

고춧가루의 동마찰계수 측정에 관한 연구

Kinetic Friction of Red-Pepper Powder on Surfaces

강위수*	신범수*	양승기*
정회원	정회원	정회원
W.S.Kang	B.S.Shin	S.K.Yang

1. 서 론

장류나 김치의 가공시 균일한 고춧가루의 품질이 요구되는데 고춧가루의 균일한 품질을 생산을 하기 위해서는 롤 분쇄기를 이용한 고춧가루 분쇄가공 기술이 개발되어야 한다.

롤 분쇄기를 이용하여 건고추 분쇄시 롤 분쇄기의 분쇄조건이 고춧가루의 미분쇄능과 분쇄 효율 향상에 큰 영향을 미치는 요인임을 연구 보고 되었다.^(1,2)

농산물의 물리적 특성은 대체로 기계적 및 Rheological 특성, 전기적 특성, 열 특성, 광학적 특성, Particle Statistics 등 다섯 분야로 나누어지며, 최근에는 이 다섯 분야 중 곡물의 물리적 특성에 대한 연구 동향은 Particle Statistics에 국한되고 있는 경향이 크다고 연구 보고 되었다⁽³⁾. 고춧가루의 분쇄는 한 쌍으로 구성된 롤 재료의 표면 거칠기가 분쇄 시료와 서로 접촉하면서 분쇄물이 생성되므로 두 롤 사이에 고춧가루가 투입될 때 각 롤의 표면과 고춧가루간의 마찰계수는 분쇄 생성물 특성과 분쇄효율에 영향을 미치므로 분쇄시 롤 재료로 사용되는 재료의 표면에 의한 동마찰계수에 대한 기초자료가 요구되고 있는 실정이다.

본 연구는 여러 가지 곡물의 물리적 특성 중 분쇄 성능과 밀접한 요인이 되는 동 마찰계수를 측정하기 위하여, 고춧가루의 입도별, 견인 속도별 그리고 롤 재료로서 사용 할 수 있는 3 종류의 재료표면에 따른 고춧가루의 동 마찰계수를 측정하는데 연구의 중점을 두었으며, 이를 기초로 롤 분쇄기의 분쇄능과 분쇄효율을 향상하기 위한 롤 분쇄기 설계 및 제작에 기초 자료를 제공하고자 한다.⁽⁴⁻⁸⁾

2. 재료 및 방법

가. 실험 재료

실험에 사용된 시료는 1999년 강원도 영월에서 생산된 다복 품종으로서 20, 30, 40mesh 등 세 가지 입도의 고춧가루를 택하였으며, 재료표면은 분쇄기의 재료로서 주로 이용되고 있는 회주철판과 세라믹판, 아연합석판의 세 종류를 사용하였다.

나. 실험 장치

고춧가루와 재료표면의 동마찰계수를 측정하기 위한 장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 고춧가루의 일정한 산포와 견인을 위한 실험 테이블과 그 위를 미끄럼 운동하는 재료표면,

* 강원대학교 농업생명과학대학 농업공학부 농업기계공학과

그리고 이를 정속으로 견인하면서 수평력을 측정하는 측정장치(UTM), Computer 등의 실험장치를 표-1과 같이 구성하였으며 이러한 실험장치는 Bickert 등, Bucklin 등, 김만수 등의 실험장치 및 연구결과를 참고하였다⁽⁴⁻⁸⁾.

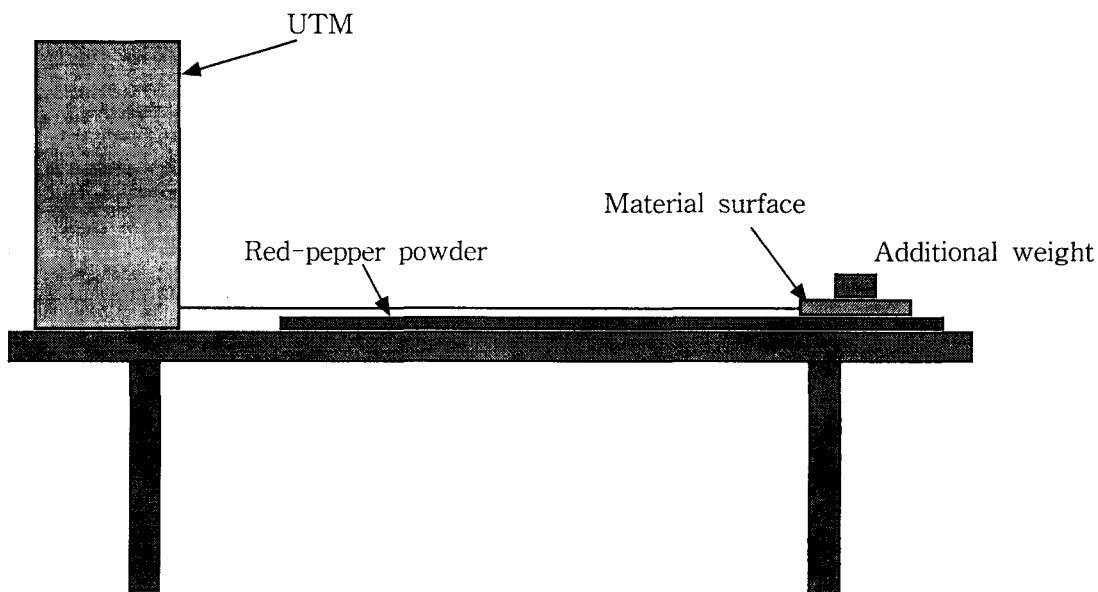


Fig.1 Experimental apparatus for measuring the kinetic friction coefficient

Table 1. Specifications of the experimental apparatus and the measuring instrument

Experimental apparatus		Measuring instrument	
Nomenclature	Dimensions	UTM .	
Material surface (mm)	100×100	Manufacturer	United Calibration Corporation
Speed of moving friction plate (mm/min)	100, 300	Model	STM-20
Added weight (kg)	1.0, 2.0, 4.0	Dimensions (cm) (load frame)	78.74(W)*60.96(D)*234.95(H)
Load cell capacity(kg)	45.3	Weights (kg) (load frame)	1653.4(kg)
		Cross head speed rate-cm/min	0.05-50.8

다. 실험 방법

본 실험은 고춧가루의 동마찰계수를 측정하기 위해 재료표면별로 고춧가루의 입도 20, 30, 40mesh의 세 수준에 대하여 견인속도별, 함수율별, 하중별로 3반복으로 수행되었다.

1) 동마찰력의 측정

고춧가루의 동마찰력의 측정은 먼저 작업대 위의 고정판에 고춧가루와 마찰이 없는 상태에서 재료표면을 등속도로 견인하여 UTM에 의해 재료표면만 견인하는데 소요되는 수평력을 측정한다. 고정판 위에는 약 5~10mm 두께로 고춧가루를 일정하게 산포하고 그 위에 재료표면을 놓은 후 상부에 0.98, 1.96, 3.92kPa의 압력이 유지되도록 하고 고춧가루와 재료표면이 완전하게 접촉되도록 한 후에 100, 300mm/min의 등속도로 견인하여 수평력을 측정한 값에서 무부하 상태에서 측정한 재료표면의 견인 수평력을 뺀 값을 해당 고춧가루와 재료표면 간의 동마찰력으로 하였으며, 다음 공식(1)에 의해 동마찰계수를 산출하였다.

재료표면이 견인될수록 점차 고춧가루 속으로 진입하면서 고정판과 접촉이 되어 불균일한 진폭이 나타나, 일정한 견인구간을 마찰력으로 환산하였다.

$$\mu_k = P/W \quad \text{----- (1)}$$

여기서, μ_k : 동마찰계수

P : 마찰 판의 견인력(kg)

W : 부가 하중(kg)

2) 함수율 측정

고춧가루의 함수율은 각 시료에서 30g씩 채취하여 105℃의 정온건조법에 의한 건조와 精度 0.001g의 Digital balance(AND, FA300KV)로 측정하였으며, 시료의 함수율은 습량 기준(w.b.)으로 표시하였다.

3) 속도에 따른 동마찰계수 측정

속도에 따른 마찰계수의 실험은 UTM장치를 이용하여 100, 300mm/min의 견인속도로 동마찰계수를 측정하였다.

4) 함수율에 따른 동마찰계수 측정

함수율에 따른 고춧가루의 동마찰계수 측정은 6.06, 11.94%(w.b.)의 함수율로 재료표면별로 견인하여 동마찰계수를 측정하였다.

5) 마찰판에 따른 동마찰계수 측정

회주철, Al₂O₃-Ceramic판, 아연합석판 세 종류의 재료표면을 택하였으며, 일정하게 산포된 고춧가루 위를 견인하면서 각 재료표면에 따른 동마찰계수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 속도에 따른 동마찰계수 측정

세 종류의 재료표면과 입도별, 함수율별, 견인속도별, 부가하중별에 따른 동마찰계수를 측정, 실험한 결과는 표-2, 그림 2와 같으며, 함수율 6.06%(20,30,40mesh 모두포함) 경우 회주철판은 견인 속도 100mm/min일 때 동마찰계수의 범위는 0.188~0.287, 300mm/min일 때는 0.143~0.268으로 나타났고, 세라믹판은 견인 속도 100mm/min 일 때 0.203~0.396, 300mm/min 경우 0.243~0.365로 나타났으며, 아연합석판은 견인 속도 100mm/min 일 때 0.150~0.286, 300mm/min는 0.126~0.270범위를 나타냈다.

함수율 11.94%(20,30,40mesh)경우는 회주철판에서 견인 속도 100mm/min일 때 동마찰계수 범위는 0.327~0.461, 300mm/min 일 때는 0.271~0.360으로 나타났고, 세라믹판은 견인

속도 100mm/min 일 때 0.288~0.487, 300mm/min는 0.262~0.412로 나타났으며, 아연함석판은 건인 속도 100mm/min 일 때 0.258~0.297, 300mm/min는 0.231~0.289범위로 근소한 차를 보였으며, 단일 재료표면의 속도 증가는 동마찰계수에 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.

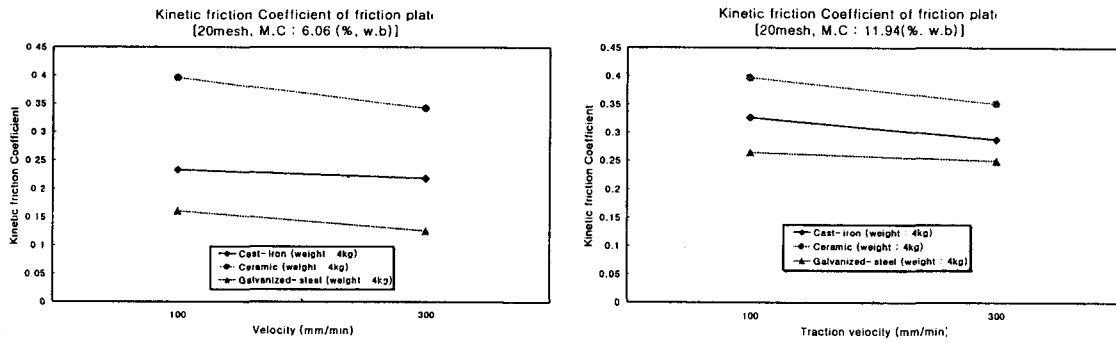


Fig. 2 Kinetic friction coefficient of material surfaces

나. 함수율에 따른 동마찰계수 측정

Table 2. Kinetic friction coefficients on the 20mesh size of red pepper powder size according to the change of velocity, moisture content, weight and material surfaces

Material surface		Cast grey iron		Al ₂ O ₃ -Ceramic		Galvanized steel	
M (% w.b.)		6.06	11.94	6.06	11.94	6.06	11.94
V(mm/min), P(kPa)							
100	0.98	0.287	0.393	0.376	0.288	0.282	0.297
	1.96	0.264	0.349	0.362	0.371	0.209	0.269
	3.92	0.233	0.327	0.396	0.397	0.161	0.265
300	0.98	0.268	0.332	0.365	0.262	0.259	0.289
	1.96	0.235	0.325	0.352	0.327	0.176	0.267
	3.92	0.218	0.288	0.342	0.351	0.126	0.250

Table 3. Kinetic friction coefficients on the 30mesh size of red pepper powder size according to the change of velocity, moisture content, weight and material surfaces

Material surface		Cast grey iron		Al ₂ O ₃ -Ceramic		Galvanized steel	
M (% w.b.)		6.06	11.94	6.06	11.94	6.06	11.94
V(mm/min), P(kPa)							
100	0.98	0.269	0.461	0.283	0.372	0.286	0.268
	1.96	0.228	0.388	0.276	0.447	0.221	0.274
	3.92	0.205	0.370	0.277	0.450	0.200	0.290
300	0.98	0.225	0.360	0.274	0.300	0.270	0.258
	1.96	0.221	0.314	0.272	0.383	0.220	0.262
	3.92	0.185	0.332	0.243	0.403	0.172	0.260

표-2,3,4 및 그림 2와 같이 함수율에 따른 동마찰계수는 두 함수율 6.06%, 11.94%(w.b)를 비교하면 회주철 경우 견인 속도 100mm/min일 때 0.188~0.287과 0.327~0.461범위로 각각 나타났고, 300mm/min속도는 0.143~0.268과 0.271~0.360으로 측정되었다. 세라믹은 견인 속도 100mm/min일 때 0.203~0.396과 0.288~0.487범위를 보였으며, 300mm/min속도는 0.288~0.487 범위로 측정되었고, 아연합석판은 견인 속도 100mm/min 일 때 0.150~0.286과 0.258~0.297, 300mm/min 속도는 0.126~0.270과 0.231~0.289범위를 나타내 세 종류의 재료표면 모두 함수율의 증가가 동마찰계수에 큰 영향을 미치는 인자로 분석되었다.

Table 4. Kinetic friction coefficients on the 40mesh size of red pepper powder size according to the change of velocity, moisture content, weight and material surfaces

Material surface		Cast grey iron		Al ₂ O ₃ -Ceramic		Galvanized steel	
M (% , w.b.)		6.06	11.94	6.06	11.94	6.06	11.94
V(mm/min), P(kPa)							
100	0.98	0.249	0.446	0.203	0.486	0.252	0.266
	1.96	0.226	0.349	0.270	0.487	0.184	0.258
	3.92	0.188	0.362	0.270	0.457	0.150	0.267
300	0.98	0.218	0.271	0.281	0.367	0.251	0.231
	1.96	0.198	0.302	0.263	0.406	0.167	0.264
	3.92	0.143	0.312	0.269	0.412	0.142	0.266

다. 입도에 따른 동마찰계수 측정

표-5는 견인속도 100, 300mm/min를 포함한 세 입도(20, 30, 40mesh)의 동마찰계수의 평균값과 이 값으로 무는 각(Angle of nip)을 환산한 것이다. $\mu = \tan \alpha$ 일때 각 α 를 분쇄조작에서의 무는 각(Angle of nip)이라 하는데, 입자가 분쇄되려면 $\mu \geq \tan \alpha$ 의 관계가 성립되어야 한다. 본 실험에서 측정된 입도별 동마찰계수의 α 각(Angle of nip)은 표-5와 같다.

함수율 6.06%(w.b)에서 20mesh의 α 각은 11.40° ~20.10° 범위였으며, 30mesh는 12.52° ~15.16° , 40mesh는 10.81° ~14.52° 범위를 보였으며, 함수율 11.94%(w.b)경우는 20mesh에서 α 각은 15.27° ~18.57° 범위였으며, 30mesh는 15.06° ~21.45° , 40mesh는 14.52° ~23.56° 범위로 나타났다.

Table 5. Mean of kinetic friction coefficient and angle of nip with 3 size of red pepper powder

Mesh	Material surfaces	M. C. 6.06%(w.b)		M. C. 11.94%(w.b)	
		K.F.C	Angle of nip(°)	K.F.C	Angle of nip(°)
20mesh	Cast grey iron	0.251	14.09	0.336	18.57
	Ceramic	0.366	20.10	0.333	18.42
	Galvanized steel	0.202	11.40	0.273	15.27
30mesh	Cast grey iron	0.222	12.52	0.371	20.35
	Ceramic	0.271	15.16	0.393	21.45
	Galvanized steel	0.228	12.84	0.269	15.06
40mesh	Cast grey iron	0.204	11.53	0.340	18.78
	Ceramic	0.259	14.52	0.436	23.56
	Galvanized steel	0.191	10.81	0.259	14.52

재료표면과 함수율에 따른 α 각은 회주철 경우 $11.53^\circ \sim 18.78^\circ$, 세라믹은 $14.52^\circ \sim 23.56^\circ$ 범위였고, 아연합석은 $10.81^\circ \sim 15.27^\circ$ 범위로 나타나 세라믹이 롤밀을 이용하여 고춧가루를 분쇄할 경우 다른 두 종류에 비해 가장 우수한 것으로 분석되었다.

라. 고춧가루의 동마찰계수에 영향을 미치는 요인

고춧가루의 동마찰계수에 영향을 미치는 주요 요인들과의 관계를 규명하기 위하여 ANOVA program을 이용하여 분석한 결과 두 수준의 견인 속도와 세 종류의 재료표면간에는 5%수준의 유의차가 있었으며 유의차의 크기는 세라믹, 회주철, 아연합석판 순으로 나타났다. 입도와 부가하중은 유의차가 없는 것으로 나타났다. 또한 두 함수율도 5%수준의 유의차를 나타내 함수율은 동마찰계수에 큰 영향을 미치는 요인으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 여러 가지 곡물의 물리적 특성 중 분쇄 성능과 밀접한 관련이 있는 동마찰계수를 측정하기 위하여 고춧가루의 입도별, 견인 속도별, 부가 하중별 그리고 재료표면의 종류에 따른 고춧가루의 동마찰계수의 측정과 동마찰계수에 영향을 미치는 요인을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 재료표면에 따른 동마찰계수와 Angle of nip α 각은;

- 1) 회주철의 동마찰계수는 0.20~0.37사이로, Angle of nip α 각은 $11.5^\circ \sim 20.4^\circ$ 로 분석되었다.
- 2) 세라믹의 동마찰계수는 0.26~0.44사이로, Angle of nip α 각은 $14.5^\circ \sim 23.6^\circ$ 로 분석되었다.
- 3) 아연합석의 동마찰계수는 0.19~0.27사이로, Angle of nip α 각은 $10.8^\circ \sim 15.3^\circ$ 로 분석되었다.

나. 함수율 증가에 따른 동마찰계수는 회주철에서 0.17, 세라믹은 0.18, 아연합석은 0.08로 각각 증가하였다.

다. 고춧가루의 입도가 미분화될수록 회주철과 아연합석은 감소하는 경향을 보였으나, 세라믹은 함수율 6.06%(w.b)에서만 감소하였고 함수율 11.94%(w.b)경우는 증가하였다.

라. 재료표면에 따른 동마찰계수의 크기는 세라믹, 회주철, 아연합석판 순으로 분석되어 분쇄능과 분쇄 효율도 이와 같은 순으로 나타날 것으로 사료된다.

5. 참고 문헌

1. 강위수, 양승기, 목효균, 최상근, 이해익. 2000. 세라믹과 회주철 치형롤 분쇄기를 이용하여 고추 분쇄시 전단력 증가가 분쇄생성물에 미치는 영향 분석. 농업기계학회지 2000년 동계학술대회 논문집 6(1):pp266~271
2. 강위수, 이귀현, 양승기, 박인근. 2000. 고추분쇄시 회전비 증가에 따른 치형롤 분쇄기의 분쇄소요에너지 분석. 농업기계학회지 2000년 동계학술대회 논문집 6(1):pp272~277
3. 김만수 외 1인. 1981. 곡물의 물리적 특성에 관한 연구. 한국농업기계학회지1(1):pp73~82.
4. 김만수, 이종호. 1976. 곡물의 동마찰계수 측정에 관한 연구. 한국농업기계학회지1(1):pp 49~54.
5. 양승기. 1990. 벼의 동마찰계수에 관한 연구. 강원대학교 교육대학원 석사논문.
6. 法貴誠 外 3人. 1975. 곡물의 동마찰계수 측정, 三重大學 農學部 學術報告 48:pp469~482.
7. Bickert, W.G. and F.H.Buelow. 1966. Kinetic friction of grains on surfaces. Trans.of the ASAE,9(1):pp129~131,134.
8. C.Puchalski, G.H.Brusewitz. 1996. Coefficient of Friction of Watermelon. Trans.of the ASAE, 39(2) :pp589~594.