

포도의 분쇄 특성 분석 및 모형 개발

조용진 · 홍지영 · 차재윤 · 김종태 · 김철진
한국식품개발연구원

Analysis and Modeling of Characteristics of Size Reduction of Grapes

Yong-Jin Cho, Ji-Young Hong, Jae Yoon Cha, Chong-Tai Kim and Chul-Jin Kim

Korea Food Research Institute, Songnam 463-746, Korea

Abstract

Even though size reduction is of an important unit operation in utilization of bioresources, its useful data on Korean agricultural products are limited. The purpose of this study was to analyze the characteristics of size reduction of grape skin, seed and fruit stem and model an operation of size reduction. Among three components, the size reduction ratio of fruit stem was largest and followed by those of seed and skin. They increased with charge rate in a crusher. When Kick's constants for grape skin, seed and fruit stem were evaluated, the constant of fruit stem was largest and followed by those of skin and seed in the order. For Rittinger's constants, the constant of seed was larger than that of skin while that of fruit stem was largest among three grape components. The models of Kick's and Rittinger's constants were described in the forms of exponential functions with a parameter of charge rate reflected by the square root.

Key words: grape, size reduction ratio, Kick's constant, Rittinger's constant

서 론

분쇄는 농산물과 생물자원을 활용함에 있어 필수적으로 요구되는 단위조작 중의 하나이다. 우리나라의 산지 가공공장의 실태 조사에서도 분쇄 작업은 가장 빈도수가 많은 단위조작의 하나로 조사된 바 있다. 그럼에도 불구하고 분쇄 공정의 설계는 거의 경험에 의존하고 있으며, 국내 식품기계산업의 취약한 구조로 인하여 경험마저도 부족한 형편에서 현장에서는 많은 어려움을 호소하고 있는 실정이다(조용진과 곽창근, 2000).

분쇄 작업에서는 목표로 하는 입도를 얻기 위해 소요되는 에너지가 우선 분석되어야 한다. 이에 관한 이론적 토대는 이미 오래 전에 확립되어 있다. 즉, 분쇄에 소요되는 에너지는 Kick의 법칙, Rittinger의 법칙, Bond의 법칙 등에 의해 해석되고 있다(Brennan

et al., 1976; Fellows, 1988). 이러한 이론적 바탕이 마련되어 있음에도 불구하고 분쇄 공정에 대한 설계시 제대로 활용되고 있지 못한 것은 각 원료에 대한 분쇄상수(Kick의 상수, Rittinger의 상수, Bond의 상수 등)가 충분히 구명되어 있지 않기 때문인 것으로 파악되고 있다(조용진과 곽창근, 2000).

최근, 생물자원으로부터 유용한 기능성 소재를 탐색하고 대량생산하는 기술에 대한 관심은 국내외적으로 고조되어 있다. 그 중에서도 천연물 자원에서 유용 소재를 추출하는 분야는 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 여기서 추출 작업이 효과적으로 이루어지기 위해서는 추출 과정 못지 않게 원료 조제 즉, 건조, 분쇄 등의 작업이 잘 뒷받침되어야 한다. 많은 경우 추출 공정에서 사용되는 원료의 형태가 분말이기 때문이다. 그런데 원료 분말의 입도는 추출 효과에 매우 큰 영향을 미치게 되는데, 원료의 입도가 작을수록 추출 성능에 유리하게 작용하게 되나 지나치게 작은 입도는 용매의 순환에 저항을 주게 되어 오히려 불리하게 작용할 수 있다(Charm, 1971). 결국, 추출용 원료의 입도와 분쇄에 소요되는 에너지에 대한 고찰은 추출물 제조의 생산성의

Corresponding author: Yong-Jin Cho, Principal Researcher, Korea Food Research Institute, San 46-1, Baekhyun-dong, Songnam 463-746, Republic of Korea.
Phone: 031-780-9136, Fax: 031-780-9228
E-mail: yjcho@kfri.re.kr

평가와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 최근 관심의 대상이 되고 있는 포도의 폐놀성 추출물을 생산하는 공정 개발과 관련하여 포도의 분쇄 특성을 파악하고자 하였다. 특히, 포도에는 스틸베노이드계 물질인 레스베라트롤이 많이 함유되어 있으며, 부위별로 함유량이 큰 차이를 보이고 있음이 보고된 바 있어(조용진 등, 2003), 포도의 부위별로 자원을 활용하고자 할 때 그에 따른 분쇄 특성의 이해가 요구되는 바, 포도의 껍질, 씨 및 송이까지의 분쇄 특성을 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

공시재료

실험에 사용한 포도는 2002년도에 생산된 캠벨(영동산)과 거봉(천안산)으로서 서울 가락동 농수산물시장에서 구입하였다.

분쇄

포도는 껍질, 씨 및 송이까지의 부위별로 분리하여 동결건조한 후 분쇄하였다. 분쇄 작업에는 충격식인 분석용 분쇄기(Samsung MC-903)를 사용하였다. 분쇄기의 정격 전력과 용량은 각각 190 W와 900 mL이다. 포도의 분쇄 특성을 분석하기 위해 적용된 절차는 다음과 같다. 먼저 거칠게 분쇄하여 초기 입도를 임의로 설정하였고, 충진율을 달리하여 90초 동안 분쇄된 분말의 입도를 분석하였다.

입도 분석

포도의 부위별로 분쇄 작업을 한 후, ASAE Standard S319.2(ASAE, 1994)에 근거하여 체 분석을 실시하고, 그 자료를 이용하여 입도를 분석하였다. Table 1은 표준 체 목록을 나타낸 것이며, 식 (1)과 식 (2)는 각각 분말의 평균 입도와 표준편차를 구하는 방법을 나타낸 것이다(ASAE, 1994).

$$d_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum (w_i \log \bar{d}_i)}{\sum w_i} \right] \quad (1)$$

$$s_{gw} = \log^{-1} \left[\frac{\sum w_i (\log \bar{d}_i - \log d_{gw})^2}{\sum w_i} \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서 d_i : i 번째 체의 명목 체눈의 크기(mm)

Table 1. Standards sieves for determining fineness of pulverized materials

US standards sieve no.	Tyler designation	Nominal sieve opening	
		mm	inch
4	4	4.76	0.187
6	6	3.36	0.132
8	8	2.38	0.0937
12	10	1.68	0.0661
16	14	1.19	0.0469
20	20	0.841	0.0331
30	28	0.595	0.0234
40	35	0.420	0.0165
50	48	0.297	0.0117
70	65	0.210	0.0083
100	100	0.149	0.0059
140	150	0.105	0.0041
200	200	0.074	0.0029
270	270	0.053	0.0021
Pan			

d_{i+1} : $i+1$ 번째 체의 명목 체눈의 크기(mm)

d_{gw} : 시료의 기하평균 직경(mm)

d_i : i 번째 체에 있는 입자의 기하평균 직경(mm) 즉, $(d_i \times d_{i+1})^{1/2}$

S_{gw} : 시료의 기하 표준편차

w_i : i 번째 체에 있는 질량(g)

분쇄비

분쇄 특성을 파악하는 하나의 방법으로서 분쇄비를 분석하였다. 분쇄비(size reduction ratio)는 초기 입도에 대비한 분쇄 후 입도의 비를 나타내며, 식 (3)으로 표시하였다. 여기서 초기 입도는 거칠게 예비분쇄를 한 시료의 입도를 의미한다.

$$\text{Size reduction ratio} = \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

여기서 L_1 : 초기의 평균 입도

L_2 : 분쇄후 평균 입도

분쇄상수

분쇄 특성을 파악하는 또다른 방법으로서 분쇄상수를 분석하였다. 분쇄상수는 Kick의 상수와 Rittinger의 상수를 산출하여 비교하였다(Charm, 1971; Fellows, 1988). 식 (4)와 식 (5)는 각각의 Kick의 법칙과 Rittinger의 법칙을 나타낸 것이다.

$$E = K_k \ln \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \quad (4)$$

여기서 E: 단위 무게당 분쇄 에너지
 K_R : Kick의 상수
 L_1 : 초기의 평균 입도
 L_2 : 분쇄후 평균 입도

$$\left(\frac{L_1}{L_2}\right): \text{분쇄비}$$

$$E=K_R\left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1}\right) \quad (5)$$

여기서 E: 단위 무게당 분쇄 에너지
 K_R : Rittinger의 상수
 L_1 : 초기의 평균 입도
 L_2 : 분쇄후 평균 입도

결과 및 고찰

포도의 분쇄비

Fig. 1은 분쇄기의 충전율에 따른 포도의 껍질, 씨 및 송이가지의 분쇄비를 나타낸 것이다. 분쇄비는 분쇄후 평균 입도에 대한 분쇄전의 평균 입도의 비를 나타낸 것으로서 분쇄 효과를 나타내는 주요 척도 중의 하나이다. 포도의 부위별 분쇄비를 분석한 결과, 포도 송이가지의 분쇄비가 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과를 볼 때, 포도의 송이가지는 포도의 껍질이나 씨보다 분쇄에 의한 입도 변화가 더 큼을 알 수 있다. 거봉 포도의 송이가지를 분쇄기 용적 대비 중량 즉, 충전율을 0.05 kg/L로 하여 원료를 투입하였을 때 분쇄비는 1.378로 나타났다. 반면에 캠벨 포도의 껍질과 씨의 경우 동일한 충전

율에서 분쇄비는 각각 1.107 및 1.128로 나타나 송이가지보다 작은 값을 보였다. 그런데, 포도 껍질과 씨의 경우, 충전율이 0.05 이하에서는 씨의 분쇄비가 껍질보다 크게 나타나, 이러한 충전율 범위에서는 씨의 분쇄 효과가 껍질보다 큼을 알 수 있다. 그런데 충전율이 0.1이 되었을 때는 오히려 껍질의 분쇄비가 씨보다 크게 나타났다. 종합적으로 볼 때, 포도의 3가지 부위 모두 충전율이 증가함에 따라 분쇄비가 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 분쇄기에 원료를 적합하게 충전해야 양호한 분쇄 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

포도의 분쇄상수

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 Kick의 분쇄법칙과 Rittinger의 분쇄법칙에서의 분쇄상수를 구하여 나타낸 것이다. 일반적으로 Kick의 법칙은 거친 분쇄를 잘 묘사하고, Rittinger의 법칙은 미분쇄를 잘 묘사하는 것으로 알려져 있다(Charm, 1971; Fellows, 1988). 포도의 경우, 부위별 원료를 수백 μm 의 입도로 분쇄하였을 때 나타나는 분쇄상수를 보면, Kick의 분쇄상수와 Rittinger의 분쇄상수에 대한 경향 비교에서 껍질과 씨 사이에는 큰 차이를 보였으나 송이가지는 유사한 것으로 나타났다. 충전율이 0.01~0.05 kg/L의 범위에서, 껍질의 Kick 분쇄상수는 3.36~38.20 kJ/g으로 나타나 씨의 2.84~24.09 kJ/g보다 크게 나타났으나, 충전율이 0.11 kg/L에서는 씨의 Kick 분쇄상수가 1.13 kJ/g으로서 껍질의 0.81 kJ/g보다 오히려 크게 나타났다. 반면에 Rittinger의 분쇄상수는

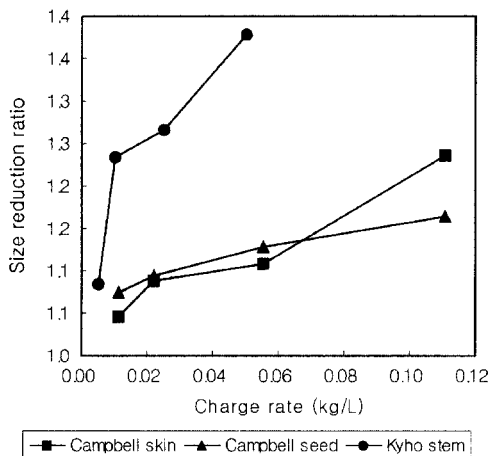


Fig. 1. Size reduction ratio with respect to charge rate for different components of grapes.

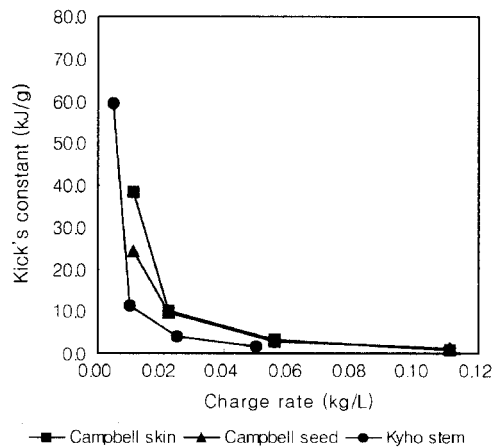


Fig. 2. Kick's constant versus charge rate in pulverization of different components of grapes.

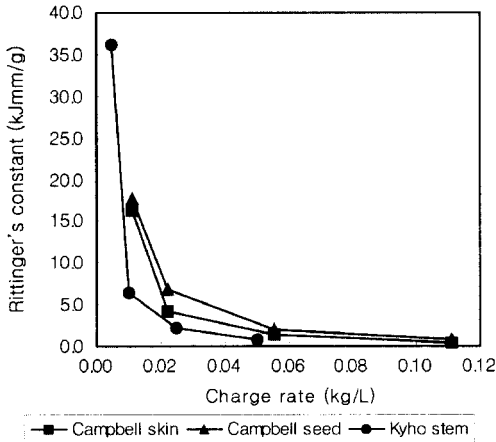


Fig. 3. Rittinger's constant versus charge rate in pulverization of different components of grapes.

충진율 0.01~0.11 kg/L의 범위에서 씨의 경우 0.79 ~ 17.65 kJmm/g으로 나타났고, 껍질의 경우 0.31 ~ 16.21 kJmm/g으로 나타났다. 이와 같이 포도의 껍질 및 씨의 분쇄상수는 적절한 분쇄법칙에 따라 상이한 특징을 보였다. 한편, 전체적으로 두 유형의 분쇄상수 모두 분쇄기의 충진율이 증가할수록 분쇄상수는 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 여기서 분쇄상수가 작을 경우 분쇄에 소요되는 에너지도 비례하여 작게 산출되는 점을 고려한다면 분쇄기의 충진율을 적합하게 조절함으로써 분쇄를 보다 효과적으로 수행할 수 있음을 알 수 있다.

분쇄 모형

여기서는 포도의 부위별 분쇄특성을 예측할 수 있는 모형을 제시하고자 한 바, 포도의 부위별로 Kick의 분쇄법칙과 Rittinger의 분쇄법칙을 각각 적용하여 충진율에 따른 분쇄상수를 수학적 모형으로 나타내고 각 모형을 평가하였다. 앞에서 분석한 결과에 근거하여, Kick의 분쇄상수와 Rittinger의 분쇄상수를 충진율의 증가에 따라 지수함수적으로 감소하는 모형으로 설정하였으며, 충진율의 영향을 1차승, 평방근 및 제곱승으로 반영하여 평가한 결과를 Table 2~7에 나타내었다. 표에 나타낸 모든 모형은 5% 유의수준에서 모두 유의한 모형으로 평가되었으며, 포도의 껍질, 씨 및 송이가지에 대한 충진율의 영향을 평방근으로 반영한 모형이 가장 양호한 것으로 나타났다. 한편, 모형에 대한 결정계수 측면에서 포도의 껍질, 씨 및 송이가지에 대한 Kick의 모형

Table 2. Models of Kick's constant with charge rate for Campbell grape skin

Model	Coefficient of determination
$K_K=33.02e^{-35.18q}$	0.927
$K_K=155.40e^{-16.07\sqrt{q}}$	0.975
$K_K=16.05e^{-258.80q^2}$	0.809

Notes) K_K : Kick's constant (kJ/g)
q: charge rate (kg/L)

Table 3. Models of Kick's constant with charge rate for Campbell grape seed

Model	Coefficient of determination
$K_K=21.85e^{-28.70q}$	0.916
$K_K=78.73e^{-13.19\sqrt{q}}$	0.976
$K_K=11.99e^{-208.06q^2}$	0.777

Notes) K_K : Kick's constant (kJ/g)
q: charge rate (kg/L)

Table 4. Models of Kick's constant with charge rate for Kyho grape stem

Model	Coefficient of determination
$K_K=39.77e^{-71.37q}$	0.840
$K_K=173.99e^{-22.32\sqrt{q}}$	0.919
$K_K=39.77e^{-71.27q^2}$	0.840

Notes) K_K : Kick's constant (kJ/g)
q: charge rate (kg/L)

Table 5. Models of Rittinger's constant with charge rate for Campbell grape skin

Model	Coefficient of determination
$K_R=14.11e^{-35.98q}$	0.930
$K_R=68.51e^{-16.42\sqrt{q}}$	0.976
$K_R=6.76e^{-265.11q^2}$	0.814

Notes) K_R : Rittinger's constant (kJ · mm/g)
q: charge rate (kg/L)

과 Rittinger의 모형 사이에는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

Table 8은 본 연구에서 개발한 포도의 각 부위별 분쇄모형의 예측 능력을 비교한 예를 나타낸 것이다. 포도의 껍질, 씨 및 송이가지를 분말 원료로 제조하였을 때 실제로 얻은 평균 입도를 2종의 분쇄 모형과 비교하였을 때 예측 입도가 측정 입도와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 수분함량이 7.7%인 캠벨 포도의 껍질을 분쇄하였을 때 평균 입도가 0.351 mm이었으며, 예측 입도는 Kick의 모형에서 0.346 mm, Rittinger의 모형에서 0.347 mm로 산출되었다.

Table 6. Models of Rittinger's constant with charge rate for Campbell grape seed

Model	Coefficient of determination
$K_R=16.02e^{-29.09q}$	0.917
$K_R=58.67e^{-13.37\sqrt{q}}$	0.977
$K_R=8.71e^{-211.00q^2}$	0.778

Notes) K_R : Rittinger's constant (kJ · mm/g)
q: charge rate (kg/L)

Table 7. Models of Rittinger's constant with charge rate for Kyho grape stem

Model	Coefficient of determination
$K_R=23.81e^{-73.64q}$	0.839
$K_R=109.18e^{-23.03\sqrt{q}}$	0.918
$K_R=11.74e^{-1168.76q^2}$	0.692

Notes) K_R : Rittinger's constant (kJ · mm/g)
q: charge rate (kg/L)

Table 8. Measured and predicted fineness of pulverized grape components

Grape component	Moisture content (%)	Measured diameter (mm) (standard deviation)	Predicted diameter ¹⁾ (mm)	
			by Kick's model	by Rittinger's model
Campbel skin	7.7	0.351 ²⁾ (2.50)	0.346	0.347
Campbel seed	7.6	0.652 ²⁾ (2.03)	0.639	0.640
Kyho stem	9.8	0.460 ³⁾ (2.39)	0.424	0.429

Notes) ¹⁾The diameters were predicted by using $K=ae^{-b\sqrt{q}}$.

²⁾Charge rate is 0.11 kg/L.

³⁾Charge rate is 0.05 kg/L.

캠벨 씨의 경우, 측정 입도는 0.652 mm, Kick의 모형에 의한 예측 입도는 0.639 mm, Rittinger 모형에 의한 예측 입도는 0.640 mm로 산출되었다. 거봉 포도의 송이가지도 경우에서도 측정 입도와 예측 입도는 서로 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다.

요 약

식품 및 생물재료의 분쇄 작업은 가장 흔히 사용되는 단위조작 중의 하나임에도 불구하고 국내산 농산물의 자원화와 관련하여 공정설계를 위해 활용할 수 있는 구체적 자료는 제대로 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 포도의 껍질, 씨 및 송이가지의 분쇄특성을 분석하고, 그것을 반영한 분쇄모형을 제시하고자 하였다. 분쇄비는 포도의 송이가지, 씨, 그리고 껍질의 순으로 크게 나타났으며, 분쇄기의 충진율 증가에 따라 동반하여 분쇄비는 증가하였다. 포도의 껍질, 씨 및 송이가지에 대한 분쇄상수를 비교한 결과, Kick의 분쇄상수에서는 동일한 충진율에서 송이가지, 껍질, 씨의 순으로 크게 나타났으나, Rittinger의 분쇄상수에서는 송이가지, 씨, 껍질의 순으로 크게 나타났다. 포도의 껍질, 씨 및 송이가지 부위에 대한 분쇄상수 모형을 지수함수 모

형으로 설정하였을 때 충진율의 영향을 평방근으로 반영한 모형이 가장 양호한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 연구 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

문 헌

- 조용진, 박창근. 2000. 산지 농산물 가공을 위한 농촌형 공장의 실태. 한국농업기계학회 학술회의 논문집 **5**(2): 191-200
- 조용진, 김재은, 전향숙, 김종태, 김성수, 김철진. 2003. 국내산 포도의 부위별 레스베라트롤 함량. 한국식품과학회지 **35**(2): 306-308
- ASAE. 1994. ASAE Standards. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, USA
- Brennan, J.G., J.R. Butters, N.D. Cowell and A.E.V. Lilly. 1976. Food Engineering Operations. Applied Science Publishers, London, UK
- Charm, S.E. 1971. The Fundamentals of Food Engineering. AVI Publishing Company, Westport, USA
- Fellows, P. 1988. Food Processing Technology: Principles and Practice. Ellis Horwood, Chichester, England