Method, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 9:6 101-108.
- [10] Lee, S. K., Lee, J. E., Kim, B. M., 2008, Optimization of Dies Angles to Improve the Dimensional Accuracy and Straightness of the Shaped Drawn Product Based on the ED Simulation and the Taguchi Method, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 32:16 474-480.
- [11] Composeco-Negrete, C., 2013, Optimization of Cutting Parameters for Minimizing Energy Consumption in Turning of AISI 6061 using Taguchi Methodology and ANOVA, *Journal of cleaner production* 53 195-203.
- [12] Kuram, E., Ozelik, B., 2013, Multi-objective Optimization Using Taguchi Based Grey Relational Analysis for Micro-Milling of AL 7075 Material with Ball Nose End Mill, *Journal of the international Measurement Confedation*, 46:6 1849-1864.
- [13] Siddesha, H. S., Shantharaja, M., 2013, Characterization of Mechanical Properties of Aluminum Processed by Repetitive Corrugaton and Straightening Process Using Taguchi Analysis, *The journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 65 294-298.