

Turbo Mill의 임펠러를 이용한 메밀의 공기분급

이강열 · 장태균 · 강위수*

강원대학교 생물시스템공학부

Air Classification of Buckwheat using Impeller of Turbo Mill

K. Y. Lee, T. G. Jang, W. S. Kang

Biological System Engineering, Kangwon National University

Abstract

It is difficult to pulverize the buckwheat, which is consisted of about 42% of hull, using the present manufacturing process. Therefore, this study was carried out to pulverize buckwheat into fine or super fine powder, using the Turbo mill, which can pulverize and classify at the same time. The turbo mill is developed by the cooperation between Kangwon National University and Korea Energy Tech. Co. Ltd. When the circumferential velocity of impeller is 100m/s, and the buckwheat is supplied at 18kg/h, above 98% of buckwheat is pulverized into ultra fine powder, of which the particle size is smaller than 1~50 μm . The optimum circumferential velocity of impeller and the optimum feeding amount can be estimated, analyzing the specific surface values of the analysis data of particle size with the response surface methodology.

Key words: buckwheat, hull, turbo mill, circumferential velocity

서 론

현대의 바이오 및 기능성 식품산업에서는 식품재료입자경의 미분화로 표면적의 증가를 유도하여 유효성분의 추출을 용이하게 하고 소량만으로도 효과를 극대화시킬 수 있는 수백 nm~10 μm 이하의 입자크기분포를 가진 제품을 생산할 수 있는 Nano Particle Technology의 분쇄가공기술에 대한 연구개발이 독일, 일본 등에서 활발히 추진되고 있으며 국내식품산업에서도 이러한 기술개발이 도입되어야 할 것이다(박동준, 2002).

최근에 식품산업 및 한방재료 가공 산업에서의 분쇄가공기술은 입자크기 80%가 10~1000 μm 범위의 제품을 생산하는 very fine grinding과 1~10 μm 범위의 제품을 생산하는 Super fine grinding의 분쇄기술이 점차적으로 이용되고 있으나 최종적인 제품

생산에서 제품의 질을 결정하는 분급기술은 기존의 분급효율이 낮은 대규모 시설의 중력분급과 체망고름방식에서 벗어나지 못하고 있다. 그러므로 분급효율이 높고 시설규모가 작은 회전체를 이용한 공기분급기 기술의 활용이 절실히 요구되고 있다(C. L. Prasher, 1987; Morimoto와 Shakouchi, 2003).

공기분급기에서 공기로 운반되는 입자들은 입자의 크기, 밀도 또는 유동장에서 입자들에 작용하는 관성력과 유체의 힘 사이의 균형에 기초된 모양에 따라 분류된다. 공기분급기는 제한된 크기범위의 입자를 생산하기 위하여 주로 이용되어진다. 제한된 크기범위에서 분말의 생산은 산업현장의 요구에 따라 중요하다(예를 들어, 전자, 식품, 화학, 석유화학과 제약등). 원재료로서 사용되는 분말의 생산품질은 입자분포에 의하여 균질성, 흐름성, 맛, 구조 및 비표면적 등의 물리적 성질이 제품의 생산성과 품질에 큰 영향을 끼친다. 좁은 입자크기분포도 일수록 유동성이 개선되어 밀도가 균일한 최종제품을 만들어 낼 수 있다.

산업에서는 일반적으로 건조된 가루를 분급하기

Corresponding author: Wie-So Kang, Associate Professor, Biological System Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea
Phone: 033-250-6494, Fax: 033-250-6494
E-mail: kangwiso@kangwon.ac.kr

위하여 공기분급기를 사용한다(AnnaWorthen, 2001). 공기분급 방법에는 분말된 재료의 생산과정에서 폭 넓게 사용되어지고 있는 사이클론타입과 교차유동 에어타입 그리고 임펠러휠타입의 분급기들이 있다(Morimoto와 Shakouchi, 2003).

이와 같은 분급기들은 분급효율을 높이기 위해 분쇄공정과 분급공정을 분리하는 것이 대규모 생산에서는 유리하지만, 시설규모가 커지는 문제와 소규모, 소량생산에는 불리하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 로터의 고속회전에 의하여 발생하는 원심력과 항력을 이용하여 분쇄와 분급을 하는 ACM(air classifier mill)이 독일에서 개발되었으나 10~200 μm 의 넓은 입자크기분포를 가지고 있어 생산된 분말을 제품처럼 사용할 수 있는 곳이 제한되어졌으며 좁은 입자크기분포를 가진 제품을 생산하기 위한 추가적인 분급시설이 요구되고 있는 실정이다(J. Galk와 Peukert, 1998).

본 연구에서는 고섬유질로 구성되면서 경도가 높아 미분말화 하기가 어려우나 최근 초미분말화를 요구하는 메밀을 공시시료로 선택하였다.

메밀은 수분함량이 10~15%내외이고, 단백질 함량은 12%내외로 다른 작물에 비해 양질의 단백질을 많이 함유하고 있다. 또한 껍질에 풍부한 섬유소가 함유되어 있어 혈액 콜레스테롤 및 혈당을 낮추어주고 동맥경화, 당뇨병 등의 성인병의 예방, 치료에 효과가 큰 수용성 식이섬유가 밀이나 귀리에 비해 많이 들어 있다. 이런 메밀의 껍질은 대부분 섬유질로 구성되어 있어서 기존의 분쇄공정기술로는 미분화가 어렵다. 그러므로 섭취가 가능할 수 있는 미분화 기술이 개발되어야 한다. 현재 메밀 공장에서의 생산공정은 분쇄생성물의 입자크기 80%가 100~1000 μm 의 범위에 드는 Fine grinding단계의 flint-stone type mill을 이용한 분쇄공정과 껍질과 조분의 제거와 입자크기 분리를 위하여 Top-Down방식의 Screen망과 Sieve체를 이용하여 메밀가루를 생산하고 있으며, 생산수율과 생산량이 50%이하로서 손실이 너무 큰 것으로 조사되었다(Steadman *et al.* 등, 2001).

본 연구에서는 고섬유질로 구성된 메밀껍질의 초미분말화 하기 위하여 강원대학교와 한국에너지기술이 산학협동으로 개발한 Turbo Mill의 임펠러를 이용한 공기분급으로 생산수율의 향상을 위한 연구를 하였고 연구 목적은 다음과 같다(강위수와 이강열, 2003).

1) 임펠러의 선속도(80~100 m/s)범위에 따라 단메

밀의 분쇄생성물의 특성분석을 통한 생산수율과 생산량에 관한 분석과 2) 입도분석자료에서 입자의 미립화 경향을 나타내는 비표면적(m^2/g)값들을 반응표면분석법을 이용하여 최적의 임펠러선속도와 재료공급량지점을 예측하고자 하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 연구에서 사용한 공시재료는 도정전의 단메밀로서 강원대학교 농장에서 2002년 11월에 수확한 재료를 사용하였다. 단메밀의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

실험장치

1. Turbo Mill의 원심분급을 위한 이론적 배경

원심분급의 기본원리는 반경방향에서 입자의 힘균형으로부터 이해될 수 있다. Fig. 1은 원심분급의 기본원리를 보여주고 있다. 입자는 임펠러의 날개를 통해 분급zone에 공기로 수송되어지는데 분급은 다음의 가정으로 일어난다.

- ① 입자는 구형이다.
- ② 입자들 사이에는 상호작용은 존재하지 않는다.
- ③ 입자와 원주공기속도 사이에는 미끄럼이 존재

Table 1. Physical properties of buckwheat used for milling experiments

| Item | Observations |
|-------------------------|--------------|
| Moisture content(% w.b) | 13.5 |
| Grain(%) | 55.4 |
| Hull(%) | 41.6 |
| Broken grains(%) | 3 |

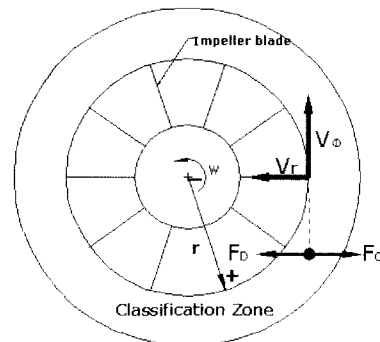


Fig. 1. The Basic Principle of Centrifugal Classification

하지 않는다.

④ 코리올리스의 힘은 무시될 수 있다.

⑤ 가속도로 인한 힘은 무시되어 질 수 있다.

분급에서 가장 중요한 힘은 원심력과 항력이다. 만약 원심력이 항력보다 훨씬 크면 입자는 조분으로 편향되어질 것이다. 만약 원심력이 항력보다 더 작으면 입자는 미분으로서 로터를 통하여 공기로 수송되어질 것이다. 원심력과 항력이 같은 경우에 입자크기를 Cut Size라고 부른다.

회전하는 유동장에서 중력의 무시와 입자밀도가 유체밀도보다 훨씬 크다고 가정하면, r방향에서의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$m_p \frac{dv_{r,p}}{dt} = F_D + m_p \frac{v_{\theta,p}^2}{r} = F_D + F_C; F_C = m_p \frac{v_{\theta,p}^2}{r} \quad (1)$$

여기에서 m_p 는 입자질량, $v_{r,p}$ 과 $v_{\theta,p}$ 는 입자의 반경속도와 접선의 속도이다. F_D 는 항력이고 F_C 는 원심력이다. 구형입자에서 질량은 다음과 같이 주어진다.

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \quad (2)$$

여기서, D_p 는 입자의 지름이다. 단지 스토크식에서 입자를 생각하면, F_D 는 스토크법칙으로 주어진다. (F_D 는 유체저항이다.)

저항계수 C_D 와 입자레이놀즈수의 Re_p 관계에서 Stokes 영역 $10^{-4} < Re_p < 2$ 로 가정하면, $C_D = 24/Re_p$ 된다.

$$\left(Re_p = \frac{D \cdot v_r \cdot \rho}{\mu} \right)$$

$$F_D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v_r^2}{2} = \frac{24\mu}{D \cdot v_r \cdot \rho} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot v_r^2}{2} \quad (3)$$

$$= 3\pi\mu D_p v_r$$

여기에서, μ 와 v_r 은 유체 동점도 계수($N \cdot S/m^2$)와 반경속도이다. 방정식 (1)에 식(2)와 (3)넣을 넣으면 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \frac{dv_{r,p}}{dt} = 3\pi\mu D_p v_r + \frac{\pi}{6} \rho_p D_p^3 \frac{v_{\theta,p}^2}{r} \quad (4)$$

원심분급으로 인하여, Fig. 1에서처럼 F_D 는 F_C 에 반대편에서 작용할 것이다. F_C 가 + r방향으로 반경

바깥쪽에서 작용하기 때문에, 주 유동흐름은 $v_r < 0$ 이 되도록 -r방향으로 반경 안쪽에 있다. F_C 가 D_p^3 에 비례적이고, F_D 가 단지 D_p 에 비례적인 동안에 F_C 는 입자가 공기로부터 제거되어질 수 있게 만들며, D_p 가 증가할 때 지배적인 힘이 된다. 이론적 Cut Size D_{PC} 는 방정식(1-4)에서 입자가속도 $\left(\frac{dv_{r,p}}{dt}\right)$ 를 0으로 놓음으로써 결정되어진다.

$$D_{PC} = \frac{\sqrt{18\mu v_r}}{\sqrt{\rho_p v_{\theta,p}^2}} \quad (5)$$

Turbo분쇄기의 분급기능의 설계를 위하여 다음의 내용은 설명되어야한다.

- ① 유동장은 강제소용돌이가 되어져야한다.
- ② 유입되는 공기는 로터와 같은 속도를 가지고 있다.
- ③ 덩어리는 퍼트려져야만 한다.
- ④ 공기와 입자들 사이의 운동량의 변화는 최소가 되어져야 한다.
- ⑤ 초미립자의 생산을 위하여 고속의 원주 속도가 필요하다.

2. Turbo Mill의 분쇄부

Turbo mill의 분쇄부는 Fig. 2와 같이 투입부, 분쇄영역, 배출부 3부분으로 구성되어있다. 분쇄원리는 로터의 고속회전에 의해 발생하는 강제소용돌이로 재료와 공기를 투입부로 흡입하게 되어 로터의 날개와 일치하는 1차트랙과 2차트랙에서 재료와 공기가 체류하면서 분쇄메카니즘으로 발생하게 되는 전단, 압축, 충격력에 의해 분쇄물들이 미립화되며 분쇄영역을 벗어나 배출구에서 배출되는 구조로 되어있다.

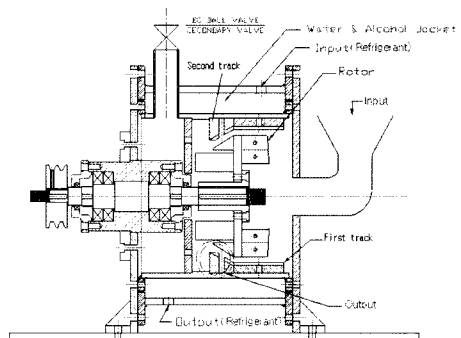


Fig. 2. Pulverization zone of Turbo mill.

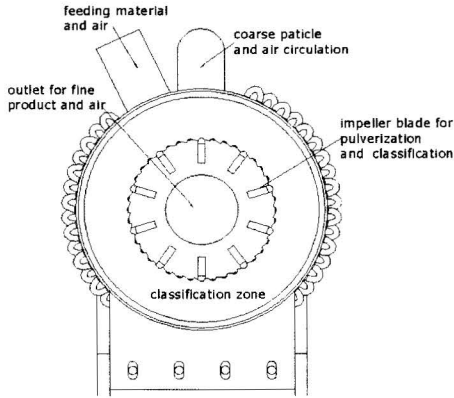


Fig. 3. Turbo Mill for Classification.

3. Turbo Mill의 분급부

Turbo Mill의 분급부는 Fig. 3에서처럼 분쇄부에서 배출된 재료가 2차트랙 경계부분에서 임펠러의 고속회전으로 발생하는 원심력과 항력에 의하여 classification zone에서 미분과 조분으로 분리가 가능한 구조로 되어있다. 미분은 항력의 영향으로 공기와 함께 중심에 위치한 배출구를 통하여 하우징 밖으로 배출되고, 조분은 임펠러에 의하여 발생한 원심력으로 classification zone의 바깥둘레에 설치된 재순환구를 통하여 공기와 함께 재순환하게 된다.

4. 실험 구성

본 연구에서 사용한 Turbo Mill의 폐회로 시스템 (inline)구성도는 Fig. 4와 같다. 구성도를 살펴보면, 분쇄와 분급기능을 가진 Turbo Mill과 분쇄와 분급 메카니즘 구성에서 공기흐름의 균형을 잡아주며 최종 제품생산을 위해 이용되는 Turbo blower, 분진과

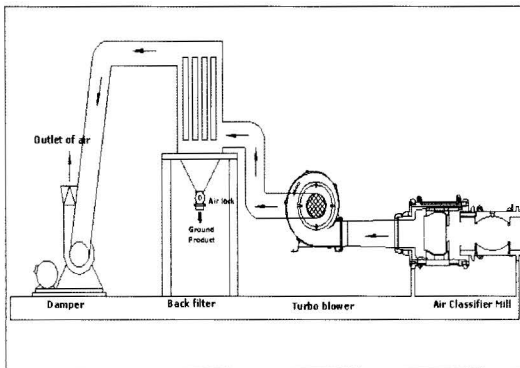


Fig. 4. Experiment Composition.



Fig. 5. Photograph of Turbo Mill.

최종제품 수집을 위한 백필터와 로터리밸브 그리고 백필터의 공기순환을 위한 댐퍼(damper)로 구성되어 있다. Fig. 5는 제작된 Turbo Mill을 보여주고 있다.

실험설계

예비실험을 통하여 분쇄기에 영향을 주는 공정변수인 원료공급량(X_1), 분쇄 선속도(X_2)를 2개의 독립 변수로 결정하였다. 원료공급량(18~30 kg/h), 분쇄 선속도(80~100 m/s)의 2가지 공정변수를 변화시켜 분쇄기에서 3²요인배치법에 의해서 실험을 하였으며 실험계획은 Table 2에 나타난 것과 같다. 독립변수의 코드화한 값의 범위는 -1(최저값), 0(중앙값), +1(최고값)이다.

입도 분석

분쇄생성물의 입도분포는 Particle Size Analyzer (Mastersiser-2000, Malvern Ins. Ltd, U. K)를 이용하여 분석하였다. 공시재료는 Dry dispersion에서 3회 반복 입자를 측정하였다.

본 연구에서는 분급생성물의 분급영역별 입자크

Table 2. Experimental design for Turbo mill

| Experiment no. | Process variables | | Coded variables | |
|----------------|-------------------|-----|-----------------|----|
| | X1 | X2 | X1 | X2 |
| 1 | 18 | 80 | -1 | -1 |
| 2 | 18 | 90 | -1 | 0 |
| 3 | 18 | 100 | -1 | 1 |
| 4 | 24 | 80 | 0 | -1 |
| 5 | 24 | 90 | 0 | 0 |
| 6 | 24 | 100 | 0 | 1 |
| 7 | 30 | 80 | 1 | -1 |
| 8 | 30 | 90 | 1 | 0 |
| 9 | 30 | 100 | 1 | 1 |

기에 따른 조분말은 2000 μm 통과(10mesh), 중간미분말은 420 μm(40mesh), 미분말은 74 μm(200mesh), 초미분말은 1~50 μm를 통과분으로 분류하여 분석하였다.

통계분석

측정된 자료는 SAS(SAS Institute Inc, Statistical Analysis System Ver6.0, USA)프로그램을 사용하여 처리하였고, 반응표면분석(Response Surface Analysis) 방법에 의하여 독립변수(원료 공급량, 분쇄 선속도)의 변화에 따른 종속변수(비표면적)의 관계를 분석하여 종속변수의 변화에 큰 영향을 끼치는 독립변수를 2차 회귀모형으로 표현하였다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j$$

(Y: 종속변수, X: 독립변수, β: 상수) (6)

결과 및 고찰

분급생성물의 분급특성 평가를 통한 메일의 생산수율과 생산량

1. 임펠러의 선속도 80 m/s, 공급량 18 kg/h, 24 kg/h, 30 kg/h

Fig. 6의 누적%를 나타내는 누적도를 살펴보면, 누적10%, 50%에서 최대입자크기를 나타내는 d(0.1), d(0.5)는 0.5 μm이하의 차이를 보였으나 누적90%에서 d(0.9)는 20 μm이상 확대 되는 것으로 나타났다. 특히, 공급량 18~24 kg/h에서 분급결과 초미립자의 입도범위 1~50 μm에 90%이상 누적되었으나 30 kg/h에서는 미분말 입도범위 74 μm에 90%이상 누적되는 것을 알 수 있었다. Fig. 7은 입자들의 분포%를

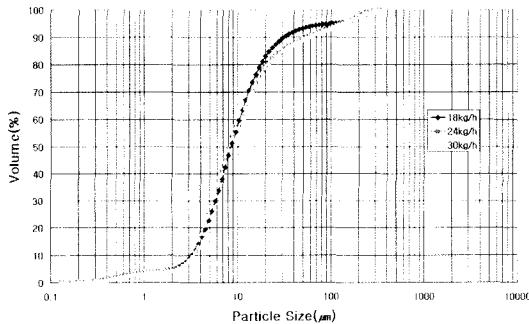


Fig. 6. Accumulation chart in the 80 m/s circumferential velocity of impeller.

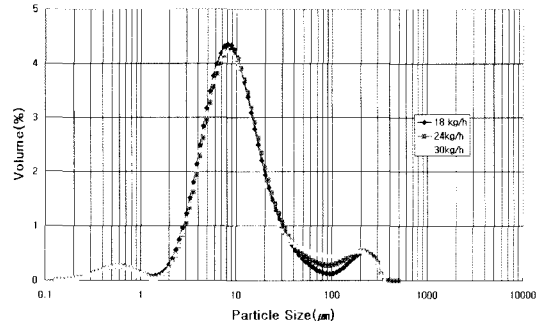


Fig. 7. Distribution chart in the 80 m/s circumferential velocity of impeller.

나타내는 분포도로서 약 10%미만의 입자가 74~500 μm범위에 분포되어 있음을 알 수 있는데 이 결과는 조정된 메일을 동일한 조건에서 분급 후 입도 분석한 결과 74~500 μm범위에 약 1%가 분포됨을 확인함으로써 메일겉질의 영향으로 생긴 결과임을 알 수 있었다.

결과적으로 선속도 80 m/s에서는 Table 3에서처럼 공급량의 증가로 인하여 최대입자크기가 커지고 생산수율이 감소되는 결과를 나타냈다. 그러므로 미분말의 최대생산수율을 위해서는 18 kg/h이 적절하고 생산량을 고려해서는 30 kg/h을 선정하면 될 것으로 판단된다.

2. 임펠러의 선속도 90 m/s, 공급량 18 kg/h, 24 kg/h, 30 kg/h

Fig. 8에서의 누적도를 살펴보면 d(0.1), d(0.5)에서는 0.5 μm이하의 차이를 보였으나 d(0.9)에서는 공급량이 18~24 kg/h로 증가함으로써 최대입자크기의 차이가 약 7 μm로 나타났고 24~30 kg/h범위에서는 약 3 μm의 차이를 보였다. 특히, 공급량18~30

Table 3. Particle distribution in the 80 m/s circumferential velocity of impeller

| | Circumferential velocity 80 m/s of impeller | | |
|-------------------------------------|---|---------|---------|
| | 18 kg/h | 24 kg/h | 30 kg/h |
| d _(0.1) μm | 3.2 | 3.45 | 3.4 |
| d _(0.5) μm | 8.5 | 9.2 | 8.9 |
| d _(0.9) μm | 31.4 | 40.4 | 55.6 |
| Yield rate of ultra fine powder (%) | 93 | 91 | 89 |
| Yield rate of fine powder (%) | 94 | 93 | 91 |

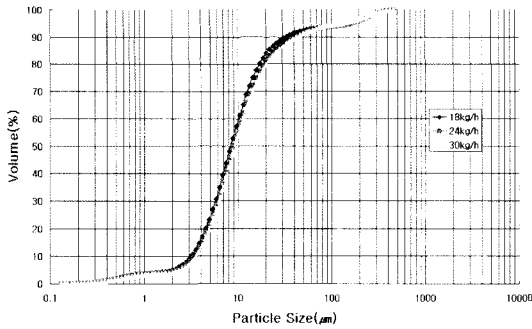


Fig. 8. Accumulation chart in the 90 m/s circumferential velocity of impeller.

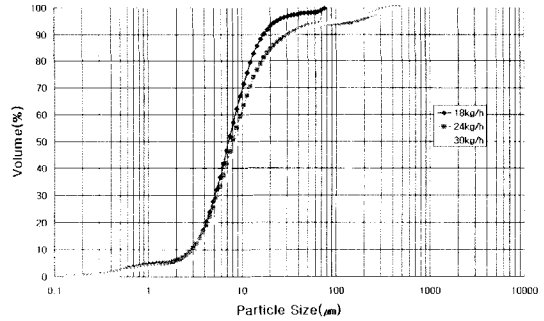


Fig. 10. Accumulation chart in the 100 m/s circumferential velocity of impeller.

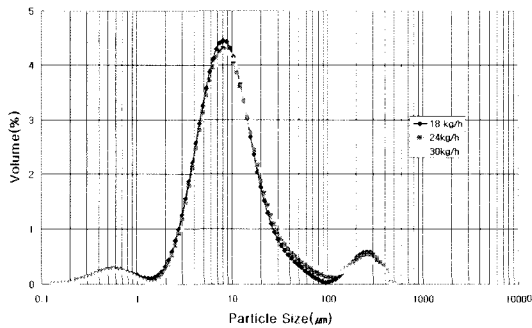


Fig. 9. Distribution chart in the 90 m/s circumferential velocity of impeller.

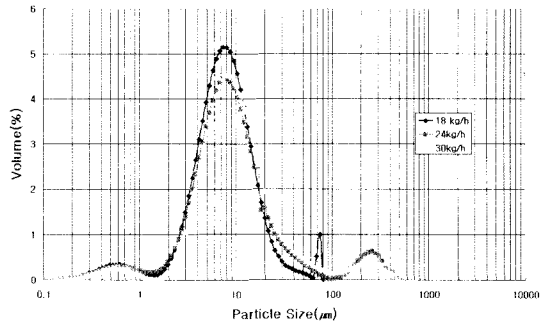


Fig. 11. Distribution chart in the 100 m/s circumferential velocity of impeller.

kg/h의 전구간이 초미립분말 범위 1~50 μm에 90% 이상 누적되어 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 9에서의 분포도를 살펴보면 약 7%미만의 입자가 74~500 μm범위에 분포되어 있음을 알 수 있는데 이것은 도정메밀과의 비교를 통해 약 6%미만의 껍질입자가 미분말화 되지 않았다는 것을 알 수 있었다.

결과적으로 Table 4에서 볼 수 있듯이 미분말의 수율은 공급량의 증가로 큰 변화가 없으므로 생산

수율과 생산량을 고려할 때 공급량 30 kg/h이 적당하다고 판단된다.

Table 4. Particle distribution in the 90 m/s circumferential velocity of impeller

| | Circumferential velocity 90 m/s of impeller | | |
|-------------------------------------|---|---------|---------|
| | 18 kg/h | 24 kg/h | 30 kg/h |
| $d_{(0.1)}$ μm | 3.1 | 3.3 | 3.6 |
| $d_{(0.5)}$ μm | 8.3 | 8.7 | 9.3 |
| $d_{(0.9)}$ μm | 31.2 | 38.3 | 41.5 |
| Yield rate of ultra fine powder (%) | 92.5 | 91.5 | 91 |
| Yield rate of ultra fine powder (%) | 93 | 93 | 93 |

3. 임펠러의 선속도 100 m/s, 공급량 18 kg/h, 24 kg/h, 30 kg/h

Fig. 10에서의 누적도를 살펴보면 공급량의 증가에 따라 $d_{(0.1)}$, $d_{(0.5)}$ 에서는 약 2 μm이하의 최대입자크기차이를 나타냈다. $d_{(0.9)}$ 에서는 공급량이 18~24 kg/h로 증가함으로써 최대입자크기가 약 14 μm까지 증가됨을 나타냈고 24~30 kg/h범위에서는 약 3 μm의 증가를 보였다. 특히, 공급량 18 kg/h의 구간에서는 초미립분말 범위에 약 98%가 누적되었고 24~30 kg/h구간에서는 그 양이 92%로 크게 줄어드는 것을 알 수 있었다. Fig. 11의 분포도에서는 전체적으로 약 6%미만의 입자가 74~500 μm범위에 분포되어 있음을 알 수 있었다. 이것은 약 5%미만의 껍질입자가 미분말화 되지 않고 남아 있다는 것을 의미한다.

결과적으로 선속도 100 m/s구간에서는 Table 5에서처럼 공급량 18 kg/h에서 미분말 생산수율이 98%로 최대였고, 30 kg/h에서 최대생산량을 나타냈다.

Table 5. Particle distribution in the 100 m/s circumferential velocity of impeller

| | Circumferential velocity 100 m/s of impeller | | |
|------------------------------------|--|---------|---------|
| | 18 kg/h | 24 kg/h | 30 kg/h |
| $d_{(0.1)} \mu\text{m}$ | 2.9 | 2.9 | 3.5 |
| $d_{(0.5)} \mu\text{m}$ | 7.2 | 7.9 | 8.8 |
| $d_{(0.9)} \mu\text{m}$ | 16.7 | 30.8 | 33.5 |
| Yield rate of ultra fine powder(%) | 98 | 93 | 93 |
| Yield rate of fine powder (%) | 98.5 | 94 | 94 |

분쇄조건에 따르는 비표면적의 변화

본 연구에서 실험한 메밀에 대한 분쇄 시 원료 공급량, 분쇄 선속도에 따른 비표면적(specific surface area)의 값을 Table 6에 나타내었고, 메밀에 대한 분급 특성 분석은 SAS 프로그램을 사용하여 분석하여 Table 7에 나타내었다.

1. 분쇄조건이 비표면적에 미치는 영향

본 연구에서는 메밀을 이용하여 초 미분쇄 시 원

Table 6. Experimental data of various variables for ultra-fine fraction of buckwheat

| Exp. No | Specific Surface Area(m ² /g) |
|---------|--|
| 1 | 1.32 |
| 2 | 1.34 |
| 3 | 1.56 |
| 4 | 1.24 |
| 5 | 1.3 |
| 6 | 1.42 |
| 7 | 1.27 |
| 8 | 1.21 |
| 9 | 1.26 |

Table 7. Analysis of variance showing effects of treatment variables as linear or quadratic terms and interaction effects on response variables of buckwheat

| Regression | Specific Surface Area(m ² /g) | | | |
|-------------|--|------------------|----------------|--------|
| | DF | SS ¹⁾ | R ² | Pr>F |
| Linear | 2 | 0.066 | 0.716 | 0.0094 |
| Quadratic | 2 | 0.008 | 0.083 | 0.1532 |
| Cross | 1 | 0.016 | 0.168 | 0.0300 |
| Total Model | 5 | 0.090 | 0.966 | 0.0200 |
| $X_1^{2)}$ | 3 | 0.054 | - | 0.0209 |
| $X_2^{3)}$ | 3 | 0.051 | - | 0.0226 |

SS¹⁾: sum of squares of residue

$X_1^{2)}$: feed rate(kg/h)

$X_2^{3)}$: circumferential (m/s)

료공급량과 분쇄 선속도를 변화시켜 미분쇄 시 비표면적에 미치는 영향을 Table 6의 결과를 바탕으로 SAS 프로그램을 사용하여 분석하여 Table 7에 나타내었다.

결정계수 (R^2)는 가정된 모형이 자료에 얼마나 적합 되는 지를 수량화한 통계량이다. 비표면적에서의 결정계수(R^2)는 0.966의 매우 높은 수준을 보였는데, 설정한 실험 조건이 높은 수준을 보여 자료에 잘 적합 됨을 확인 할 수 있었다. 가정된 모형(total model)에서 유의 확률(Pr>F)값은 0.02가 나왔는데, 반응 모형이 Pr<0.05이므로 통계적으로 유의하다고 분석할 수 있었다.

비표면적에 영향을 미치는 요인인 원료 공급량(X_1)과 분쇄 선속도(X_2)는 유의 확률(Pr>F)값이 각각 0.0209, 0.0266이 나와 가정된 반응 모형이 잘 적합 된다고 말할 수 있다. 즉 원료 공급량과 분쇄 선속도의 값들이 P<0.05로 가정된 반응 모형이 통계적으로 유의하다고 설명할 수 있다.

Table 8은 분쇄조건인 원료 공급량과 분쇄 선속도 변화 시 비표면적에 대한 이차 모형을 회귀식으로 나타내었다. 여기서 분쇄 시 비표면적에 큰 영향을 미치는 순서는 분쇄 선속도 원료 투입량 순으로 작용하고 있는데 아래의 회귀식에서 분쇄 선속도의 계수 값이 -0.079, 원료 투입량의 계수 값이 0.072가 나왔다. 절대 값을 비교하였을 때 분쇄 선속도의 계수 값이 원료 공급량의 계수 값 보다 더 크므로 비표면적은 분쇄 선속도가 더 큰 것으로 확인 할 수 있다.

$$Y=3.836+0.0715X_1-0.0792X_2-0.0002X_1^2-0.001X_1 \times X_2+0.0006X_2^3 \quad (7)$$

메밀을 초미분쇄 시 종속변수인 비표면적에 대한

Table 8. Model equations fitted by multiple regression for dependence system of specific surface area(m²/g)

| | Specific surface area(m ² /g) | Parameter estimate from coded data |
|------------------|--|------------------------------------|
| constant | 3.8356 | 1.2789 |
| $X_1^{1)}$ | 0.0715 | -0.0800 |
| $X_2^{2)}$ | -0.0792 | 0.0683 |
| X_1^2 | 0.0002 | 0.0067 |
| $X_1 \times X_2$ | -0.0010 | -0.0625 |
| X_2^3 | 0.0006 | 0.0617 |

$X_1^{1)}$: feed rate (kg/h)

$X_2^{2)}$: circumferential (m/s)

Table 9. Stationary point from the canonical analysis of response surface for the super fine fraction of buckwheat

| Stationary Point | Eigenvalues | |
|------------------|--------------|--------------|
| | ω_1^2 | ω_2^2 |
| 1.3161 | -0.007460 | 0.075794 |

최적 조건을 예측하기 위하여 정준 분석한 결과를 Table 9에 나타내었으며 정준 형식으로 다음과 같이 표현하였다.

$$y = 1.3161 - 0.00746 \omega_1^2 + 0.075794 \omega_2^2 \quad (8)$$

이 정준 형식에서 두 고유값의 부호가 서로 다르므로, 정상점은 안장점이다. 원료 공급량에 대한 고유값이 -0.00746으로 음수이고, 분쇄 선속도에 대한 고유값이 0.075794로 양수이며, 분쇄 선속도에 대한 고유값이 절대값으로는 원료 공급량에 대한 고유값보다 크다. 현재 찾으려는 최적의 해는 최대 점이므로, 위의 분석에서 분쇄 선속도를 증가시키고 공급량을 감소시키면 최대크기의 비표면적을 구할 수 있을 것을 추정할 수 있다.

메밀을 초미분쇄 시 종속변수인 비표면적에 대한 최적 조건을 예측하기 위하여 능선 분석한 결과를 Table 10에서 보여주고 있다. 능선 분석 결과를 보면, 부호화된 원점으로부터 반경 1의 원주상의 점들 중 원료 공급량이 20.6 kg/h이고, 분쇄 선속도가 98.3 m/s 일 때 최대 비표면적 1.45 m²/g을 얻게 됨을 알 수 있다.

출력 처리된 원료 공급량과 분쇄 선속도의 값들을 보면, 원료 공급량이 적고, 분쇄 선속도를 증가

Table 10. The Ridge analysis of response surface for the ultra-fine fraction of buckwheat

| Coded radius | Estimated response specific surface area(m ² /g) | Uncoded factor values | |
|--------------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| | | X ₁ ⁽¹⁾ | X ₂ ⁽²⁾ |
| 0.0 | 1.28 | 24.00 | 90.00 |
| 0.1 | 1.29 | 23.57 | 90.69 |
| 0.2 | 1.31 | 23.17 | 91.44 |
| 0.3 | 1.32 | 22.80 | 92.24 |
| 0.4 | 1.33 | 22.46 | 93.06 |
| 0.5 | 1.35 | 22.13 | 93.91 |
| 0.6 | 1.37 | 21.81 | 94.77 |
| 0.7 | 1.39 | 21.51 | 95.63 |
| 0.8 | 1.41 | 21.21 | 96.51 |
| 0.9 | 1.43 | 20.92 | 97.39 |
| 1.0 | 1.45 | 20.63 | 98.28 |

X₁⁽¹⁾: 원료 공급량 (kg/h)

X₂⁽²⁾: 분쇄 선속도 (m/s)

시킬 때 최대의 비표면적 값을 얻을 수 있음을 추정할 수 있다.

원료 공급량과 분쇄 선속도 변화에 따른 비표면적 변화를 반응표면(response surface) 및 등고선(contour) 곡선으로 Fig. 12에 나타내었다. 곡선에서 원료공급량을 30 kg/h에서 18 kg/h로 감소 시 비표면적이 완만하게 증가하는 경향을 나타내고 있으나 분쇄 선속도를 80 m/s에서 100 m/s로 증가 시 비표면적이 매우 높게 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 원료 공급량의 감소와 분쇄 선속도의 증가로 인해 초미립자의 분급효율이 원활해짐으로서 비표면적이 증가 즉, 입자가 미립화되는 경향을 볼 수 있었다.

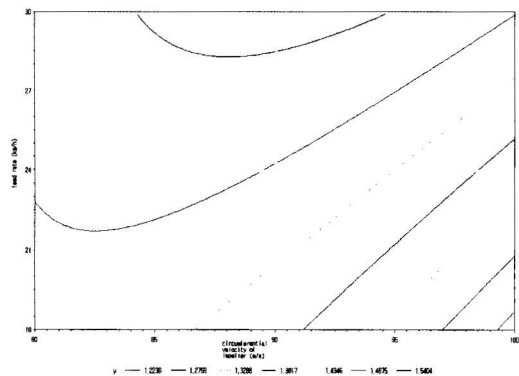
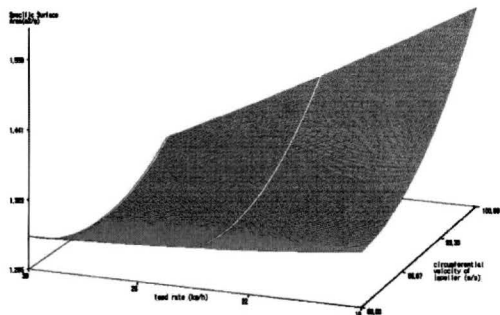


Fig. 12. Response surfaces and contour plots of centrifugal velocity of impeller and feed rate on the Specific Surface Area for buckwheat super fine fraction.

요 약

본 연구에서는 기존의 생산공정으로 분쇄가 어려운 42% 정도의 껍질로 구성된 메밀의 미분화를 위하여 강원대학교와 한국에너지기술에서 산학협동으로 공동 개발한 분쇄와 분급이 동시에 일어나는 Turbo mill을 이용하여 미분말화와 초미분말화 그리고 생산량과 생산수율에 관하여 연구하였다. 연구 결과 임펠러선속도 100 m/s와 공급량 18 kg/h에서 1~50 μm 이하의 초미분말범위에 분포하는 제품을 98%이상 생산할 수 있었다. 입도분석 데이터의 비표면적 값들을 반응표면분석법을 이용하여 최적의 임펠러선속도와 공급량지점을 예측하였다.

본 연구의 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 임펠러의 선속도 80 m/s에서는 공급량이 18~30 kg/h로 증가할수록 최대입자크기가 커지고 미분말의 생산수율이 94~91%로 감소되는 결과를 나타냈다. 그러나 생산수율의 차이보다 공급량의 차이가 커서 미분말의 양적인 생산을 취할 때는 공급량 30 kg/h가 적당한 것으로 나타났다.

2. 임펠러의 선속도 90 m/s에서는 미분말(1~74 μm)의 생산수율은 공급량의 증가로 변화가 없었으므로 생산량을 고려할 때 30 kg/h가 적당한 것으로 나타났다.

3. 임펠러의 선속도 100 m/s구간에서는 공급량 18 kg/h에서 초미립분말이 98%이상으로서 전체실험에서 최대의 생산수율을 나타냈다. 공급량 30 kg/h에서 미분말의 생산수율은 94%로서 임펠러의 선속도 90 m/s와 비교했을 때 약 1%정도로 큰 차이를 보

이지 않았다.

4. 반응표면분석법을 이용하여 공급량의 감소와 임펠러의 선속도 증가로 인해 분급효율이 원활해짐으로서 비표면적이 증가됨을 확인할 수 있었고, 임펠러선속도와 공급량에 관한 데이터화된 값들을 얻음으로서 기계운전을 위한 최적의 지점을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- 강석호. 1995. 분체공학. 회중당, 203-295
- 강위수, 이강열. 2003. 생물산업용 초저온·초미분 Turbo-분쇄기 산업화 기술개발에 관한 연구 최종보고서
- 박동준. 2002. 나노기술과 식품산업. 식품과학과 산업 **35(4)**: 35-40
- Prasher, C. L. 1987. *Crushing and Grinding Process Handbook*. John Wiley and Sons Limited, 1-45
- Galk, J., W. Peukert, and J. Krahnert, 1999. Industrial classification in a new impeller wheel classifier, *Powder Technology* **105**: 186-189
- Morimoto, H and T. Shakouchi. 2003. Classification of ultra fine powder by a new pneumatic type classifier, *Powder Technology* **131**: 71-79
- Galk, J. and Peukert, W. 1998. Production of narrow size distribution in air classifier mills(ACM), 9th European Symposium on Comminution, Albi
- Galk, J. and W. Peukert. 1996. A cyclone classifier for inline-and offline classification, *Powder Handling and Processing* **8(1)**: 55-58
- Worthen, R. A. 2001. Centrifugal air classification of fine particles using rotating disks, PhD Thesis, The University of Florida, UMI Microform 3025130