

열풍건조 시의 건조 온도와 입경에 따른 콩(*Glycine max*)의 건조 특성

박현우¹ · 한원영² · 윤원병¹

¹강원대학교 농업생명과학대학 식품생명공학 전공

²국립식량과학원 두류유지작물부

Effect of Grain Size and Drying Temperature on Drying Characteristics of Soybean (*Glycine max*) Using Hot Air Drying

Hyeon Woo Park¹, Won Young Han², and Won Byong Yoon¹

¹Department of Food Science and Biotechnology, College of Agricultural and Life Science, Kangwon National University

²Department of Functional Crop, National Institute of Crop Science

ABSTRACT The effects of drying temperature on drying characteristics of soybeans with different grain sizes [6.0 (S), 7.5 (M), and 9.0 mm (L) (± 0.2)] with 25.0% (± 0.8) initial moisture content were studied. Drying temperatures varied at 25, 35, and 45°C, with a constant air velocity (13.2 m/s). Thin-layer drying models were applied to describe the drying process of soybeans. The Midilli-Kucuk model showed the best fit ($R^2 > 0.99$). Based on the model parameters, drying time to achieve the target moisture content (10%) was successfully estimated. Drying time was strongly dependent on the size of soybeans and the drying temperature. The effective moisture diffusivity (D_{eff}) was estimated by the diffusion model based on Fick's second law. D_{eff} values increased as grain size and drying temperature increased due to the combined effect of high temperatures and high drying rates, which promote compact tissue. D_{eff} values of S, M, and L estimated were in the range of 0.83×10^{-10} to 1.51×10^{-10} m²/s, 1.17×10^{-10} to 2.17×10^{-10} m²/s, and 1.53×10^{-10} to 2.95×10^{-10} m²/s, respectively, whereas activation energy (E_a) based on drying temperature showed no significant differences in the size of soybeans.

Key words: hot air drying, drying characteristics, grain size, thin-layer drying models, soybean

서 론

콩(*Glycine max*)은 동양에서 주요 식품 자원으로서 밭에서 나는 고기라고 일컬어지고 우리나라 식생활에서도 쌀 다음으로 중요한 부분을 차지하고 있으며, 예로부터 장류, 두부, 콩나물, 혼반용 등 다양한 용도로 이용되어 양질의 식물성 단백질 공급원으로써 중요한 역할을 해왔다(1).

수확 직후의 콩은 20~25%의 높은 수분 함량으로 인해 저장·운송이 어렵다. 따라서 수확량의 대부분은 천일건조나 열풍건조 후 건조된 콩으로 유통된다(2,3). 콩을 천일건조할 경우 부대시설의 비용이 저렴하지만 건조과정 중 일기의 영향을 크게 받으며 안전저장 수분 함량까지 건조하는 데 긴 시간이 필요하다. 또한 콩이 자연 상태로 노출되어 있기 때문에 곤충의 피해와 미생물의 오염 등으로 변질되기 쉽고,

색의 변형이 일어나 균등한 품질의 제품을 얻기 어렵다(4). 열풍건조의 경우 천일건조에 비해 노동력이 크게 절감되며 건조 시간이 짧은 이점이 있지만 콩은 그 입경의 차이가 크기 때문에 그에 따른 건조 속도의 차이에 의해 콩이 충분히 건조되지 않거나 과건조에 의한 과열립이 발생하기 쉽다(5-7). 열풍건조의 경우 콩의 건조 특성이 명확히 규명되지 않은 상태에서 행해져 오고 있기 때문에 콩의 품질을 적정 수준으로 유지하고 비용을 최소화하기 위해서는 콩의 건조 특성이 명확히 규명되어야만 한다. 특히 콩과 같은 작물의 경우 그 크기가 균일하지 않으므로 크기에 따른 건조 특성이 규명되어야 한다.

유효 수분확산도(D_{eff})는 일반적으로 해당 물질의 물질 전달 특성에 의해 결정되고, 물질 전달과정에 대한 실험 결과에 기초한 분석 결과로부터 결정된다. 하지만 건조와 같이 적용되는 공정 동안 지속적으로 온도가 변화하며 이에 따라 이동되는 물질의 속도가 변화되는 경우 해당 물질의 특성뿐만 아니라 여러 가지의 외부 조건(건조 온도, 시료의 크기나 모양)을 고려한 유효 수분확산도가 산출되고 있으며, 이와 같은 식품의 건조 시의 유효 수분확산도를 확인하는 많은 연구들이 진행되어 오고 있다(8-10). 그런데 콩은 입경의

Received 13 August 2015; Accepted 29 August 2015

Corresponding author: Won Byong Yoon, Department of Food Science and Biotechnology, College of Agricultural and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon, Gangwon-do 24341, Korea

E-mail: wbyoon@kangwon.ac.kr, Phone: +82-33-250-6459

편차가 크므로 그 크기에 따라 건조 중의 온도 변화와 수분 함량 변화에 따라 적용되는 유효 수분확산도의 차이가 발생하기 때문에, 콩의 건조를 위한 예측모델에서 입경을 고려하여 주는 것이 필요하다. 따라서 입경에 따른 박층 건조 모델(thin layer model)의 변수를 통해 Fick's second law를 기초로 한 D_{eff} 를 평가하는 것은 이론적인 건조 시스템을 이해하는 데 매우 유용하다고 할 수 있다.

현재 콩의 건조 특성을 연구하고 입경과 건조 온도에 따른 콩의 건조 속도에 초점을 맞춘 연구가 부족한 실정이다. 입경과 건조 온도에 따른 콩의 건조 kinetics와 수분확산계수를 분석하는 것은 콩의 저장 및 유통 시 품질 최적화를 위한 좋은 대안이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 열풍건조에서 입경과 건조 온도에 따른 수분 함량 변화를 확인하여 4개의 박층 건조 모델 적용 결과를 비교하였고, 이를 이용하여 콩의 건조 특성과 유효 수분확산도를 측정하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 실험의 재료로 사용된 콩은 국내산 백태를 국립식량과학원(Miryang, Korea)으로부터 제공받아 사용하였다. 구입한 콩은 초기 수분 함량을 수확 직후의 수분 함량 범위인 25.0%(±0.8)의 수분 함량(3,5)에 해당하는 시료로 선별 및 조정된 후 실험수행기간 동안 수분 함량의 변화를 최소화하기 위하여 진공포장을 한 다음 상온에서 보관하여 사용하였다.

건조공정

콩을 목표 수분 함량(10%)까지 건조시키기 위해 가로길이 550 mm, 세로길이 520 mm, 높이 600 mm의 트레이 건조기(Dong Yang Science Co., Seoul, Korea)를 사용하였다. 콩의 입경은 지름을 기준으로 S, M, L 군으로 나누었으며, 그 지름은 각각 6.0, 7.5, 9.0 mm(±0.2)였다. 입경에 따라 분류된 20개의 콩을 건조기 중앙에 위치시킨 뒤 열풍 건조 하였으며, 건조 온도는 25, 35, 45°C를 사용하였고 건조 공기의 속도는 13.2 m/s로 고정되었다. 건조 시간은 0, 10, 20, 30, 40, 60, 90, 150, 210, 300, 420, 540분으로 하여 각 건조 시간에 따른 콩의 무게 변화를 측정하였다.

건조 속도와 박층 건조 모델

콩의 함수율과 건조 속도는 다음 식에 의해 계산되었다.

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

여기서 MR은 수분 함량, M은 건조 시간에 따른 수분 함량(d.b.), M_e 는 평형 수분 함량(d.b.), M_i 는 초기 수분 함량(d.b.)을 뜻한다.

건조 초기, 건조 중 그리고 건조 종료 시점의 건조 속도는 Guine과 Fernandes(11)의 방법에 따라 계산되었다.

$t=t_0$ 에서,

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_i - M_0}{t_1 - t_0} \quad (2)$$

$t=t(i-1, 2, \dots, n-1)$ 에서,

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{i+1} - M_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (3)$$

$t=t_n$ 에서,

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_n - M_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (4)$$

4개의 박층 건조 모델(2)이 콩의 건조 모델 평가에 적용되었다. 실험 데이터의 건조 모델링에 사용된 건조 모델들을 Table 1에 나타내었다(13-16). 이 건조 모델들은 많은 식품의 건조에 적용되어 오고 있다.

유효 수분확산도

물질의 구성 성분, 수분 함량, 온도와 투과성에 영향을 받는 유효 수분확산도(D_{eff})는 건조 공정 동안 수분 이동을 이해하는 데 유용하다. 주어진 수분 함량에서 D_{eff} 는 Fick's second law를 사용하여 추정될 수 있다(17-19).

피건조물이 균일한 초기 수분 함량을 가지고 있다고 가정할 경우 콩과 같은 구형 재료의 Fick's second law와 그 해는 다음과 같이 정의된다:

확산의 Fick's second law,

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(D_{eff} r \frac{\partial M}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{eff} r \frac{\partial M}{\partial z} \right) \right] \quad (5)$$

구형 피건조물의 Fick's second law의 해,

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \times \exp \left(-n^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (6)$$

여기서 D_{eff} 는 유효확산도(m^2/s), t 는 건조 시간(s), r 은 구의 반지름(m)을 뜻한다.

건조 시간이 충분히 길 때, 2차항이 제거되어 Eq. 6의 Fick's second law의 해는 간단히 표현될 수 있다:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2 D_{eff} t}{r^2} \right) \quad (7)$$

이 식은 지수형으로 더 간단히 표현될 수 있다.

Table 1. Thin layer models used to describe the drying kinetics of soybean

Model No.	Model name	Model equation	References
1	Newton	$MR = \exp^{-kt}$	Lewis (14)
2	Page	$MR = \exp^{-kt^n}$	Page (16)
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp^{-kt}$	Henderson and Pabis (13)
4	Midilli-Kucuk equation	$MR = a \exp^{-kt^n} + bt$	Midilli et al. (15)

$$\ln MR = A - B \times t \quad (8)$$

여기서 A는 $\ln(6/\pi^2)$, B는 $\pi^2 D_{eff}/r^2$ 을 의미한다.

활성화 에너지

D_{eff} 의 온도 의존성은 일반적으로 Arrhenius 식으로 표현된다.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (9)$$

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (10)$$

여기서 D_0 는 Arrhenius 식의 빈도 인자(m^2/s), E_a 는 활성화 에너지(kJ/mol), R은 보편기체상수(kJ/mol K), T는 절대 온도(K)를 뜻한다. 활성화 에너지는 $\ln(D_{eff})$ 와 $1/T$ 의 선형함수의 기울기로부터 계산된다.

Variable Pressure Field Emission Scanning Electron Microscopy(VP-FE-SEM)를 이용한 콩의 내부 구조 관찰

콩의 크기와 건조 정도에 따른 콩의 내부 구조를 관찰하기 위해 VP-FESEM(SUPRA 55VP, ZEISS, Oberkochen, Germany)으로 관찰하였다. L군과 S군 콩의 수분 함량을 25, 20, 15, 10%로 건조하였을 때의 내부 구조를 관찰하기 위해 박층 건조 모델을 이용하여 L군과 S군 콩의 건조 시간을 계산하여 건조를 진행하였으며, 수분 함량 조절 직후 즉시 콩의 내부 구조를 관찰하였다.

통계분석

모든 실험은 3회 반복하여 측정하였으며, 실험 결과 데이터의 통계분석은 MS-Excel-2013의 분산분석(ANOVA)을 이용해 $P < 0.05$ 수준에서 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

건조 kinetics

건조 온도의 영향을 조사하기 위하여 지름을 기준으로 L, M, S 군으로 구분된 콩을 25, 35, 45°C의 건조 온도에서 열풍건조 하였다. L, M, S 군의 콩 모두에서 건조 온도가 유의적인 영향을 미침을 알 수 있었다(Fig. 1). 건조 온도가 증가할수록 수분 감소량 또한 증가하였으며, 이는 콩을 목표 수분 함량까지 건조하기 위한 시간이 감소됨을 의미한다. 또한 같은 건조 온도에서도 입경에 따른 수분 함량의 차이가 있었다(Table 2). 45°C에서 300분간 건조한 경우 S군의 수분 함량은 9.20%로 목표 수분 함량을 초과하여 건조되었으나 L군의 경우 11.40%로 목표 수분 함량에 도달하지 못하였으며, 또한 건조 온도가 증가함에 따라 입경에 따른 수분 함량의 차이가 증가함을 보였다.

이러한 결과는 열풍건조에서 콩의 수분 함량 감소가 건조 온도와 함께 입경에 의존성이 있음을 나타내고 있다. 이 같은 입경에 따른 건조율의 차이는 단순히 거리가 증가함에

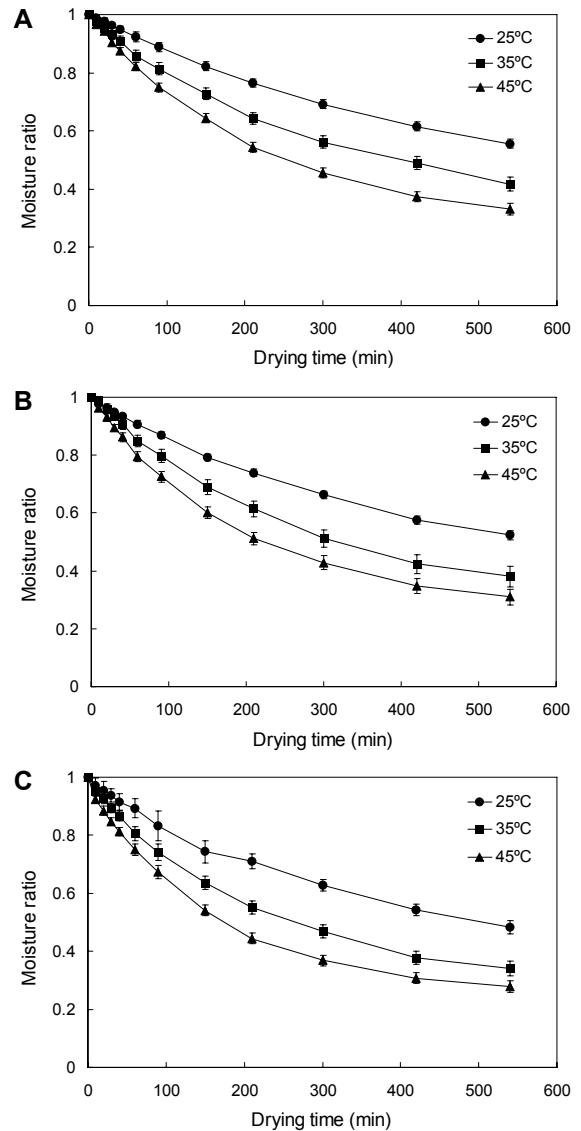


Fig. 1. Changes of moisture ratio of the soybean upon the drying temperature using (A) L, (B) M, and (C) S. Average sample diameter: S, M, and L are 6.0, 7.5, and 9.0 mm (± 0.2), respectively.

따라 선형적으로 증가하는 것이 아닌 것으로 알려져 있으며, 이는 건조 시의 내부 변화에 따른 수분이동기작이 두께의 변화에 의존함을 나타내고 있다. Tütüncü와 Labuza(20)에 따르면 70°C에서 2.5~10 mm 두께의 망고를 대류건조 하였을 때 두께가 증가함에 따라 수분 함량의 변화율이 감소하였으며, Dissa 등(21)은 3~6 mm 지름의 실린더형 spirulina의 35°C 대류건조에서 지름이 증가함에 따라 수분 함량의 변화속도 또한 감소하였다. Maskan 등(22)의 연구에서도 0.71~2.86 mm 두께의 grape leather를 75°C에서 열풍건조 시 두께가 증가할수록 수분 함량의 변화가 감소하여, 본 연구에서의 피건조물의 크기 또는 체적당 면적의 의존성이 다른 식품의 건조에서와 동일한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. Moisture content and percentage difference from S at drying times of 300 min

Temperature (°C)	Sample size ¹⁾	Moisture content (%)	Percentage difference ²⁾ (%)
25	S	15.71	0
	M	16.56	5.41
	L	17.31	10.17
35	S	11.74	0
	M	12.79	8.94
	L	14.05	19.73
45	S	9.20	0
	M	10.71	16.45
	L	11.40	23.88

¹⁾Average sample diameter: S, M, and L are 6.0, 7.5, and 9.0 mm (± 0.2), respectively.

²⁾Percentage difference is a percentage difference from S at each drying temperature.

건조 속도

건조 온도별 입경에 따른 콩의 건조 속도 비교 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 건조 속도는 수분 함량 변화를 기초로 하는 Eqs. 2~4를 이용하여 계산되었다. 모든 건조 온도에서 건조 속도는 건조 시간이 지남에 따라 건조 속도가 감소하였으며, 건조 시간에 따른 건조 속도가 일정한 항률 건조 기간은 나타나지 않았다. 콩은 체적당 표면적이 매우 큰 재료이기 때문에 콩 표면의 수분 함량이 건조의 시작과 함께 매우 빠른 속도로 감소하게 되므로 건조 초기부터 감률 건조를 나타내었다. Moon 등(23)에 따르면 원적외선과 열풍을 이용한 해삼의 건조에서 건조 온도와 방법에 관계없이 모두 건조의 시작과 함께 감률 건조를 나타내었다. 또한 Johnson 등(24)도 본 연구 결과와 유사한 경향을 보였는데 플렌테인(plantain)의 열풍건조에서 매우 짧은 시간의 항률 건조 이후 감률 건조가 전체 건조를 지배하였으며, Srikiatden과 Roberts(25)의 연구에서도 감자의 열풍건조 시 건조 초기부터 감률 건조를 나타냈다. 이외에도 많은 bioproduct와 식품에서 본 연구 결과와 유사한 결과가 관찰되었다(10,26,27). 피건조물의 건조 층은 일정한 수분 함량을 유지하지 못하기 때문에 건조 속도는 피건조물의 내부에서 외부로 이동하는 수분확산에 의해 조절되게 된다(23,28-30).

일정한 건조 온도에서 건조 속도는 입경이 감소함에 따라 증가하였으며, 모든 입경 군에서 건조 속도는 건조 온도가 증가함에 따라 증가하였다. 25, 35, 45°C 건조에서 S군 콩의 평균 건조 속도는 L군보다 각각 261.8, 243.8, 251.8% 높은 값을 나타내었다. 콩의 목표 수분 함량에 도달하기 위한 건조 시간을 감소시키기 위해 건조 온도를 높여 건조 속도를 증가시킬 수 있다. 하지만 높은 건조 온도 및 급속 건조는 콩의 지질 및 단백질을 변질시키고 과열립을 발생시키므로, 건조 온도 및 건조 속도는 콩의 품질을 고려하여 최적화되어야 한다(3,5-7).

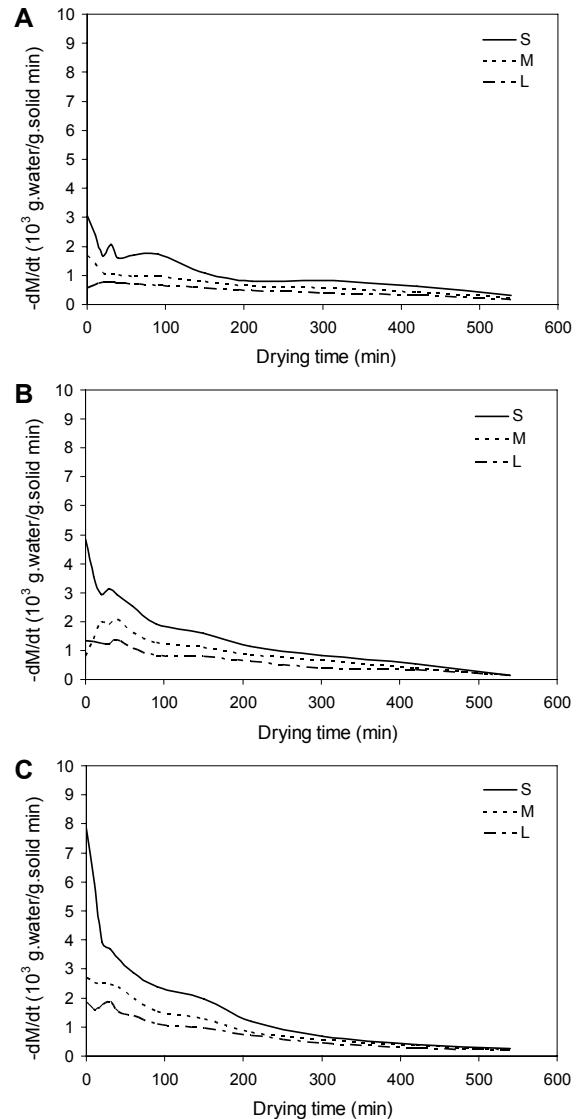


Fig. 2. Effect of grain size on the changes of drying rate at (A) 25°C, (B) 35°C, and (C) 45°C.

박층 건조 모델

열풍건조에 의한 콩의 함수율의 변화를 분석하기 위해서 4개의 박층 건조 모델의 적합성이 평가되었다. 콩의 열풍건조 시 4개의 건조 모델을 적용하였을 때 모든 건조 온도와 입경에서 가장 높은 R² 값(>0.9981)과 가장 낮은 RMSE 값(<0.0090)과 RSS 값(<0.0007)을 나타낸 Midilli-Kucuk 모델이 가장 적합하였다(Table 3). 비선형 회귀분석에 의해 추정된 Midilli-Kucuk 모델의 건조 온도와 입경에 따른 모델 변수를 Table 4에 나타내었다. 이 같은 경우 모델 변수를 기반으로 하여 목표 수분 함량에 도달하기 위해 필요한 건조 시간이 추정될 수 있다. 각 건조 온도별 L군과 S군의 필요 건조 시간은 각각 25°C에서 1,160분과 787분, 35°C에서 598분과 391분, 45°C에서 405분과 260분을 나타내어 건조 온도뿐 아니라 입경 역시 콩의 건조를 위해 반드시 고려되어야 됨을 확인할 수 있었다.

Table 3. Evaluation of thin layer models to describe the drying kinetics of soybean

Model No.	Model name	Sample size	Temperature (°C)	R ²	RMSE	RSS
1	Newton	S	25	0.9758	0.0275	0.0083
			35	0.9644	0.0438	0.0211
			45	0.9399	0.0627	0.0432
		M	25	0.9877	0.0182	0.0037
			35	0.9846	0.0279	0.0086
			45	0.9684	0.0442	0.0215
		L	25	0.9942	0.0117	0.0015
			35	0.9808	0.0280	0.0086
			45	0.9761	0.0372	0.0152
2	Page	S	25	0.9975	0.0093	0.0009
			35	0.9967	0.0139	0.0019
			45	0.9937	0.0212	0.0045
		M	25	0.9989	0.0057	0.0003
			35	0.9940	0.0183	0.0034
			45	0.9939	0.0203	0.0041
		L	25	0.9985	0.0064	0.0004
			35	0.9974	0.0109	0.0012
			45	0.9951	0.0177	0.0031
3	Henderson and Pabis	S	25	0.9871	0.0211	0.0044
			35	0.9798	0.0346	0.0120
			45	0.9669	0.0487	0.0238
		M	25	0.9933	0.0141	0.0020
			35	0.9865	0.0274	0.0075
			45	0.9779	0.0388	0.0151
		L	25	0.9954	0.0110	0.0012
			35	0.9876	0.0236	0.0056
			45	0.9830	0.0329	0.0108
4	Midilli-Kucuk equation	S	25	0.9981	0.0090	0.0007
			35	0.9996	0.0051	0.0002
			45	0.9995	0.0068	0.0004
		M	25	0.9997	0.0033	0.0001
			35	0.9993	0.0072	0.0004
			45	0.9997	0.0052	0.0002
		L	25	0.9999	0.0011	0.0000
			35	0.9992	0.0067	0.0004
			45	0.9998	0.0044	0.0002

Table 4. Model parameters from the Midilli-Kucuk equation to describe the drying kinetics of soybean

Model name	Sample size	Temperature (°C)	a	b (10 ⁻⁴)	k (10 ⁻³)	n
Midilli-Kucuk equation	S	25	1.002	1.517	3.995	0.8636
		35	1.000	2.543	6.032	0.8872
		45	0.993	2.983	8.512	0.8782
	M	25	0.998	2.294	2.220	0.9577
		35	1.009	3.298	3.086	0.9944
		45	1.005	3.088	5.503	0.9319
	L	25	1.002	2.733	1.601	1.0060
		35	1.004	2.274	3.879	0.9127
		45	1.003	3.044	4.395	0.9550

유효 수분확산도와 활성화 에너지

Fig. 2의 건조 속도 곡선은 모두 감률 건조 기간에 있었으

며 이는 내부의 물질 전달 저항이 영향을 미쳤음을 의미한다. D_{eff} 값은 semi-log식인 Eq. 8을 이용하여 계산되었다.

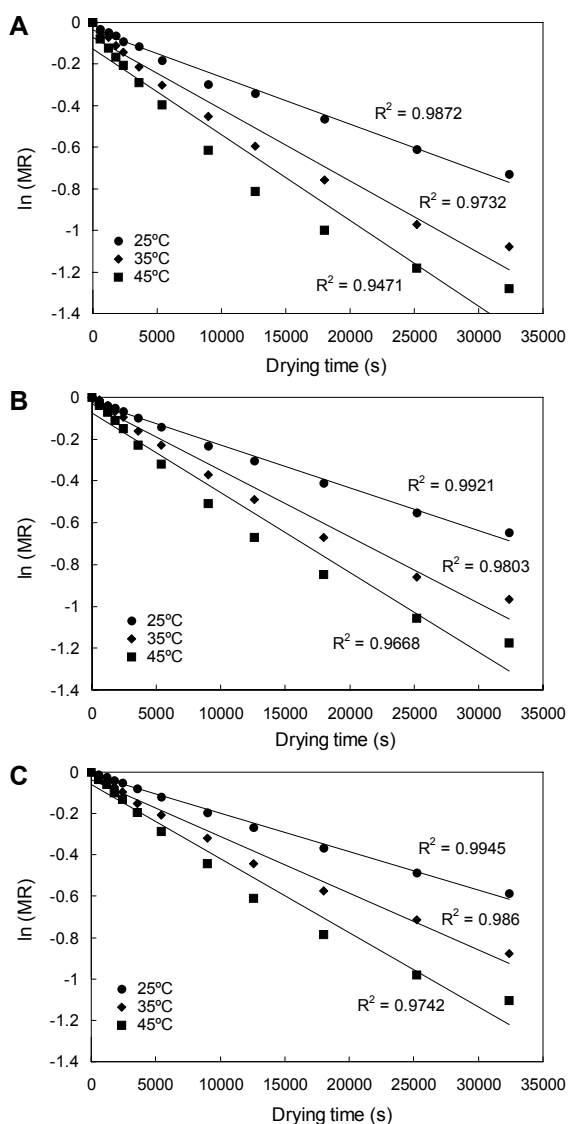


Fig. 3. Determination of the effective moisture diffusivity using the Fick's second law diffusion model: (A) S, (B) M, and (C) L.

ln(MR)과 건조 시간의 semi-log 관계는 Fig. 3에 나타내었다. 건조 온도와 입경에 관계없이 semi-log 관계는 높은 상관관계를 나타내었으며, 건조 온도와 입경에 따른 유효 수분

확산도 및 R² 값을 Table 5에 나타내었다. 건조 온도가 증가할수록 유효 수분확산도는 증가하였으며, 이는 많은 식품의 건조 연구 결과와 일치한다(10,23,24). Nguyen과 Price (10)에 따르면 바나나를 30~50°C에서 열풍건조 하였을 때 1.3×10⁻¹⁰~3.2×10⁻¹⁰ m²/s의 유효 수분확산도를 나타냈고, Johnson 등(24)의 연구에서 plantain을 44.4°C에서 열풍건조 하였을 때 2.31×10⁻¹⁰~8.19×10⁻¹⁰ m²/s의 유효 수분확산도를 확인하였다. 또한 Sharma 등(31)의 연구에서 양파 슬라이스를 35~45°C로 건조하였을 때 유효 수분확산도는 0.21×10⁻¹⁰~1.57×10⁻¹⁰ m²/s의 값을 나타내어 콩의 유효 수분확산도가 식품들의 유효 수분확산도 값들과 유사한 범위에 있는 것을 확인하였다.

건조 온도에 따른 L군과 S군의 평균 함수율의 차이는 25, 35, 45°C에서 각각 7.11(±0.24), 12.12(±0.41), 13.90%(±0.34)의 값을 나타냈다. 같은 건조 온도에서 입경이 커질수록 D_{eff} 값은 증가하였으며, 크기와 건조에 따른 콩의 내부구조를 Fig. 4에 나타내었다. 건조를 하지 않은 25%의 수분 함량과 목표 수분 함량까지 건조시킨 10%의 수분 함량의 L과 S군의 콩에서는 내부구조의 뚜렷한 차이를 확인하기 어려웠지만, 20%와 15%의 수분 함량에서는 다른 결과를 나타내었다. L군 콩의 내부구조가 건조에 따라 표면과 중심의 큰 차이 없이 공극이 고르게 감소하는 반면, S군 콩에서는 건조에 따라서 표면에서 공극 감소가 먼저 발생한 뒤에 중심 쪽으로 공극 감소가 일어나는 것을 확인할 수 있었으며, 따라서 입경이 증가함에 따른 수분확산도의 증가가 건조 중 콩의 내부구조 차이에 의해 유발할 수 있음을 확인할 수 있었다. Andrés 등(32)에 따르면 사과 실펜더를 40°C에서 열풍건조 하면서 microwave를 함께 사용하였을 때 microwave power가 증가할수록 그에 따른 온도 증가가 세포막의 변성과 수분증발을 유도하여 사과 내부의 다공성 조직이 수축하는 것을 확인하였다. 이는 본 연구 결과와 유사한 결과로 체적당 표면적이 상대적으로 적은 S군의 콩에서 급격한 표면온도 증가와 건조 속도가 콩의 다공성 조직의 수축을 유도하였음을 알 수 있다. 본 연구 결과에서의 D_{eff}의 입경 의존성은 구형과 flake 타입의 시리얼 제품의 건조에서 건조베드 두께가 증가할수록 유효 수분확산도가 증가했다는 Tütüncü과 Labuza(20)의 결과와 부합한다. 또한 Nguyen

Table 5. The effective moisture diffusivity estimated during drying of soybean

Model name	Sample size	Temperature (°C)	Effective moisture diffusivity (10 ⁻¹⁰ m ² /s)	R ²
Midilli-Kucuk equation	S	25	0.828	0.9829
		35	1.260	0.9970
		45	1.510	0.9995
	M	25	1.165	0.9968
		35	1.808	0.9948
		45	2.173	0.9932
	L	25	1.530	0.9974
		35	2.248	0.9960
		45	2.946	0.9942

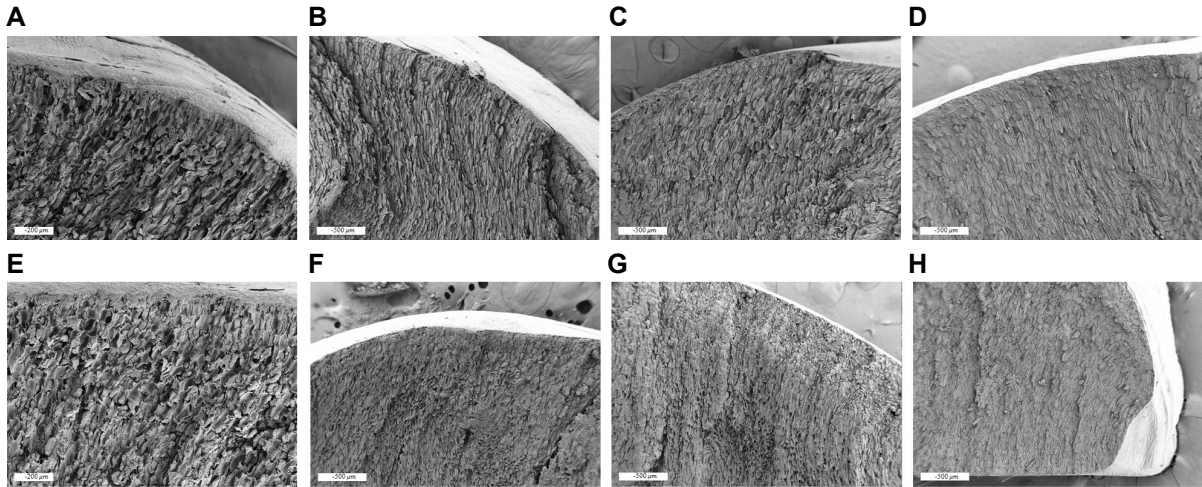


Fig. 4. SEM micrographs of dried soybean. For each micro graph, the size and the moisture content are as follows: (A) L, 25%; (B) L, 20%; (C) L, 15%; (D) L, 10%; (E) S, 25%; (F) S, 20%; (G) S, 15%; (H) S, 10%.

과 Price(10)도 본 연구 결과와 유사한 경향을 보였는데, 50°C의 건조 온도에서 1 cm와 2 cm의 평판형(slab) 바나나 시료를 건조하였을 때 각각 3.2×10^{-10} , 10.8×10^{-10} m²/s의 유효 수분확산도를 나타내었으며, Afzal과 Abe(8)의 연구에서도 평판형 감자시료를 500 W/cm²에서 건조하였을 때 두께가 2.53 mm에서 10.4 mm까지 증가함에 따라 유효 수분확산도가 3.041×10^{-10} m²/s에서 17.32×10^{-10} m²/s 증가하여 본 연구의 콩의 수분확산도가 다른 식품의 유효 수분확산도와 유사한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다.

입경에 따른 열풍건조의 활성화 에너지(E_a)는 Arrhenius 식(Eq. 10)을 사용하여 평가되었다(Fig. 5). S, M, L 군 콩의 E_a 는 각각 23.67, 24.68, 25.85 kJ/mol의 값을 나타냈다. E_a 의 물리적 의미는 피건조물의 수분을 건조하는 데 필요한 에너지의 크기로 해석될 수 있으며, 유효 수분확산도의 온도의존성을 나타낸다. 본 연구에서 입경에 따른 E_a 값은 유의적 차이가 없었으며, Hassini 등(33)의 연구에서 5~20 mm 두께의 평판형 감자시료를 열풍건조 하였을 때 활성화 에너지가 15.18 kJ/mol로 유의적 차이가 없었다는 결과와 부합한다. 또한 Kiranoudis 등(34)도 본 연구와 같은 경향을 나

타냈는데 5~15 mm 두께의 감자와 당근 cube에서 유의적 차이 없이 각각 1.70, 1.27 kJ/mol의 값을 나타내었으며, Senadeera 등(35)의 연구에서도 10~20 mm 길이의 green bean을 유동층 건조하였을 때 활성화 에너지가 39.41 kJ/mol로 유의적 차이가 없었다.

요 약

입경과 건조 온도에 따른 수분 함량의 변화에 대한 연구를 수행하고 콩의 건조 특성을 박층 건조 모델을 적용하여 설명하였으며, Midilli-Kucuk 모델이 콩의 열풍건조를 서술하기에 가장 적합하였다($R^2 > 0.99$). 입경을 달리한 S, M, L 군 모두에서 건조 온도가 증가할수록 건조 속도가 증가하였으며, 같은 건조 온도에서 입경이 증가할수록 건조 속도가 감소하였고, 초기 수분 함량(25%)으로부터 목표 수분 함량(10%)까지 건조시키기 위해 25, 35, 45°C 건조에서 L군과 S군의 필요 건조 시간은 1,160분과 787분, 598분과 391분, 405분과 260분을 나타내어 건조 온도뿐 아니라 입경 역시 콩의 열풍건조를 위해 반드시 고려되어야 함을 확인하였다. 유효 수분확산도는 Fick's second law를 사용하여 평가되었다. 유효 수분확산도는 입경이 증가하고 건조 온도가 증가할수록 증가하였으며, 콩의 크기에 따른 콩의 온도 증가와 건조 속도 증가에 의한 다공성 조직의 수축이 수분확산도의 차이를 유도하였음을 확인할 수 있었다. S, M, L 군의 유효 수분확산도는 각각 $0.83 \times 10^{-10} \sim 1.51 \times 10^{-10}$ m²/s, $1.17 \times 10^{-10} \sim 2.17 \times 10^{-10}$ m²/s, $1.53 \times 10^{-10} \sim 2.95 \times 10^{-10}$ m²/s의 범위를 나타내었다. 이는 대부분의 식품 및 bioproduct의 수분확산도 범위 내에 속했다. 활성화 에너지(E_a)는 건조 온도로부터 Arrhenius 식을 사용하여 평가되었다. 열풍건조에서 콩의 E_a 는 24.73 kJ/mol의 값을 나타냈으며, 입경에 따른 유의적 차이는 없었다.

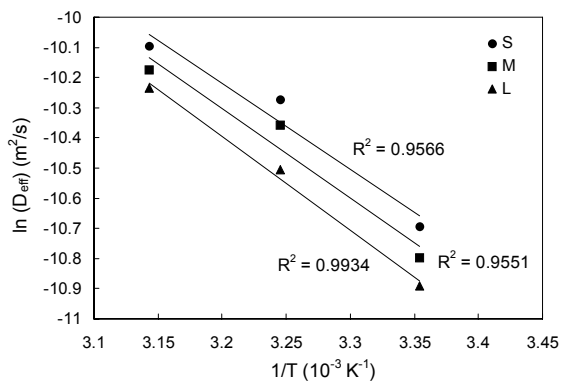


Fig. 5. Comparison of the activation energy of samples using 25°C, 35°C, and 45°C.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010046)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

- Kwon SH. 1972. Origin and importance of protein and oil of Korean soybean. *Korean J Food Sci Technol* 4: 158-161.
- Rafiee S, Keyhani A, Sharifi M, Jafari A, Mobli H, Tabatabaefar A. 2009. Thin layer drying properties of soybean (*Viliamz* cultivar). *J Agric Sci Technol* 11: 289-300.
- Soponronnarit S, Swasdisevi T, Wetchacama S, Wutiwatchai W. 2001. Fluidised bed drying of soybeans. *J Stored Prod Res* 37: 133-151.
- Doymaz I. 2006. Drying behavior of green beans. *J Food Eng* 69: 161-165.
- Overhults DG, White GM, Hamilton HE, Ross IJ. 1973. Drying soybeans with heated air. *Trans ASAE* 16: 112-113.
- Sangkram U, Noomhorm A. 2002. The effect of drying and storage of soybean on the quality of bean, oil, and lecithin production. *Drying Technol* 20: 2014-2054.
- Wiriyampaiwong S, Soponronnarit S, Prachayawarakorn S. 2003. Soybean drying by two-dimensional spouted bed. *Drying Technol* 21: 1735-1757.
- Afzal TM, Abe T. 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. *J Food Eng* 37: 353-365.
- Hii CL, Law CL, Cloke M. 2009. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *J Food Eng* 90: 191-198.
- Nguyen M, Price WE. 2007. Air-drying of banana: Influence of experimental parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season. *J Food Eng* 79: 200-207.
- Guine RPF, Fernandes RMC. 2006. Analysis of the drying kinetics of chestnuts. *J Food Eng* 76: 460-467.
- Erbay Z, Icier F. 2009. A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 50: 441-464.
- Henderson SM, Pabis S. 1961. Grain drying theory. I: Temperature effects on drying coefficients. *J Agric Eng Res* 6: 169-174.
- Lewis WK. 1921. The rate of drying of solid material. *J Ind Eng Chem* 13: 427-443.
- Midilli A, Kucuk H, Yapar Z. 2002. A new model for single-layer drying. *Drying Technol* 20: 1503-1513.
- Page GE. 1949. Factors influencing the maximum rate of air drying shelled corn in thin-layers. *MS Thesis*. Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Karathanos VT, Belessiotis VG. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *J Agric Eng Res* 74: 355-361.
- Marinos-Kouris D, Maroulis ZB. 1995. Transfer properties in the drying of solids. In *Handbook of Industrial Drying*. Mujumdar AS, ed. Marcel Dekker, New York, NY, USA. p 133-155.
- Zogzas NP, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. 1996. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technol* 14: 2225-2253.
- Tütüncü AM, Labuza TP. 1996. Effect of geometry on the effective moisture transfer diffusion coefficient. *J Food Eng* 30: 433-447.
- Dissa AO, Desmorieux H, Savadogo PW, Segda BG, Kouliadiati J. 2010. Shrinkage, porosity and density behavior during convective drying of spirulina. *J Food Eng* 97: 410-418.
- Maskan A, Kaya S, Maskan M. 2002. Hot air and sun drying of grape leather. *J Food Eng* 54: 81-88.
- Moon JH, Kim MJ, Chung DH, Pan CH, Yoon WB. 2014. Drying characteristics of sea cucumber (*Stichopus japonicus Selenka*) using far infrared radiation drying and hot air drying. *J Food Process Preserv* 38: 1534-1546.
- Johnson PNT, Brennan JG, Addo-Yobo FY. 1998. Air-drying characteristics of plantain (*Musa AAB*). *J Food Eng* 37: 233-242.
- Srikiatden J, Roberts JS. 2006. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying. *J Food Eng* 74: 143-152.
- Rafiee S, Sharifi M, Keyhani A, Omid M, Jafari A, Mohtasebi SS, Mobli H. 2010. Modeling effective moisture diffusivity of orange slice (Thompson Cv.). *Int J Food Prop* 13: 32-40.
- Thuwapanichayanan R, Prachayawarakorn S, Kunwisawa J, Soponronnarit S. 2011. Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT—Food Sci Technol* 44: 1502-1510.
- Chua KJ, Chou SK. 2005. A comparative study between intermittent microwave and infrared drying of bioproducts. *Int J Food Sci Technol* 40: 23-39.
- Doymaz I. 2007. Air-drying characteristics of tomatoes. *J Food Eng* 78: 1291-1297.
- Shi J, Pan Z, McHugh TH, Wood D, Hirschberg E, Olson D. 2008. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *LWT—Food Sci Technol* 41: 1962-1972.
- Sharma GP, Verma RC, Pathare PB. 2005. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. *J Food Eng* 67: 361-366.
- Andrés A, Bilbao C, Fito P. 2004. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air-microwave dehydration. *J Food Eng* 63: 71-78.
- Hassini L, Azzouz S, Belghith A. 2004. Estimation of the moisture diffusion coefficient of potato during hot-air drying. Proceedings of the 14th International Drying Symposium. São Paulo City, Brazil. p 1488-1495.
- Kiranoudis CT, Maroulis ZB, Marinos-Kouris D. 1995. Heat and mass transfer model building in drying with multi-response data. *Int J Heat and Mass Transfer* 38: 463-480.
- Senadeera W, Bhandari BR, Young G, Wijesinghe B. 2003. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *J Food Eng* 58: 277-283.