

세라믹 롤러와 금속 롤러의 쌀 분쇄 소요에너지 분석

An Analysis for Grinding Energy in Rice Milling using Ceramic and Metal Rollers

강위수*	강화석*	이귀현*	양승기*	목효균*
정희원	정희원	정희원	정희원	정희원
W.S.Kang	W.S.Kang	G.H.Lee	S.K.Yang	H.K.Mok

1. 서론

식품산업분야에서 곡물분쇄는 일반적으로 중간 미분쇄기인 해머밀과 롤러밀이 대부분 사용되고 있다. 분쇄는 비교적 큰 동력이 소요되는 작업으로서 소요동력의 크기는 분쇄할 원료와 분쇄생성물의 크기 및 처리량, 분쇄방식, 분쇄기의 종류, 원료의 물리적 특성 등 여러 가지 성질에 의하여 크게 좌우된다. (1, 2)

해머밀은 충격력에 의하여 분쇄하는 다목적 분쇄기로서 섬유질이 많거나 단단하게 굳은 전분, 곡류 등의 원료를 다목적으로 분쇄하는데 사용되고 있으며, 구조가 간단하고 공회전 시에도 분쇄기 손상이 적어 보수비를 최소화할 수 있는 장점을 가졌으나, 해머밀의 분쇄 소요 에너지가 롤러 밀 보다 약 2배정도 더 소요되고, (1, 6, 7) 분쇄시 열이 많이 발생하는데, 쌀 분쇄시는 75℃, 코코아 분쇄시는 60~80℃까지 가열됨으로서 영양분 파괴의 원인이 될 수 있고, (8) 먼지가 많이 발생됨으로써 먼지 제거기가 필요하고, 소음이 커서 분쇄 작업 환경이 열악한 것이 단점이다. (6, 7)

우리 나라 방앗간에서 대부분 사용하고 있는 롤러밀은 압축력과 전단력을 이용함으로 분쇄소요에너지가 작고, 쌀 분쇄시 열이 30℃로 적게 발생되어 식품의 영양분 파괴를 적게 할 수 있으며, (8) 분쇄 생성물의 입자분포의 폭이 좁게되어 균일하게 분쇄할 수 있고, 먼지와 소음이 적게 발생하는 장점이 있다. (1, 2, 6, 7) 그러나 섬유질이 많은 원료를 분쇄시 분쇄효율이 낮고, 주철재 롤러가 마모되어 분쇄 생성물에 쇳가루가 혼입되는 문제점을 갖고 있기 때문에 분쇄물의 중금속 혼입을 억제하거나 근본적으로 혼입을 없앨 수 있는 롤러의 내마모성을 갖는 소재와 생산기술 개발에 관한 연구가 요구되고 있는 실정이다.

분쇄시 소요동력은 원료의 종류, 수분함량, 분쇄생성물의 입도, 투입율, 분쇄기의 작동조건 등에 의하여 영향을 받기 때문에 정확한 소요동력을 결정하는 것은 쉽지 않다. 보리와 같은 섬유질 곡물은 옥수수과 같은 결정성 곡물보다 소요동력이 더 큰 것을 알 수 있으며, 수분함량이 높은 곡물이 낮은 곡물보다 동력을 더 많이 요하는 것을 알 수 있다. (1)

+ 본 연구는 농림기술개발연구비 및 태광식품기계의 참여기업연구비로 수행되었음

* 강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부 농업기계전공

기존의 회주철 롤러 표면의 vickers 경도는 425HV이나 표면에서 2mm 깊이이상에서는 200HV로 감소되어 분쇄시 마모에 의하여 섯가루가 분쇄생성물에 혼입되는 문제점이 야기되고 있는 실정이다.⁽⁹⁾ 그러나 ceramic 소재인 Al₂O₃의 vickers 경도가 2000HV로서 내마모성은 회주철의 경도보다 5배~10배정도 크기 때문에 회주철 롤러보다 내구성이 크며 또한 분쇄시 섯가루의 혼입을 근본적으로 방지할 수 있다, 그러므로 식품 분쇄기 분야는 내마모성이 우수하고 섯가루의 혼입이 방지되는 ceramic 소재를 사용하는 분쇄기계가 지속적으로 연구 개발되어야 할 것이다.

본 연구에서는 세라믹과 금속 롤러밀의 쌀 분쇄시 소요되는 동력을 측정하여 최적의 설계조건을 찾아내고, 기존의 금속롤을 대체할 수 있는 범용 세라믹 롤의 설계 및 제작에 관한 기초 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구는 1차 실험으로 1997년 강원도 철원産 오대 품종으로 춘천농협에서 도정된 백미(품질 인증미)를 공시재료로 택하여 상온(24℃)에서 저장하여 사용하였으며, 재료의 일반 성분 조성은 표 1과 같다.

Table 1. Composition of rice (%)

Water	Crude protein	Crude fat	Ash	Carbohydrate
11.5	7.5	0.6	0.6	79.8

2.2 실험장치

(1) 분쇄기

태광 식품기계에서 제작한 소요동력 3마력(model KMi03HK1)의 세라믹 롤러밀과 금속 롤러밀을 사용하였다. 두 개의 롤은 스퍼기어(spur gear)를 사용하여 속도비를 조절할 수 있도록 제작하였으며, 본 실험에서는 두 롤의 속도비를 2:1로서 실험하였다.

(2) 토오크 변환기

분쇄시 소요되는 소요동력(입력토크)은 토오크 변환기(TP-10KMCB)를 사용하여 측정하였다. 토오크 변환기의 정격용량은 10kgf·m이고, 입력전압은 교류 2Volt를 이용하였다. 토오크 변환기에서 읽혀지는 Data값은 입력토크 값으로 이 값들은 Voltage로 나타나며, Voltage로 읽혀진 Data값들은 아래의 식에 의해서 토크(kgf·m)값으로 변환된다.

$$\text{토크 (Torque)} = 1.666 \times \text{Voltage}$$

(3) 스트레인 증폭기

스트레인 게이지를 사용하여 각종 변형의 측정은 반송파형 스트레인 증폭기(YOKOGAWA

3134-01)를 사용하였다. 출력전압은 교류 2Volt로 설정하였고, 토오크 측정을 위한 Strain Range는 5000×10^{-6} 스트레인으로 설정하였으며, 내장된 Lowpass filter의 Band Limit 설정은 100Hz로 설정하였다. 또한 스트레인 증폭기의 최대감도는 $0.5V/10 \times 10^{-6}$ 스트레인으로 하였다.

(4) 자료수집장치

토오크 변환기와 스트레인 증폭기로부터 받아들여진 Data값의 수집은 자료수집장치(Daqbook/100)를 사용하였으며, 자료수집장치의 분해능은 12bits이고, Range 설정은 Bipolar Mode의 -5~5Volt로 설정하였다.

(5) 쌀의 공급장치

쌀과 분쇄된 쌀가루를 분쇄기에 일정한 속도로 공급하기 위하여 Vibrator(SMF-01S, 신창)를 롤 상부에 설치하였다.

(6) 속도 변환기

Roller의 회전속도가 분쇄소요에너지에 미치는 영향을 분석하기 위하여 속도 변환기(Inverter ; SV015iG-2, LG)를 장착하여 롤의 회전속도를 0~102rpm/min까지 조절할 수 있도록 하였다.

2.3 실험방법

실험용 세라믹 롤러밀과 금속 롤러밀을 설계 및 제작하여 분쇄조건(두 롤러 사이의 간격, 롤의 속도, 롤의 통과횟수 증가)을 변화 시켰을 때 분쇄 소요에너지에 미치는 영향을 측정하기 위하여 아래와 같은 조건에서 실험을 하였다.

공시재료인 쌀은 상온에서 1시간 수침 시킨 후, 수포로 쌀 표면의 물기를 제거한 후 이용하였다. 아래의 표 2에는 분쇄시 소요되는 동력측정을 조사하기 위한 분쇄조건을 나타냈다.

Table 2. Grinding conditions for measurement of grinding energy in rice milling using ceramic and metal rollers

	Roller mill gap (mm)	Roller speed ($R_f : R_s$) (rpm)	Number of milling treatment
Level	0.05		1
	0.13	47.5 : 23.7	2
	0.25	101.6 : 50.8	3
	0.50		

본 실험에서는 분쇄시 두 롤러의 간격을 쌀 직경의 $R/4=0.50$, $R/8=0.25$, $R/16=0.13$, $R/32=0.05$ mm의 4 수준으로 하여 분쇄소요에너지의 특성을 분석하였다.

분쇄시 두 롤러간의 회전 속도비는 R_f (고속 롤) : R_s (저속 롤) = 2 : 1로 고정하였다. 분쇄 속도를 $R_f : R_s = 47.5 : 23.8$, $R_f : R_s = 101.6\text{rpm} : 50.8\text{rpm}$ 의 2 수준으로 분쇄하여 분쇄

속도가 분쇄소요에너지에 미치는 영향을 분석하였다.

두 롤러를 통과한 공시재료인 쌀은 같은 간격, 같은 속도에서 3회 통과 시켜, 각각 통과시 분쇄소요에너지와 분쇄생성물의 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 수행을 위하여 제작된 실험용 세라믹과 금속 두 종류의 롤러밀을 이용하여 두 롤의 간격, 분쇄속도, 통과횟수 등의 분쇄조건에 따른 분쇄 에너지의 특성을 측정하였으며, 그 결과는 표3~표5와 같이 분석되었다.

3.1 두 롤러 사이의 간격증가가 분쇄소요에너지에 미치는 영향

표3, 4, 5는 두 롤러 사이의 간격증가, 속도증가, 분쇄횟수 증가가 롤에 걸리는 분쇄소요에너지에 미치는 영향에 대하여 분석한 결과치이다.

Table 3. Effect for increase of gap between rollers on grinding energy in rice milling using ceramic and metal rollers

Ceramic roller mill		Metal roller mill	
Roller mill gap (mm)	Avg. of Torque (N · m)	Roller mill gap (mm)	Avg. of Torque (N · m)
0.05	0.8119 a	0.05	0.6589 a
0.13	0.5151 b	0.13	0.7251 a
0.25	0.6415 b	0.25	0.6580 a
0.50	0.5126 b	0.50	0.4840 b

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

Table 4. Effect for increase of roller speed on grinding energy in rice milling using ceramic and metal rollers

Ceramic roller mill		Metal roller mill	
Roller speed (R _f : R _s)	Avg. of Torque (N · m)	Roller speed (R _f : R _s)	Avg. of Torque (N · m)
42.4 : 23.7	0.4206 b	42.4 : 23.7	0.3596 b
101.6 : 50.8	0.6809 a	101.6 : 50.8	0.4234 a

* R_f = Fast roller, R_s = Slow roller

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

Table 5. Effect for the number of milling treatment on grinding energy in rice milling using ceramic and metal rollers

Ceramic roller mill		Metal roller mill	
Number of milling treatment	Avg. of Torque (N · m)	Number of milling treatment	Avg. of Torque (N · m)
1	0.7689 a	1	0.9250 a
2	0.6032 b	2	0.5761 b
3	0.4737 b	3	0.3935 b

† Means with same letters are not significant by Duncan's multiple range tests, at the 5% level

표 3은 롤의 간격이 0.25, 0.50mm에서 세라믹 롤러밀과 금속 롤러밀간의 소요에너지는 큰 차이가 없었으나, 0.05mm경우는 세라믹 롤러밀이 0.1530(N · m) 만큼 에너지가 더 소요되었고, 0.13mm경우는 금속 롤러밀이 0.210(N · m)정도 에너지 소요가 증가된 것으로 분석되었다. 표 4에서 분쇄속도 47.4, 101.6rpm의 경우 세라믹 롤러밀이 금속 롤러밀보다 각각 0.610, 0.260(N · m)정도 에너지 소요가 증가된 것으로 분석되었다. 표 5에서 분쇄물이 롤 1회 통과 시 금속 롤러밀이 세라믹 롤러 밀 보다 0.156(N · m)정도 소요에너지가 증가되었고, 2·3회 통과시에는 세라믹 롤러밀이 금속 롤러밀보다 각각 0.027, 0.080(N · m)정도 에너지 소요가 증가된 것으로 분석되었다.

세라믹 롤러밀과 금속 롤러밀의 소요동력을 측정된 결과 표 3, 4, 5에서와 같이 두 롤러 사이의 간격, 분쇄속도, 분쇄횟수의 증가시 두 롤러간에는 큰 차이는 없었으나, 비교적 금속 롤러밀이 적은 토크(Torque)가 소요되는 것으로 분석되었다.

세라믹 롤러밀은 쌀이 롤에 투입되기 직전의 소요에너지(A)가 0.373N · m이고, 쌀이 롤에 투입되면서 물을 통과할 때(B) 평균 소요에너지는 1.090N · m로 나타났으며, 금속 롤러밀은 쌀이 롤에 투입되기 직전의 소요에너지(A)는 0.173N · m이고, 쌀이 롤에 투입되면서 물을 통과할 때(B) 평균 소요에너지는 0.363N · m로 나타나 투입직전의 소요에너지 경우는 거의 비슷하였으나, 각각 물을 통과할 때 세라믹 롤이 금속 롤 보다 0.7(N · m)가 더 소요되는 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 식품 가공에 사용 할 수 있는 범용 세라믹 롤러밀을 양산화 하기 위하여 1차적으로 실험용 롤러밀을 설계하였다. 실제 실험용 세라믹 롤러밀과 금속 롤러밀을 제작 하여 분쇄에 중요한 요인인 두 롤러의 간격, 분쇄속도, 분쇄물의 롤 통과 횟수 등의 분쇄조건을 변화시키면서 분쇄 소요 에너지를 분석한 실험 결과는 다음과 같다.

- 1) 쌀 함수율이 25%이상에서 분쇄소요동력은 1N · m가 소요되는 것으로 분석되었다.

- 2) 쌀 분쇄시 세라믹 롤러밀의 경우 두 롤러의 간격이 쌀 지름($D=2\text{mm}$)의 $D/4 \sim D/8(0.50 \sim 0.25\text{mm})$ 경우 $0.5 \sim 0.6\text{N} \cdot \text{m}$ 토크가 소요되었고, 간격을 $D/16 \sim D/32(0.13 \sim 0.05\text{mm})$ 로 분쇄한 경우 $0.5 \sim 0.8\text{N} \cdot \text{m}$ 토크가 측정됨으로서 롤러 간격이 좁혀 질 수록 $0.2\text{N} \cdot \text{m}$ 정도의 토크가 증가되는 것으로 분석되었다.
- 3) 금속 롤러밀의 경우 두 롤러 간격이 쌀 지름($D=2\text{mm}$)의 $D/4 \sim D/8(0.50 \sim 0.25\text{mm})$ 경우 $0.5 \sim 0.7\text{N} \cdot \text{m}$ 토크가 소요되었고, 간격을 $D/16 \sim D/32(0.13 \sim 0.05\text{mm})$ 로 분쇄한 경우 $0.7\text{N} \cdot \text{m}$ 토크가 측정됨으로서 롤러 간격이 좁혀 질수록 $0.2\text{N} \cdot \text{m}$ 정도의 토크가 증가되는 것으로 분석되었다.
- 4) 두 롤러 밀 모두 물의 속도가 증가함에 따라 소요동력이 증가하는 것으로 분석되었고, 세라믹 롤러밀과 금속 롤러밀이 분쇄속도 47.4, 101.6rpm에서는 세라믹 롤러밀이 각각 0.610, 0.260($\text{N} \cdot \text{m}$)정도 분쇄에너지 소요가 증가된 것으로 분석되었다.
- 5) 현재 국내에서 일반적으로 사용되는 롤의 속도는 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 이며, 동일 속도에서 세라믹 롤러밀의 경우는 소요동력이 $0.4\text{N} \cdot \text{m}$ 로 분석되었고, 속도를 $R_f : R_s = 101.6 : 50.8\text{rpm}$ 으로 2배 증가시켰을 경우에는 $0.7\text{N} \cdot \text{m}$ 토크가 소요되어 롤의 속도가 $R_f : R_s = 47.4 : 23.7\text{rpm}$ 일 때 보다 토크가 63%정도 증가되는 것으로 분석되었으며, 국내에서 사용하고 있는 롤러밀의 속도를 2배로 증가시켰을 경우 소요동력은 $1\text{N} \cdot \text{m}$ 이하로 분석되어 분쇄시 소요되는 동력비는 그리 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

- 1) 강석호, 1995. 분체공학. 회중당.
- 2) 高學均, 琴東赫, 金滿水, 盧祥夏, 文城弘, 朴京圭, 張東日, 1996. 農産加工機械學. 郷文社.
- 3) D. N. Rexroat. 1985. Material Processing Cost Center, Feed Manufacturing Technology. American Feed Industry Association, Inc(AFIA). p137-150.
- 4) Feed Manufacturing TechnologyIII. 1985. American Feed Industry Association, Inc(AFIA).
- 5) Feed Manufacturing TechnologyIV. 1994. American Feed Industry Association, Inc(AFIA).
- 6) Feed Manufacturing TechnologyIII. Hammer mills and Roller mills. Kim Koch. Northern Crops Institute North Dakota State Univ. Fargo, ND. Feed Manufacturing MF-2048. Cooperative Extension Service. Kansas State University, Manhattan.
- 7) Grain Grading Standards in Feed Manufacturing. MF-2034. Department of Grain Science and Industry.
- 8) K. D. Nishit and M. M. Bean, 1982. Grinding Methods; Their Impact on Rice Flour Properties, cereal chemistry, Vol.59, No 1.
- 9) Metals Handbooks(1987). in properties and selection iron and steel. Vol.1, American Society for metals