

공기분급식 미분쇄기의 운전조건이 미세분말의 크기에 미치는 영향

신응수^{a*}, 김기성^a, 김용욱^b

Effects of Operating Conditions of an Air-Classifier Mill on the Particle Size of Fine Powder

Eung-Soo Shin^{a*}, Kee-Sung Kim^a, Young-Wook Kim^b^a School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University,
1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk-do, 28644, Korea^b Daeheung, 67, Naesu-ro, Cheongwon-gu, Cheongju, Chungbuk-do, 28307, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	11	October	2016
Revised	28	November	2016
Accepted	2	December	2016

Keywords:

Air classifier mill
Fine powder
Particle size
Operating parameter
Response surface methodology
Analysis of variance

ABSTRACT

This paper investigates the effects of operating conditions of an air classifier mill (ACM) on the particle sizes of PVC and rice hull. Based on the Box-Behnken matrix, the pulverization experiments were performed considering three operating factors: the air flow rate, the classifier speed and the mill speed. The response surface methodology was applied to identify the effects of the operating factors on the particle size. Results show that the particle sizes are governed by the linear variations of the operating factors. As less air is supplied and the mill rotates more slowly, the powder of both PVC and rice hull becomes finer. Furthermore, the classifier speed has a significant effect on the PVC powder but almost no effect on the rice hull powder. Thus, it is found that strong interactions exist between the material characteristics of a particle and the operating conditions of the ACM.

1. 서론

크기가 마이크론 이하인 미세분말은 정밀기계, 정보기술, 정밀화학, 식품 및 제약 등 광범위한 산업분야에 수요가 있으며 최근 들어 신약바이오 등의 분야에서도 수요가 급증하고 있다^[1]. 미세분말을 제조하는 미분쇄기는 재료를 분쇄하는 방법과 분쇄된 입자를 크기에 따라 선별하는 방법에 따라 다양한 형태가 있으며 그중 가장 대표적인 것이 기계적 연삭 방식과 공기를 이용하여 입자를 선별하는 공기분급식 미분쇄기(ACM: air classifier mill)이다^[2,3]. ACM은 다양한 재질의 입자를 운전조건에 따라 미세분말을

제조할 수 있는 특징이 있어 폭넓게 사용되고 있으며 ACM의 운전 조건과 미세분말의 성능과의 관계에 대해 많은 연구가 수행되어 왔다.

Voorhees^[4]는 분말 크기에 영향을 줄 수 있는 ACM의 설계 인자와 운전 조건에 대해 폭넓게 고찰하고 그중에서 송풍기로부터의 공기 유입량과 분급기 회전속도의 영향이 가장 크다는 점을 제시하였다. 또한 Johansson과 Evertson^[5]은 ACM의 설계 및 형상 변수가 공기 유동에 미치는 영향을 고찰하고 분말 성능과의 관계를 분석하였으며, Mahdi 등^[6]은 공기분급 과정에 대한 수치 해석을 통해 ACM에 의한 분말의 크기를 예측하고 이를 실험 결

* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-3159

Fax: +82-43-263-2448

E-mail address: esshin@cbnu.ac.kr (Eung-Soo Shin).

과와 비교 검증함으로써 ACM의 최적조건을 찾는 방법을 제시하였다. 반면에 Sunil 등^[7]은 연삭로터 및 분급기의 회전속도, 공기 및 재료의 유입량을 변화시키면서 분쇄 실험을 통하여 얻은 암모늄 입자의 크기를 분석하였으며 Canacki 등^[8]은 다구찌의 실험계획법에 근거하여 운전조건이 알루미늄 분말의 크기에 미치는 영향을 분석하였다.

하지만 위에서 살펴본 많은 선행연구에도 불구하고 다양한 재료의 입자를 분쇄하는 경우에 각 재료별로 적절한 ACM의 운전조건을 찾는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 재료적 특성이 다른 PVC와 왕겨를 대상으로 ACM의 송풍기 공기량, 분급기 및 연삭로터의 회전속도 변화에 따른 분말 크기를 실험적으로 구하고 각 운전 인자가 결과에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험장치 구성

Fig. 1은 본 연구의 실험장치에 대한 개략도이다. 실험장치는 공기분급기와 연삭로터로 구성된 미분쇄기, 송풍기와 배관부를 포함하는 분말 이송계, 재료 공급기와 집진기의 입출력부, 운전 파라미터의 제어 및 모니터링 시스템으로 구성된다.

수직으로 배치된 공기분급기와 연삭로터는 모터에 의해 각각 구동되며 서로 반대방향으로 회전한다. ACM으로 유입된 원재료는 챔버 내에서 회전하는 연삭로터의 충격 해머에 의해 분쇄되며 송풍기로부터 공급되는 공기의 압력에 의한 상승력보다 분급기의 회전에 의한 원심력이 작은 입자는 선별되어 ACM 상부를 통해 밖으로 배출되며 집진기를 거쳐 미세분말로 출력된다. 반면에 입자에 작용하는 공기 상승력보다 원심력이 큰 경우는 분급기의 블레이드를 통과하여 연삭로터로 순환되어 재분쇄된다.

송풍기로부터 공급되는 공기는 ACM 하부로 유입되어 챔버 내에서 분쇄된 입자와 만나 ACM 상부를 거쳐 집진기까지 입자를 이송한 후 송풍기로 재순환된다. 분쇄과정에서 ACM으로 유입되는 공기량과 공기분급기 및 연삭로터의 회전속도는 제어부를 통하여 개루프 제어되며 송풍기 출구에 설치된 유량계와 공기분급기 및 연삭로터의 구동모터 축에 설치된 타코미터로부터 실시간으로 모니터링 된다. ACM으로부터 최종 출력된 미세분말은 샘플을 채취하여 입도분석기에 의한 분석을 거쳐서 분말 크기를 측정한다.

Fig. 2는 구동 모터, 이송 배관과 집진기를 포함한 ACM의 외부 및 내부 구성과 제어 모니터링 패널의 사진이다. 또한, Table 1은 주요 구성요소인 연삭로터, 분급기 및 송풍기의 제원을 정리한 것이다.

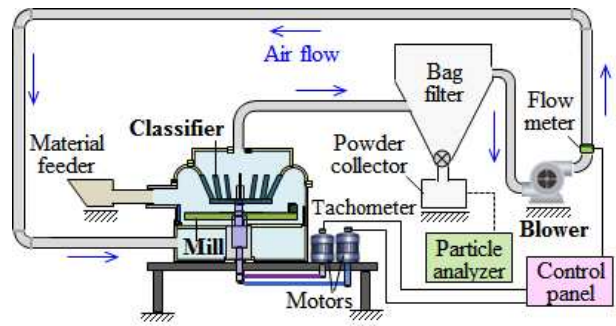


Fig. 1 Schematic of the test rig

Table 1 Specifications of the air classifier mill

Descriptions		Value
Mill	Power (kW)	7.5
	Diameter (mm)	325
	Speed (rpm)	2000-7200
Classifier	Power (kW)	1.1
	Diameter (mm)	195
	Speed (rpm)	500-5000
Air flow (m ³ /min.)		10-20

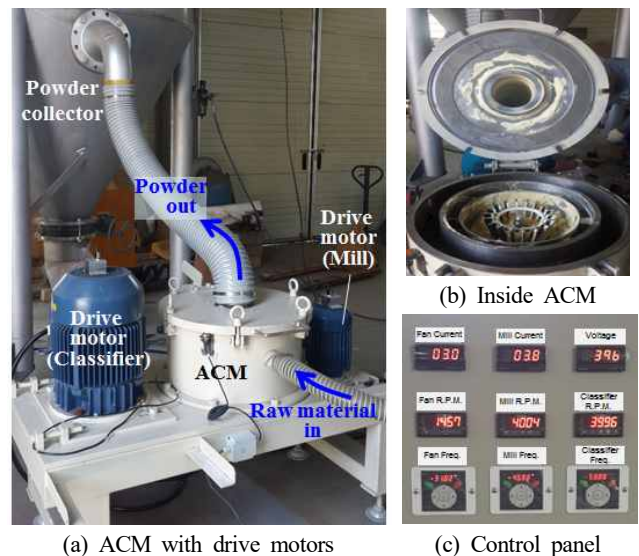


Fig. 2 Photograph of the test rig

3. Box-Behnken 실험계획법에 의한 분쇄 실험

3.1 실험 개요

본 연구의 분쇄 실험에서 사용한 분말은 밀도, 경도, 공기저항 등 재료적 특성이 크게 다른 PVC와 왕겨이며, Fig. 3은 분쇄되기 전 각 분말의 입자 상태를 보여주는 사진이다. 또한 미분쇄기의 운전 조건과 관련하여 고려한 인자는 송풍기로부터의 공기량, 분급기



(a) PVC (b) Rice hull
Fig. 3 Raw material before pulverizing

Table 2 Operating parameters and their levels

Parameter	Level		
	1	2	3
Air flow (X_1 , m ³ /min.)	12	15	18
Classifier speed (X_2 , rpm)	2000	3000	4000
Mill speed (X_3 , rpm)	3000	4000	5000

및 연삭로터의 회전속도이다. 공기량과 분급기의 회전속도가 분말의 크기에 영향을 주는 주요 인자라는 것은 선행 연구를 통해서 알려져 있으며^[4] 본 연구에서는 연삭로터의 회전속도가 분쇄과정 뿐 아니라 연삭챔버 내에서 분말의 유동에도 영향을 미치는 주요 인자로 판단하여 추가적으로 고려하였다.

분쇄 실험은 운전 조건과 관련한 3개의 인자를 변화시키면서 PVC와 왕겨에 대해 각각 별도로 진행하였다. 또 각 인자는 Table 2에 나타난 바와 같이 3 수준으로 변화를 주면서 실험을 수행하였다.

3.2 반응표면법과 Box-Behnken 설계를 활용한 실험 분석

분쇄 실험을 통하여 실험 인자가 결과에 미치는 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 반응표면법^[9] 적용하였다. 먼저 Table 2의 실험 인자 X_i 를 그 평균값 X_{i0} 와 수준차 ΔX_i 에 대해서 식 (1)과 같이 무차원 시킨 변수 x_i 로 변환하였다.

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (1)$$

또한 실험 결과로 얻어지는 미세분말의 크기 y 는 실험 인자 x_i 의 2차 함수로 근사화시킬 수 있다고 가정하였다. 즉,

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{i=1}^3 \sum_{j>i}^3 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} x_i^2 \quad (2)$$

식 (2)에서 적합계수 β_i 는 다음과 같이 구할 수 있다. 만약 n 회의 실험을 수행하고 그 결과를 식 (2)에 대입하면 n 개의 관계식을 얻을 수 있는데 식 (3)과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있으며 이를 풀면 식 (4)와 같이 β_i 를 구할 수 있다.

Table 3 Box-Behnken design matrix

Experimental run	Level		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

$$\{y\} = [x] \{\beta\} \quad (3)$$

$$\{\beta\} = ([x]^T [x])^{-1} [x]^T \{Y\} \quad (4)$$

본 연구에서와 같이 3 수준의 3 인자 실험으로부터 식 (2)의 반응표면을 결정하는 문제에서는 요구되는 실험 횟수가 가장 적다는 점에서 Box-Behnken 방법이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다^[10]. Table 3은 본 연구에서 적용한 Box-Behnken 방법의 실험계획 표이다.

4. 실험결과 분석

4.1 이차모델의 적합도 검증

Table 4는 Box-Behnken의 실험계획법에 따라 PVC와 왕겨에 대해 분쇄 실험을 수행하여 얻은 미세분말의 크기를 정리한 것이다. 또한 Fig. 4는 미분쇄된 PVC와 왕겨의 샘플 사진이고 Fig. 5는 입도분석 결과로서 가로축은 입자 크기이고 세로축은 체적 밀도로서 그래프 상의 면적의 합을 구하면 100%가 된다.

실험 결과를 식 (4)에 대입하여 PVC와 왕겨에 대한 2차 모델의 적합계수 β_i 를 구하면 Table 5와 같다. 또한 Fig. 6은 식 (2)의 2차 모델에 의해 예측된 분말 크기와 실험 결과를 비교한 것으로 PVC와 왕겨 각각에 대한 예측 결과와 실험 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 2차 모델의 적합도를 판단할 수 있는 파라미터인 결정계수 R^2 는 PVC의 경우 0.943이고 왕겨의 경우 0.922로서 적합도 판별의 경계값인 0.8을 크게 상회한다^[10]. 따라서 본 연구에

Table 4 Experimental responses of the particle size (μm)

Experimental run	PVC	Rice hull
1	74.45	121.23
2	88.53	163.35
3	52.80	110.22
4	59.51	139.18
5	27.92	79.22
6	46.99	130.27
7	57.09	103.90
8	84.85	170.45
9	64.74	114.43
10	44.32	113.63
11	82.04	132.67
12	66.55	148.65
13	63.64	140.40
14	62.91	140.05
15	63.13	139.94

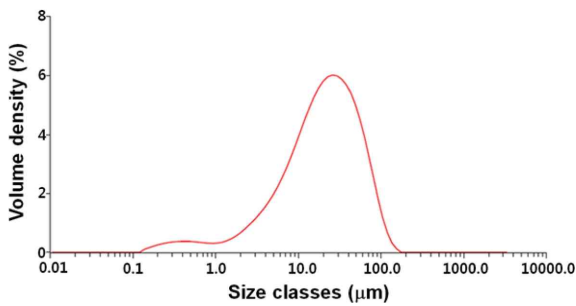
Table 5 Fitting coefficients of the quadratic model

Model	PVC	Rice hull
β_0	63.64	140.40
β_1	8.45	23.59
β_2	-10.82	-2.50
β_3	13.21	14.77
β_{12}	-1.84	-3.29
β_{13}	2.17	3.88
β_{23}	1.23	4.20
β_{11}	-2.51	-6.65
β_{22}	7.69	-0.26
β_{33}	-6.92	-12.80

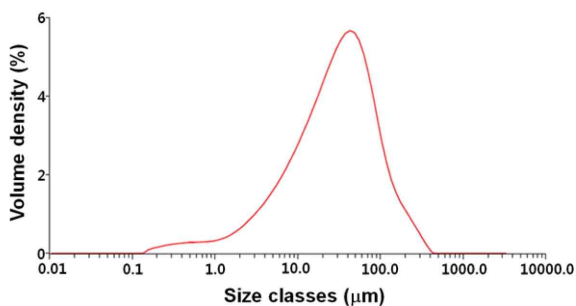


(a) PVC (Experiment #4) (b) Rice hull (Experiment #7)

Fig. 4 Fine powder after pulverizing

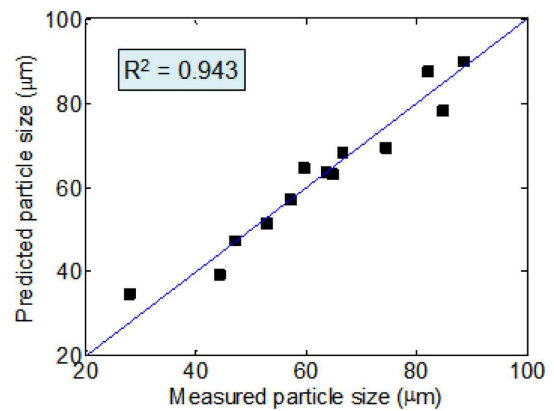


(a) PVC (Experiment #4)

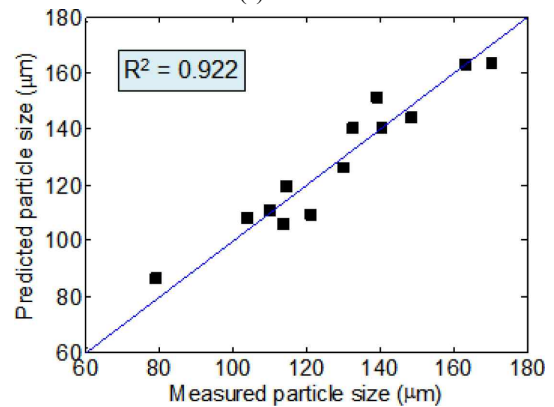


(b) Rice hull (Experiment #7)

Fig. 5 Results of the particle size analysis



(a) PVC



(b) Rice hull

Fig. 6 Comparison of the measured and predicted particle sizes

서 식 (2)로 가정한 2차 모델은 실험 결과를 잘 반영한다고 할 수 있다.

2차 모델로부터 도출한 PVC와 왕겨의 분말 크기에 대한 반응표면을 비교해보면 Figs. 7(b)와 8(b)에서는 매우 유사하지만 Figs. 7(a)와 8(a), 그리고 Figs. 7(c)와 8(c)에서는 큰 차이가 있다. 즉, 재질에 따라 ACM 운전 인자의 영향이 다르다는 것을 예측할 수 있다.

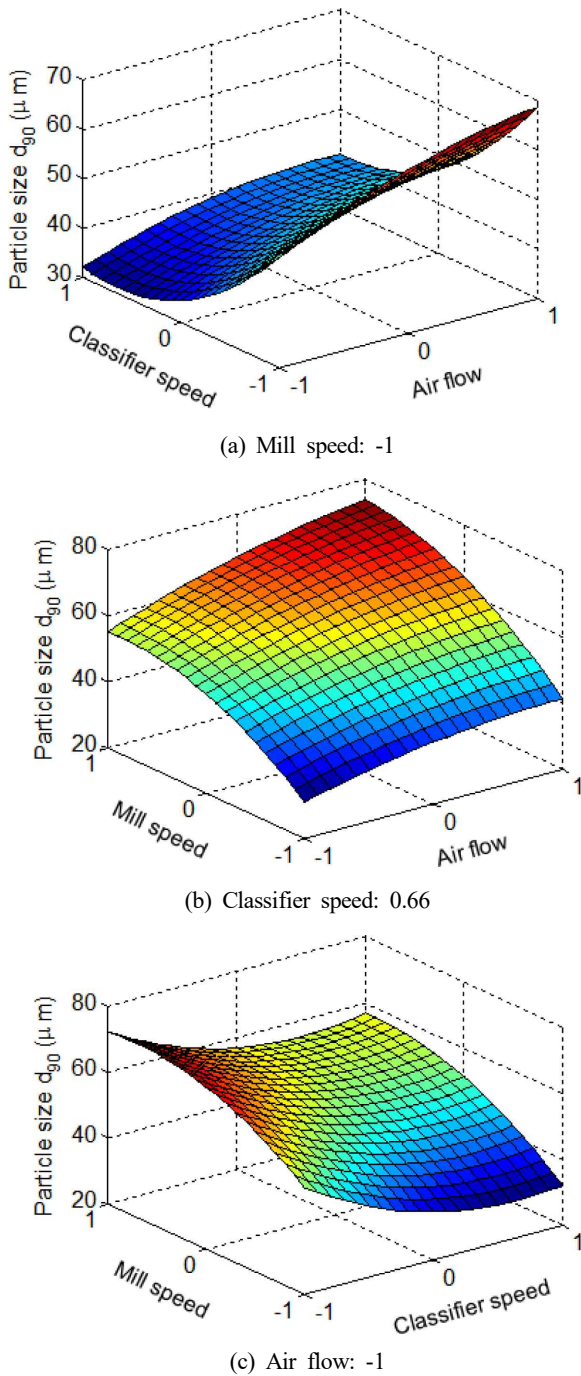


Fig. 7 Response surface plots of PVC

4.2 미분쇄기 운전조건이 분말 크기에 미치는 영향 분석

앞 절에서 검증한 2차 모델에 근거하여 ACM 운전 인자가 분말 크기에 미치는 영향을 구체적으로 살펴보기 위하여 분산분석을 수행하였다. Tables 6과 7은 PVC와 왕겨의 반응표면 모델에서 각 항에 대한 F값과 p값을 정리한 것이다. 여기서 p값이 0.05보다 작으면 그에 해당되는 항이 매우 중요함을 의미하고 0.1보다 크면 해당 항은 결과에 미치는 영향이 거의 없다는 것을 의미한다^[10].

결과를 보면 PVC와 왕겨의 분말 크기는 ACM 운전조건인 선형

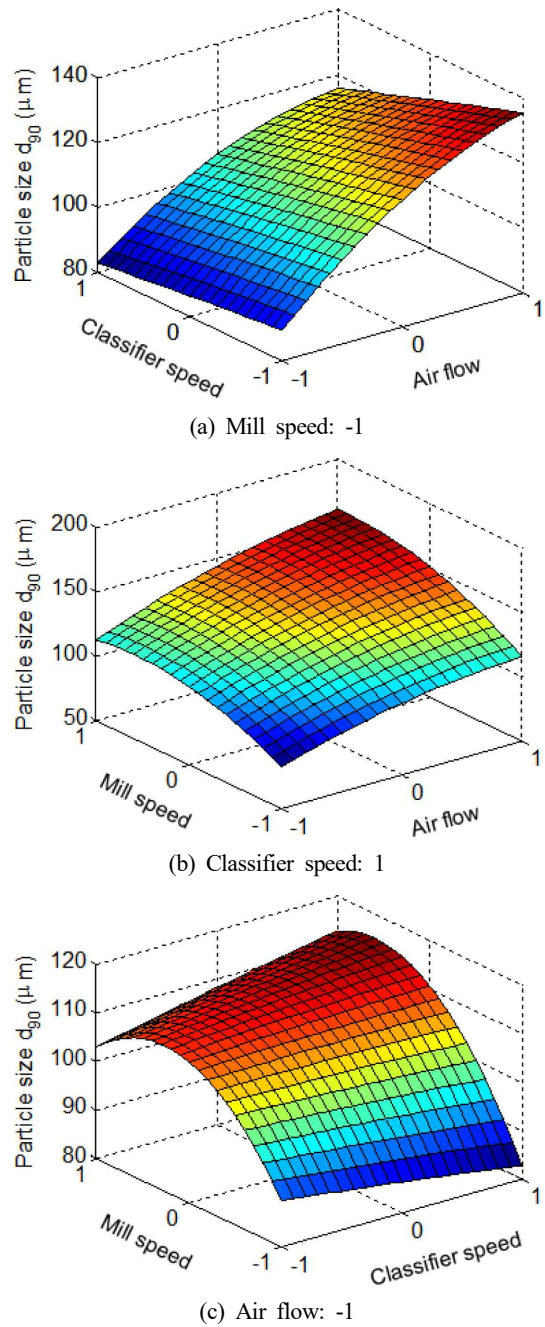


Fig. 8 Response surface plots of rice hull

변화에 지배적인 영향을 받는다. PVC의 경우 p값이 0.05보다 작은 항은 공기량 x_1 , 분급기 회전속도 x_2 , 연삭로터 회전속도 x_3 의 선형 항이며, 왕겨의 경우 x_1 및 x_3 의 선형 항이 이에 해당한다. 이들 선형 항의 영향을 Table 5의 적합 계수와 연관하여 분석하면 PVC와 왕겨의 두 경우 모두 $\beta_1, \beta_3 > 0$ 이고 $\beta_2 < 0$ 이므로 공기량과 연삭로터 회전속도는 작아질수록, 그리고 분급기 회전속도는 커질수록 분말 크기가 작아진다. 다만 왕겨의 경우 분급기의 회전속도는 p값이 0.1보다 훨씬 크기 때문에 결과에 미치는 영향이 거의 없다.

Table 6 ANOVA results for PVC

Source	DOF	Mean squares	F-value	p-value
Model	9	379.9	9.196	0.01245
x_1	1	571.6	13.838	0.01371
x_2	1	936.8	22.677	0.00505
x_3	1	1419.5	34.364	0.00205
x_1x_2	1	13.6	0.328	0.59147
x_1x_3	1	18.8	0.456	0.52946
x_2x_3	1	6.1	0.147	0.71763
x_1^2	1	23.3	0.563	0.48687
x_2^2	1	218.3	5.285	0.06987
x_3^2	1	176.7	4.277	0.09348
Residuals	5	41.3		

Table 7 ANOVA results for rice hull

Source	DOF	Mean squares	F-value	p-value
Model	9	794.1	6.569	0.02591
x_1	1	4450.1	36.814	0.00176
x_2	1	50.0	0.413	0.54859
x_3	1	1744.1	14.428	0.01265
x_1x_2	1	43.3	0.358	0.57562
x_1x_3	1	60.1	0.497	0.51211
x_2x_3	1	70.4	0.583	0.47968
x_1^2	1	163.1	1.349	0.29789
x_2^2	1	0.3	0.002	0.96526
x_3^2	1	604.9	5.004	0.07550
Residuals	5	120.9		

Table 8 Fitting coefficients of the modified quadratic model

Model	PVC		Rice hull	
	Coefficient	p-value	Coefficient	p-value
β_0	62.10	< 0.001	136.46	< 0.001
β_1	8.45	0.00177	23.59	< 0.001
β_2	-10.82	0.00033	-	-
β_3	13.21	< 0.001	14.77	0.00107
β_{22}	7.88	0.02131	-	-
β_{33}	-6.72	0.04166	-12.31	0.02927

한편 Tables 6과 7에서 2차항의 p값을 살펴보면 PVC의 경우 x_2^2 및 x_3^2 항의 p값이 0.1보다 작고, 왕겨는 x_3^2 항의 p값이 0.1보다 작다. 즉 PVC와 왕겨의 분말 크기가 이들 운전 인자의 비선형 변

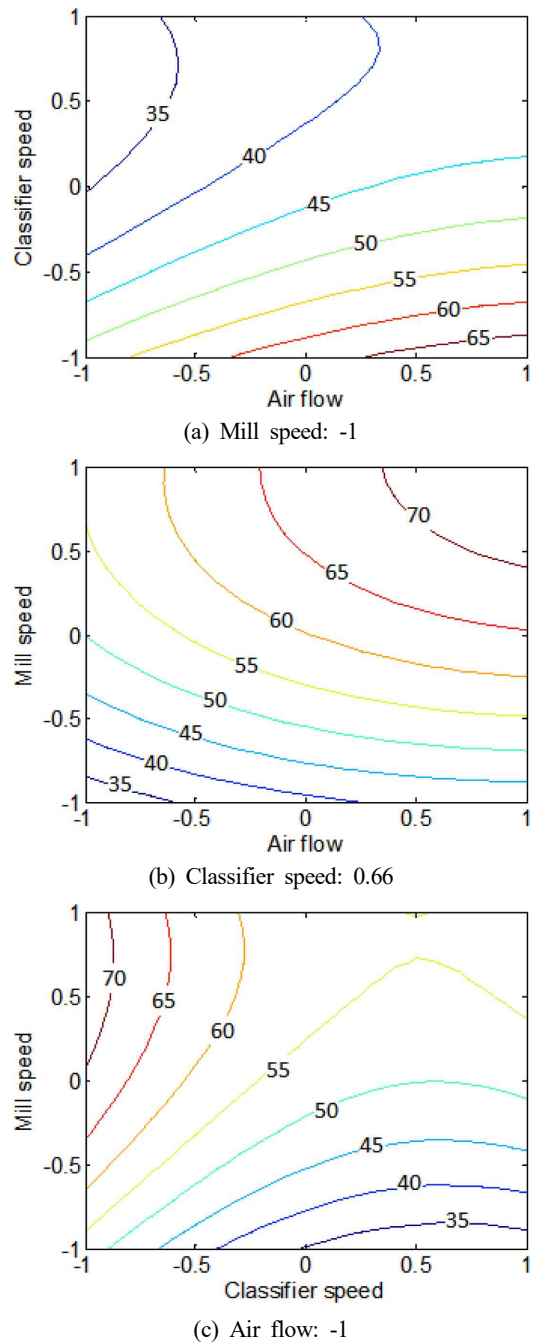


Fig. 9 Contour plots of PVC

화에도 부분적으로 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 분급의 기준이 되는 원심력이 입자 속도의 2차항에 비례하고 입자 속도는 분급기 및 연삭로터의 회전속도에 따라 결정되기 때문인 것으로 보인다. 반면 Tables 6과 7에서 x_1x_2 , x_1x_3 및 x_2x_3 항에 해당하는 p값은 모두 0.1을 크게 상회하며, 따라서 ACM 운전 인자 간의 상호 작용이 분말 크기에 미치는 영향은 거의 없다고 할 수 있다.

Table 8은 식 (2)에서 p값이 0.1보다 작아 결과에 미치는 영향이 큰 항만으로 수정된 반응표면 모델에서의 적합 계수를 정리한 것이다. PVC와 달리 왕겨에서 분급기 회전속도 x_2 의 영향이 미미한

이유는 왕겨의 재료적 특성이 PVC와 다르기 때문인 것으로 보인다. 비중이 1.4인 PVC에 비해 왕겨의 비중은 0.13 정도로 매우 가벼워서 공기량이 입자 유동에 미치는 영향에 비해 분급기 회전의 영향은 미미하기 때문이다. 반면 연삭로터 회전속도 x_3 은 분급 과정에서 공기 유동, 그리고 분쇄 과정에서의 입자에 가해지는 충격량에 동시에 관련되기 때문에 PVC와 왕겨의 재료 특성이 다름에도 불구하고 분말 크기에 영향을 주는 것으로 보인다.

Figs. 9와 10은 PVC와 왕겨의 반응표면을 분말 크기의 선도로

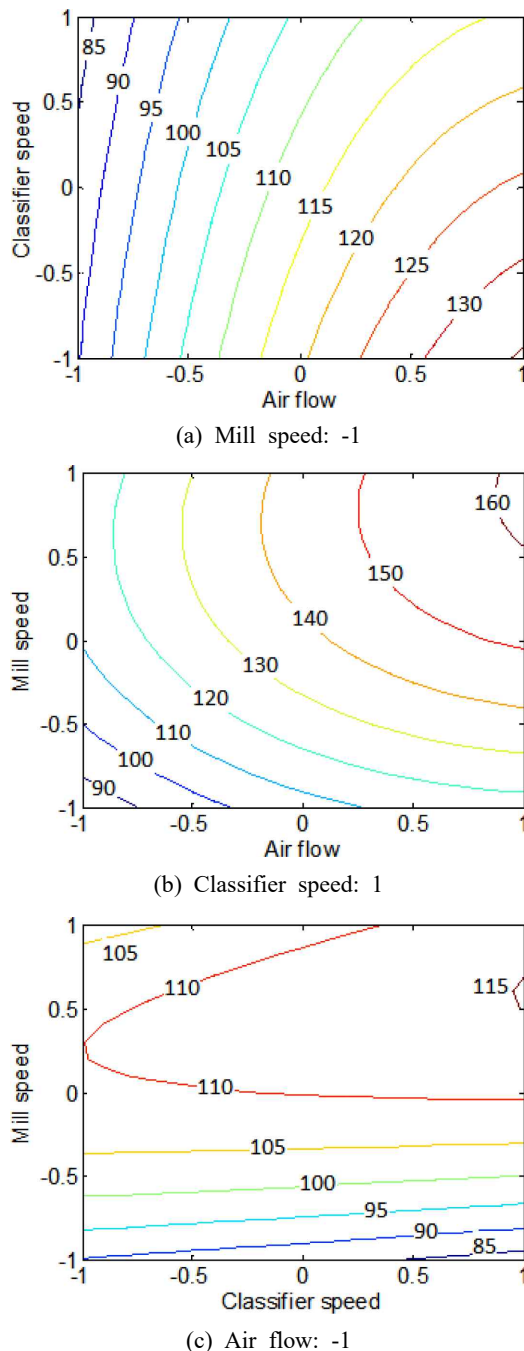


Fig. 10 Contour plots of rice hull

재구성한 것인데 재질에 따라 미분쇄기의 운전조건이 결과에 미치는 영향을 비교 분석할 수 있다. 공기량과 연삭로터의 회전속도와 분말 크기의 관계를 나타낸 Fig. 9(b)와 Fig. 10(b)를 비교해보면 거의 차이가 없다. 즉, 공기량이 적을수록, 연삭로터의 회전속도가 낮을수록 재질에 상관없이 분말 크기가 작아진다.

하지만 Figs. 9(a) 및 (c)의 PVC의 경우 분급기 회전속도의 변화가 분말 크기의 변화에 영향을 미치는 반면, Figs. 10(a) 및 (c)의 왕겨의 경우 그 영향은 미미하며 특히 분말 크기가 작아지는 최적 조건에 접근할수록 분급기 회전속도의 영향은 줄어든다.

5. 결론

본 연구에서는 PVC와 왕겨를 ACM으로 분쇄할 때 운전 파라미터인 공기량, 분급기 및 연삭로터의 회전속도가 분말 크기에 미치는 영향을 분석하였다. Box-Behnken의 실험계획법에 따라 분쇄 실험을 수행하고 반응표면법에 근거하여 2차 모델을 구한 후 분산 분석을 통하여 모델의 적합성과 각 인자의 영향을 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

ACM의 운전 인자가 PVC와 왕겨의 분말 크기에 미치는 영향은 선형 특성이 지배적이다. 공기량이 적을수록 그리고 연삭로터의 회전속도가 낮을수록 이에 비례하여 PVC와 왕겨는 분말 크기는 작아진다. 반면 분급기 회전속도는 높을수록 분말 크기가 작아지는데 PVC의 경우는 그 영향이 크지만 왕겨의 경우는 영향이 미미하다. PVC와 왕겨 사이에 이러한 차이는 밀도와 공기유동성 등 재료적 특성이 다르기 때문인 것으로 보인다. 또한 분급기 및 연삭로터 회전속도의 경우 분말 크기에 미치는 영향이 2차의 비선형 특성도 나타내는데 이는 분급의 기준이 되는 원심력이 회전속도의 2차항에 비례하기 때문이다.

한편 ACM 운전 인자간의 상호 작용이 분말 크기에 미치는 영향은 거의 없다. 반면에 입자 재질과 운전 인자 사이의 상호 작용은 분말 크기에 영향을 미친다. 따라서 각 재질에 따른 ACM 운전 조건의 적절한 범위를 도출하는 것은 매우 중요하다.

References

- [1] Marcotte, E., 2015, Achieving Particle Size Reduction with a Multirow Cage Mill, Powder and Bulk Eng., 29:1 83-86.
- [2] Jarrard, M., 2006, Effect of Cyclone Assisted Milling on Legume Flour Characteristics and Functionality in Selected Food Products, A Thesis for a Master, Univ. of Georgia, UAS, 4-34.
- [3] Shapiro, M., Galperin, V., 2005, Air Classification Of Solid Particles: A Review, Chem. Eng. and Proc., 44 279-285.

- [4] Voorhees, R., 2013, How to Operate an Air Classifier Mill to Meet Your Fine Grinding Goals, *Powder and Bulk Eng.*, 26:6 23-27.
- [5] Johansson, R., Evertson, M., 2012, CFD Simulation of a Gravitational Air Classifier, *Minerals Eng.*, 33 20-26.
- [6] Mahdi, I., Samira, R. Akbar, J., 2009, Computer Simulation of Particle Size Classification in Air Separators, *Iran J. Chem.*, 28:4 70-78.
- [7] Jain, S., Mulay, M., Singh, P., Bhattacharya, B., 2006, Prediction of Particle Size of Ammonium Perchlorate during Pulverisation, *Defence Science J.*, 56:3 423-431.
- [8] Canakci, A., Erdemir, F., Varol, T., Patir, A., 2013, Determining the Effect of Process Parameters on Particle Size in Mechanical Milling using the Taguchi Method: Measurement and Analysis, 40 3532-3540.
- [9] Qiu, P., Cui, M., Kang, K., Park, B., Son, Y., Khim, E., Jang, M., Khim, J., 2014, Application of Box-behnken Design with Response Surface Methodology for Modeling and Optimizing Ultrasonic Oxidation of Arsenite with H₂O₂, *Cent. Eur. J. Chem.*, 12:2 164-172.
- [10] Manohar, M., Joseph, J., Selvaraj, T., Sivakumar, D., 2013, Application of Box-behnken Design to Optimize the Parameters for Turning Inconel 718 using Coated Carbide Tools, *Int. J. of Scientific & Eng. Res.*, 4:4 620-642.