

ENGINEERING

Microwave drying characteristics of squash slices

Dongyoung Lee¹, Jung Duk So², Hyun Mo Jung³, Sung Hyun Park¹, Seung Hyun Lee^{1,*}

¹Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Mechanical Systems Engineering, Jeonju University, Jeonju 55069, Korea

³Department of Digital Contents Design, Kyoungbuk Science College, Chilgok 39913, Korea

*Corresponding author: seunglee2@cnu.ac.kr

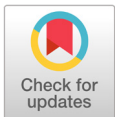
Abstract

Recently, customers' demand and attention to dried agricultural products or foods have increased due to their convenience and nutritional values. Conventional drying methods such as solar drying and hot air drying have been most widely used for producing a large amount of dried agricultural products; however, those methods require quite a long time and high energy consumption. To compensate for these issues associated with conventional methods, dielectric heating such as microwave and radio frequency heating has been used as a supplemental method in the drying procedure. This study investigated the microwave drying characteristics of squash slices with different thicknesses under different microwave power intensities and determined the best drying model that could precisely describe the experimental drying curves of the squash slices. The squash was cut into slices with two different thicknesses (5 and 10 mm), and then, they were dried under different microwave power intensity ranges between 90 and 900 W with an increase interval of 90 W. Six drying models were tested to evaluate the fit to the experimental drying data, and the effective moisture diffusivity (D_{eff}) values of the squash slices under microwave drying were determined. The results clearly show that as the microwave power was increased, the drying time of both squash slices was significantly decreased, and the slope of the drying rate increased. The effective moisture diffusivity was also significantly related with the microwave power intensities and thicknesses of the slices. In addition, the Page model was most suitable to delineate the drying curves of both squash slices under different microwave power intensities.

Keywords: diffusivity, drying model, effective moisture, microwave drying, squash

Introduction

국내에서 생산되는 호박 중 대부분은 애호박으로서 *moschata* 계통의 동양계 호박이며 보통 미숙한 과일 상태로 청과용으로 이용되고 있다(Lee and Yang, 1999). 애호박은 다양한 음식을 조리하기 위해 연중 소비 되는 품목이지만, 표면 강도가 약하여 수확 후 보관 중 손상되기가 쉽고 유통기한이 짧은 단점이 있다(Park et al., 2006). 애호박의 유통 중 손상을 방지하기 위해 재배 중 플라스틱 소



OPEN ACCESS

Citation: Lee D, So JD, Jung HM, Park SH, Lee SH. 2018. Microwave drying characteristics of squash slices. Korean Journal of Agricultural Science. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180091>

DOI: <https://doi.org/10.7744/kjoas.20180091>

Received: July 31, 2018

Revised: December 6, 2018

Accepted: December 6, 2018

Copyright: © 2018 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

재의 틀을 이용하여 애호박의 형태를 균일하게 하는 재배 방법을 사용하고 애호박의 보관 기간을 연장하기 위해 수확 후 저온 저장하거나 또는 애호박을 건조 가공하여 유통하고 있다.

농산물 및 식품 저장 방법 중 하나인 건조 방법은 농산물 및 식품을 효율적으로 장기간 동안 보존 가능하게 하는 방법이며, 식품을 건조하는 기본적인 목적은 고형물에서 미생물 손상이 없을 정도만 수분을 제거하는 것이다(Drouzas and Schubert, 1996). 또한, 건조 대상의 효소 활성, 향기, 풍미, 식품의 기호성과 같은 물리적, 생물학적 및 화학적 특성에 영향을 미친다(Dadali et al., 2007a).

Microwave 가열이란 높은 주파수(주로 915 MHz, 2.45 GHz)의 전자기파(교류 신호)가 농산물 및 식품 내부의 물 분자 및 이온과 빠르게 반응하여 물 분자 진동에 의한 마찰열 및 이온 전도(ionic conduction)에 의해 발생한 열로 인해 농산물 및 식품 내부를 빠르게 가열되고 열 손실이 적으며 (Zhang et al, 2017), microwave 파워(전력) 및 가열 시간 제어가 간편하고 복잡한 형상 또는 다양한 성분으로 구성되어 있는 식품도 비교적 균일하게 가열이 가능하다 (Lee et al., 2011). Microwave 가열은 식품 내부를 매우 빠르게 가열하기 때문에 농산물 및 식품의 건조 공정에 많이 사용되고 있다. 또한, microwave를 농산물 및 식품의 건조에 사용하였을 경우 농산물 및 식품의 색도와 비타민이 보존되며 다른 건조 장치와 비교하여 상대적으로 크기가 작은 장점이 있다. 피 건조물에 과도한 출력의 microwave를 사용 시 분자간 마찰로 세포 파괴 가능성이 있으며, 가열 속도에 따라 산화나 열화가 진행되는 단점이 있지만(Youn et al., 1997) 식품의 건조 시간 단축 및 품질 저하를 최소화 하기 위해서 microwave 건조가 많이 시행되는 추세이다. Microwave를 이용하여 감자(Darvishi, 2012), 감초(Balbay and Şahin, 2012), 당근(Arikan et al., 2012; Zhao et al., 2014), 두리안(Paengkanya et al., 2015), 버섯(Bhattacharya et al., 2015), 블루베리(Zielinska and Michalska, 2016), 사과(Zarein et al., 2015), 콩(Doymaz et al., 2015; Cao et al., 2017) 등을 건조하여 건조특성을 구명하는 많은 연구들이 수행되어졌다.

따라서, 본 연구는 microwave를 사용하여 애호박 건조 시 microwave 조건에 의한 건조 특성 변화를 평가하기 위해 수행되었으며, microwave 출력의 세기와 시료의 두께를 달리하여 건조 시간에 따른 건조의 수행 정도 및 건조 속도를 측정하여 최적의 microwave 건조 조건을 구명하고 microwave 건조 모델링을 제시하였다.

Material and Methods

실험재료

사용된 실험 재료는 2016년에 대전 노은동 농수산물시장에서 구입한 국내산 애호박으로, 실험 수행 전 하루 정도 실온에서 보관하였다. 시료 제작을 위해 애호박은 흐르는 깨끗한 물로 세척하여 채칼(One touch slicer pro, CHOP & CHOP Co., China)을 사용하여 5 mm와 10 mm의 슬라이스 시료로 제작하였다. 두께의 평균 오차 한계는 0.2 mm로 하였다. 한 실험 당 시료는 12개를 사용하였으며 테프론(두께: 1 ± 0.2 mm)으로 제조된 원형 메시 트레이 위에 놓고 microwave 건조하였다.

Microwave 건조 장치

본 연구에서는 microwave 건조 장치 제작을 위하여 2.45 GHz에서 최소 출력 90 W부터 최대 출력 900 W까지 10 단계로 출력 조절이 가능한 microwave 오븐 (Mwx304sl, Whirlpool Co., USA)를 사용하였다. 내부 microwave 챔버의 크기는 240 × 354 × 358 mm이며, 직경이 315 mm인 회전 유리판이 내부 챔버 중앙에 놓여져 있다. 애호박이 건조되는 과정 동안 증발되는 수분이 건조 챔버 내에서 응축되는 현상이 발생 할 수 있으므로 이를 방지 하기 위해 소형 환기 팬을 microwave 오븐 왼쪽 상단에 설치하였다.

중량 측정

5 및 10 mm 두께의 애호박 슬라이스 시료 12개를 원형 메쉬 트레이에 위치시킨 후 microwave 건조장치를 이용하여 건조하였으며 0.01 g의 정밀도를 가진 정밀 저울(PAG2102C, OHAUS Co., USA)을 사용하여 microwave 건조 과정 중 시료의 무게 변화를 측정하였다. 중량 측정 과정 중 외부 환경에 의한 영향으로 인한 샘플의 무게 변화를 방지하기 위하여 샘플의 무게 측정은 약 10초 이내에 완료되었다.

Microwave 건조 속도 및 박층 건조 모델

5 및 10 mm 두께의 애호박 슬라이스의 함수율(Moisture ratio, MR) 및 건조속도(Drying rate)은 다음 식에 의하여 계산되었다.

$$\text{Moisture ratio (MR)} = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \tag{1}$$

$$\text{Drying rate} = \frac{M_{t+dt} - M_t}{dt} \tag{2}$$

위 식에서, M_t : 시간 t 에서의 수분함량(%), M_o : 초기수분함량(%), M_e : 평형수분함량(%), M_{t+dt} : $t + dt$ 에서의 수분함량(%)을 나타낸다. 여기서 t 는 시간 (min)을 나타낸다.

애호박 슬라이스 시료(5 mm 및 10 mm)의 건조 곡선을 가장 잘 묘사하는 모델을 선택하기 위해 총 6가지의 건조 모델을 본 연구에서는 적용하였다 (Table 1).

적용된 모델들의 변수를 추정하기 위해 비선형 회귀 분석은 SPSS 24.0 소프트웨어(SPSS Inc, Chicago, IL, USA)를 사용하여 수행되었다. 또한 적용된 건조 모델의 적합성을 평가하기 위한 통계 비교 지수인 결정 계수(R^2), 카이 제곱(χ^2) 및 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE)를 사용하였으며, 모델의 적합성은 R^2 값이 높고 χ^2 와 RMSE 값은 낮을수록 높은 적합성을 나타낸다 (Arumuganathan et al., 2009). χ^2 와 RMSE는 다음과 같은 식으로 계산되었다.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{N - z} \tag{3}$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

여기서 매개 변수 $MR_{exp,i}$ 는 i 의 함수율, $MR_{pre,i}$ 는 i 의 예상 함수율, N 은 관측 수를 나타낸다.

Table 1. Drying models applied to fit with drying curves of squash slices.

Model name	Drying model	Reference
Newton	$MR = \exp(-kt)$	O'Callaghan et al. (1971)
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Page (1949)
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Henderson and Pabis (1961)
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	Yagcioglu et al. (1999)
Modified Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) + c \exp(-ht)$	Karathanos and Belessiotis (1999)
Two - Term	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-k_0t)$	Madamba et al. (1996)

Microwave 건조의 유효수분확산도

유효 수분 확산 계수(D_{eff})는 재료의 성분, 온도 및 수분 함량의 영향을 받으며 건조 공정 중 수분 전달을 보여주는 지표이다(Park et al., 2015). Microwave 건조에 따른 애호박 슬라이스 시료의 유효 수분확산도를 구하기 위해 Fick's 확산 법칙 중 Fick's second law을 사용하였다. 또한 유효 수분확산도는 시료의 형상에 따라 달라질 수 있으므로 애호박 시료를 평판 형태로 고려하여 아래와 같은 식을 사용하여 계산하였다.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(-\frac{D_{eff}(2n-1)^2\pi^2}{4L^2}t\right) \quad (5)$$

위 식에서 D_{eff} 는 유효 수분 확산 계수(m^2/s), t 는 건조 시간(s), L 은 시편 두께의 절반(m)이다. 만약, 건조 시간이 길 경우 위 식의 $n=1$ 인 첫 항만을 취하여 아래 식과 같이 간단한 형태로 바뀐다(Wang et al., 2007).

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{D_{eff}\pi^2 t}{4L^2} \quad (6)$$

Results and Discussion

애호박의 microwave 건조 특성

Fig. 1과 Fig. 2는 애호박 두께 5 및 10 mm 슬라이스 시료의 microwave 출력에 따른 건조 곡선을 나타내고 있다. Microwave 건조 과정 중 애호박 편 무게는 높은 출력에서 낮은 출력으로 갈수록 출력에 따른 함수율이 같아질 때까지 건조 처리 시간이 유의적으로 증가하였다. 5 mm 애호박 시편의 경우 최대 출력 900 W의 경우엔 9분이, 최소 출력 90 W의 경우 500분이 소요되었으며, 최대 출력과 최소 출력 사이의 소요 시간은 약 55배 정도 차이가 있었다. 10 mm 애호박 시편의 경우 최대 출력 900 W의 경우엔 17분이, 최소 출력 90 W의 경우 600분이 소요되었으며, 최대 출력과 최소 출력 사이의 소요 시간은 약 35배 정도 차이 남을 확인할 수 있었다.

시편의 두께와 상관 없이 900 W에서 180 W까지는 건조 곡선이 가파른 형상을 보였으며, 최소 출력인 90 W에서 높은 출력에서의 건조 곡선과 다른 형상의 원만한 곡선이 확인되었다. Darvishi (2012)에 따르면 감자 편을 microwave 건조 시

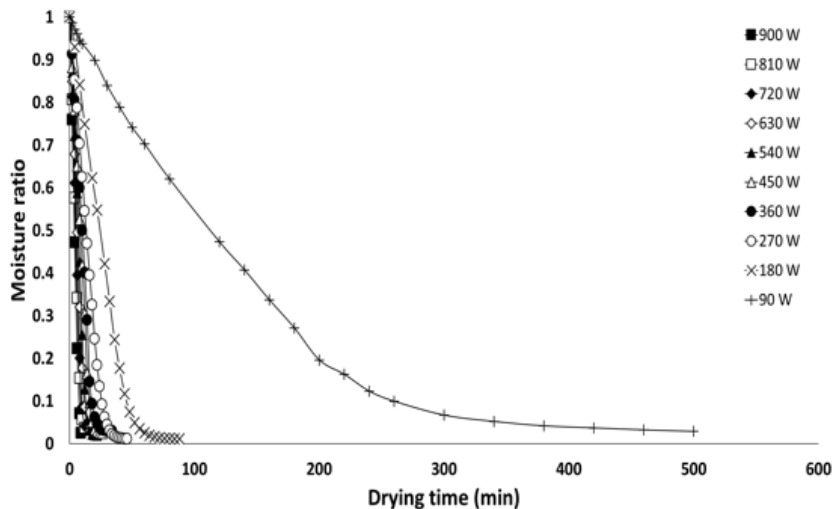


Fig. 1. Change in moisture ratio of 5 mm squash slices dried at different microwave power intensities.

microwave 출력이 높을수록 건조시간이 단축됨을 보고하였다. 본 연구에서도 유사한 결과로 건조 시간이 경과 함에 따라 수분 함량이 감소 하였으며, microwave 출력이 강할 수록 건조시간이 단축되는 것을 확인하였다. 하지만, 90W 및 180 W 를 제외한 microwave 출력에서 애호박 편 시료는 최종 건조 과정 진행 중 또는 건조 말기에 탄화 현상이 발생하였다. Microwave 출력에 따른 바나나 건조(350, 490 및 700 W)실험에서 490 W와 700 W 출력 시 시료의 탄화현상으로 인해 350 W 출력을 선정하였고(Maskan, 2000), 당근의 microwave 건조에서 300 W 이하의 출력을 적용하였다(Prabhanjan et al. 1995).

Fig. 3 및 Fig. 4는 microwave의 출력에 따른 5 및 10 mm 두께의 애호박 슬라이스 시료의 건조속도를 나타내고 있다. 애 호박의 두께와 상관없이 모든 microwave 출력에서, 건조속도가 시료의 수분함량이 높은 초기에 증가한 후 수분함량은 감 소하지만 건조속도가 일정한 항률 건조 기간(constant rate period)과 수분함량이 감소함에 따라 건조속도가 감소하는 감률 건조기간(falling rate period)을 나타내었다. 하지만, 두께에 따라 건조속도를 비교한 결과 900 W의 마이크로파 출력에서 5 mm 애호박 슬라이스의 최대 건조속도가 0.136인 반면 10 mm 두께에서의 최고 값은 0.74로 약 1.8배 정도의 차이를 보였 으며 두께가 두꺼울 수록 최대 건조속도는 감소하였다.

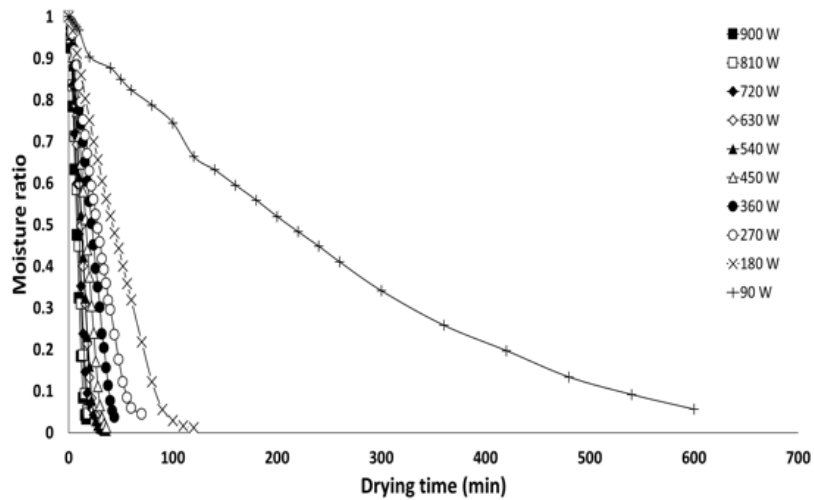


Fig. 2. Change in moisture ratio of 10 mm squash slices dried at different microwave power intensities.

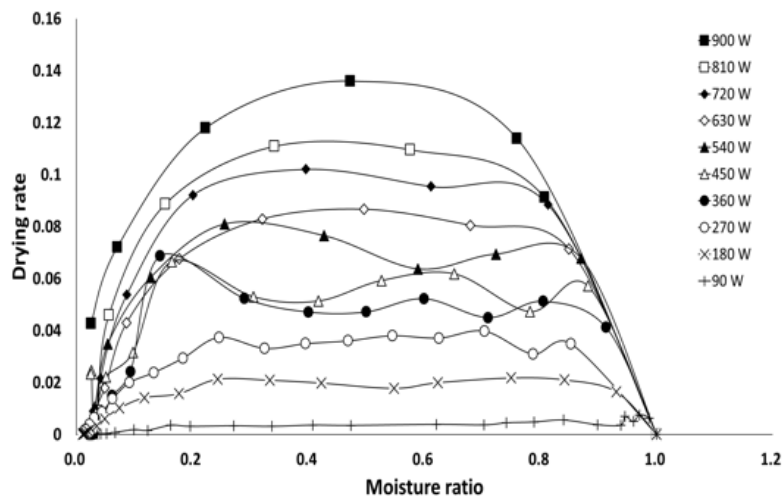


Fig. 3. Drying rate of 5 mm squash slices under different microwave intensities.

박층 건조 모델

Microwave 출력과 시편의 두께에 따라 건조 실험 결과 얻은 데이터를 SPSS 통계분석프로그램을 이용하여 비선형 회귀 분석한 결과(통계비교지수)를 Table 2와 Table 3에 나타냈다. 모든 박층 건조 모델은 애호박 시료의 두께 및 microwave의 출력에 관계없이 애호박 슬라이스 시료의 건조 특성을 나타내는데 적합하였다. 애호박 5 mm에서 microwave 출력에 따른 건조 곡선 예측 모델 중 Page 모델이 가장 높은 R²값(> 0.99)과 가장 낮은 RMSE 값(< 0.029)과 χ^2 값(< 0.0008)을 나타냈다. 또한, 애호박 10 mm에서 결과 역시 Page 모델이 가장 높은 R²값(> 0.99)과 가장 낮은 RMSE 값(< 0.029)과 χ^2 값(< 0.0008)이 나

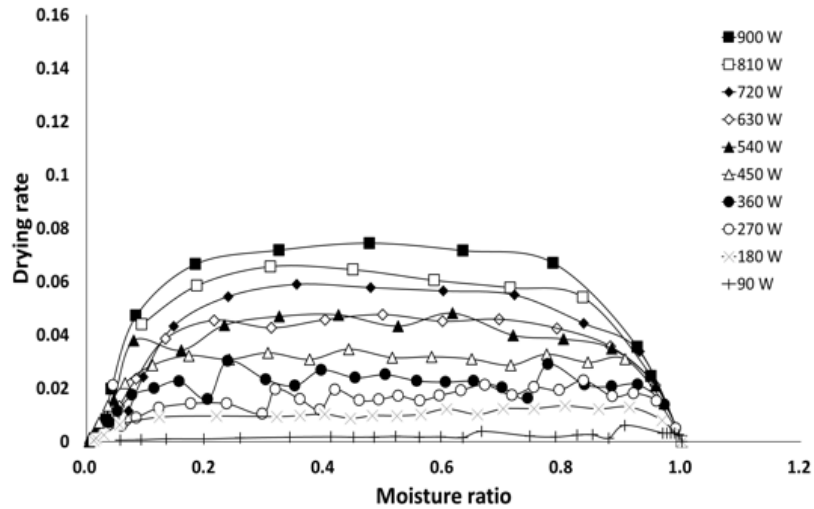


Fig. 4. Drying rate of 10 mm squash slices under different microwave intensities.

Table 2. Drying models used for describing drying curves of 5 mm squash slices under different microwave power intensities.

Model		Microwave power (W)									
		90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
Newton	R ²	0.9917	0.9531	0.9427	0.9450	0.9457	0.9416	0.9503	0.9533	0.9491	0.9473
	RMSE	0.0348	0.0739	0.0765	0.0813	0.0823	0.0882	0.0812	0.0806	0.0858	0.0902
	χ^2	0.0012	0.0055	0.0058	0.0066	0.0068	0.0078	0.0066	0.0065	0.0074	0.0081
Page	R ²	0.9975	0.9962	0.9967	0.9934	0.9948	0.9952	0.9982	0.9976	0.9982	0.9980
	RMSE	0.0193	0.0215	0.0187	0.0290	0.0266	0.0264	0.0167	0.0199	0.0176	0.0194
	χ^2	0.0004	0.0005	0.0003	0.0008	0.0007	0.0007	0.0003	0.0004	0.0003	0.0004
Henderson and Pabis	R ²	0.9928	0.9654	0.9584	0.9581	0.9573	0.9529	0.9599	0.9607	0.9567	0.9532
	RMSE	0.0331	0.0650	0.0667	0.0731	0.0760	0.0831	0.0780	0.0798	0.0867	0.0950
	χ^2	0.0011	0.0042	0.0044	0.0053	0.0058	0.0069	0.0061	0.0064	0.0075	0.0090
Logarithmic	R ²	0.9947	0.9807	0.9804	0.9724	0.9810	0.9761	0.9884	0.9853	0.9870	0.9952
	RMSE	0.0290	0.0498	0.0469	0.0612	0.0529	0.0624	0.0452	0.0535	0.0530	0.0351
	χ^2	0.0008	0.0025	0.0022	0.0038	0.0028	0.0039	0.0020	0.0029	0.0028	0.0012
Two-Term	R ²	0.9956	0.9833	0.9829	0.9751	0.9573	0.9529	0.9892	0.9864	0.9878	0.9954
	RMSE	0.0271	0.0476	0.0449	0.0603	0.0832	0.0929	0.0478	0.0576	0.0594	0.0422
	χ^2	0.0007	0.0023	0.0020	0.0036	0.0069	0.0086	0.0023	0.0033	0.0035	0.0018
Modified Henderson and Pabis	R ²	0.9985	0.9832	0.9828	0.9749	0.9573	0.9529	0.9892	0.9863	0.9876	0.9953
	RMSE	0.0166	0.0507	0.0477	0.0653	0.0931	0.1073	0.0619	0.0817	0.1035	0.0361
	χ^2	0.0003	0.0026	0.0023	0.0043	0.0087	0.0115	0.0038	0.0067	0.0107	0.0013

R², coefficient of determination; RMSE, root mean square error; χ^2 , reduced chi-square.

타났다. 또한, Page 모델의 통계분상수를 Table 4에 나타내었다. Page 모델이 애호박의 건조 곡선이 가장 정확하게 나타내었으며 식의 형태가 단순하여 애호박의 건조 특성을 잘 나타낼 수 있는 적합성을 가졌음을 확인하였다. 이외에도, 파슬리 (Soysal, 2004), 캐슈넛(Asiru, 2013), 포도(Kassem et al., 2011; Adiletta et al., 2016), 마늘(Sharma and Prasad, 2001)의 박층 건조 특성을 나타내는데 Page 모델이 적합하였다.

유효 수분 확산도

유효 수분 확산도를 구하기 위해 건조 실험 후 계산된 MR 데이터에 자연 로그를 취하여 MR 대수를 시간에 따른 그래프로 나타내어 그래프에서의 기울기를 이용하여 5 및 10 mm 애호박 슬라이스 시료의 유효 수분 확산도를 추정하였으며 추정된 값은 Table 5에 나타내었다.

Table 3. Drying models used for describing drying curves of 10 mm squash slices under different microwave power intensities.

Model		Microwave power (W)									
		90	180	270	360	450	540	630	720	810	900
Newton	R^2	0.9921	0.9531	0.9550	0.9211	0.9176	0.9232	0.9123	0.9300	0.9025	0.9136
	RMSE	0.0276	0.0698	0.0674	0.0975	0.1025	0.1001	0.1029	0.0937	0.1134	0.1089
	χ^2	0.0008	0.0049	0.0045	0.0095	0.0105	0.0100	0.0106	0.0088	0.0129	0.0119
Page	R^2	0.9968	0.9926	0.9968	0.9934	0.9941	0.9974	0.9972	0.9980	0.9975	0.9980
	RMSE	0.0178	0.0284	0.0183	0.0288	0.0281	0.0190	0.0193	0.0164	0.0191	0.0175
	χ^2	0.0003	0.0008	0.0003	0.0008	0.0008	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003
Henderson and Pabis	R^2	0.9926	0.9663	0.9732	0.9441	0.9413	0.9453	0.9375	0.9492	0.9274	0.9339
	RMSE	0.0272	0.0607	0.0530	0.0835	0.0885	0.0866	0.0904	0.0833	0.1031	0.1011
	χ^2	0.0007	0.0037	0.0028	0.0070	0.0078	0.0075	0.0082	0.0069	0.0106	0.0102
Logarithmic	R^2	0.9990	0.9944	0.9837	0.9808	0.9803	0.9698	0.9901	0.9826	0.9887	0.9881
	RMSE	0.0103	0.0253	0.0421	0.0497	0.0525	0.0660	0.0375	0.0512	0.0431	0.0459
	χ^2	0.0001	0.0006	0.0018	0.0025	0.0028	0.0044	0.0014	0.0026	0.0019	0.0021
Two-Term	R^2	0.9990	0.9949	0.9858	0.9441	0.9413	0.9728	0.9903	0.9833	0.9888	0.9883
	RMSE	0.0102	0.0249	0.0401	0.0864	0.0928	0.0643	0.0391	0.0528	0.0459	0.0491
	χ^2	0.0001	0.0006	0.0016	0.0075	0.0086	0.0041	0.0015	0.0028	0.0021	0.0024
Modified Henderson and Pabis	R^2	0.9990	0.9948	0.9972	0.9441	0.9413	0.9727	0.9901	0.9831	0.9887	0.9881
	RMSE	0.0108	0.0266	0.0186	0.0897	0.0978	0.0684	0.0440	0.0603	0.0546	0.0605
	χ^2	0.0001	0.0007	0.0003	0.0080	0.0096	0.0047	0.0019	0.0036	0.0030	0.0037

R^2 , coefficient of determination; RMSE, root mean square error; χ^2 , reduced chi-square.

Table 4. Estimated parameters of Page model at different thicknesses and microwave power.

Microwave power (W)	5 mm		10 mm	
	k	n	k	n
90	0.0026	1.2016	0.0016	1.1467
180	0.0045	1.6077	0.0032	1.4540
270	0.0117	1.6062	0.0051	1.4936
360	0.0168	1.6576	0.0031	1.7732
450	0.0230	1.6241	0.0046	1.8247
540	0.0269	1.7114	0.0061	1.9060
630	0.0420	1.6021	0.0079	1.8231
720	0.0559	1.6019	0.0144	1.7351
810	0.0592	1.6426	0.0101	1.9311
900	0.0781	1.6678	0.0161	1.8716

k, drying constant (min^{-1}); n, dimensionless drying constant.

Table 5. Effective moisture diffusivity (D_{eff}) of squash slices for microwave drying conditions.

Microwave power (W)	Thickness (mm)	slope	D_{eff} (m^2/s)	R^2
90	5	0.0002	5.07×10^{-10}	0.9894
	10	0.0001	1.01×10^{-9}	0.9770
180	5	0.0010	2.53×10^{-9}	0.9397
	10	0.0006	6.08×10^{-9}	0.9197
270	5	0.0019	4.81×10^{-9}	0.9416
	10	0.0007	7.09×10^{-9}	0.9493
360	5	0.0021	5.32×10^{-9}	0.9425
	10	0.0014	1.42×10^{-8}	0.9362
450	5	0.0028	7.09×10^{-9}	0.9578
	10	0.0022	2.23×10^{-8}	0.9211
540	5	0.0037	9.37×10^{-9}	0.9558
	10	0.0026	2.63×10^{-8}	0.9547
630	5	0.0039	9.88×10^{-9}	0.9637
	10	0.0021	2.13×10^{-8}	0.9247
720	5	0.0044	1.11×10^{-8}	0.9643
	10	0.0024	2.43×10^{-8}	0.9556
810	5	0.0049	1.24×10^{-8}	0.9583
	10	0.0029	2.94×10^{-8}	0.9197
900	5	0.0066	1.67×10^{-8}	0.9174
	10	0.0033	3.34×10^{-8}	0.9103

R^2 , coefficient of determination.

애호박 시료의 두께 차이와 관계 없이 microwave 출력이 증가함에 따라 slope와 D_{eff} 가 증가하는 것을 확인하였다. R^2 의 경우 출력이 작을수록 값이 커지는 추세를 보였다. 5 mm의 애호박 편은 경우 5.07×10^{-10} 에서 1.67×10^{-8} (m^2/s)까지 출력에 따라 차이를 보였으며, 10 mm 애호박 편 시료의 경우 1.01×10^{-9} 에서 3.34×10^{-8} (m^2/s)의 범위로 나타났다. 동일한 microwave 출력에서 시료의 두께가 두꺼울수록 D_{eff} 가 높게 나타난 것을 알 수 있다. 농산물 및 식품의 건조에서 일반적인 유효확산도는 10^{-12} 에서 10^{-8} 또는 10^{-6} (m^2/s) 범위로 알려져 있고 (Harish et al., 2014; Doymaz et al., 2015), 실제 microwave 건조에서 무(Lee et al. 2018)의 D_{eff} 는 2.907×10^{-9} 에서 1.215×10^{-8} (m^2/s), 시금치(Dadali et al., 2007b)의 D_{eff} 는 1.99×10^{-10} 에서 5.24×10^{-10} (m^2/s), 캐모마일(Motevali et al., 2016)의 D_{eff} 는 5.46×10^{-8} 에서 3.96×10^{-7} (m^2/s) 범위에서 microwave 출력과 두께가 증가할수록 D_{eff} 는 증가함을 보고하였다. 결과적으로 microwave의 출력 세기와 시료의 두께가 D_{eff} 값과 관련이 있음을 확인하였다.

Conclusion

본 연구 결과 microwave 출력 세기가 건조 속도에 유의한 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. Microwave의 출력 세기가 높을수록 초기 수분 손실이 높아 건조 곡선이 가파르게 나타나는 현상을 확인할 수 있었으며, 이는 microwave 특성인 내부 가열이 먼저 진행됨에 따라 중심에서 외부로 수분 전달을 빠르게 한 것으로 평가되었다. 또한, 애호박 시료의 두께 차이에 관계 없이 microwave 출력 900 W에서 270 W까지 애호박 건조에 소요되는 시간은 큰 차이를 보이지 않은 것으로 확인하였지만, 180 W의 경우 50분이 더 소요 되었고, 90 W의 경우 100분이 더 소요됨을 확인 하였다

Microwave 출력이 고출력이며, 두께가 얇을수록 건조 소요시간은 작았지만, 시료 표면에 상분해 가치가 떨어지는 탄화 현상이 관찰 되었다. 따라서 애호박의 건조 시간은 단축 시키면서 탄화 현상이 발생하지 않아 제품의 품질을 향상시킬

수 있는 microwave 출력 180 W 건조하는 것이 식품 산업에 이용이 가능한 최적의 방법으로 생각된다.

Acknowledgements

본 연구는 2016년 충남대학교 학술 연구 지원 사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었다.

References

- Adiletta G, Russo P, Senadeera W, Di Matteo M. 2016. Drying characteristics and quality of grape under physical pretreatment. *Journal of Food Engineering* 172:9-18.
- Arikan MF, Ayhan Z, Soysal Y, Esturk O. 2012. Drying characteristics and quality parameters of microwave-dried grated carrots. *Food and Bioprocess Technology* 5:3217-3229.
- Arumuganathan T, Manikantan MR, Rai RD, Anandakumar S, Khare V. 2009. Mathematical modeling of drying kinetics of milky mushroom in a fluidized bed dryer. *International Agrophysics* 23:1-7.
- Asiru WB, Raji AO, Igbeka JC, Elemo GN. 2013. Mathematical modelling of thin layer dried cashew kernels. *Nigerian Food Journal* 31:106-112.
- Balbay A, Şahin Ö. 2012. Microwave drying kinetics of a thin-layer liquorice root. *Drying Technology* 30:859-864.
- Bhattacharya M, Srivastav PP, Mishra HN. 2015. Thin-layer modeling of convective and microwave-convective drying of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Food Science and Technology* 52:2013-2022.
- Cao X, Zhang M, Fang Z, Mujumdar AS, Jiang H, Qian H, Ai H. 2017. Drying kinetics and product quality of green soybean under different microwave drying methods. *Drying Technology* 35:240-248.
- Dadali G, Kılıç Apar D, Özbek B. 2007a. Microwave drying kinetics of okra. *Drying Technology* 25:917-924.
- Dadali G, Demirhan E, Özbek B. 2007b. Microwave heat treatment of spinach: drying kinetics and effective moisture diffusivity. *Drying Technology* 25:1703-1712.
- Darvishi H. 2012. Energy consumption and mathematical modeling of microwave drying of potato slices. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 14:94-102.
- Doymaz I, Kipcak AS, Piskin S. 2015. Microwave drying of green bean slices: Drying kinetics and physical quality. *Czech Journal of Food Science* 33:367-376.
- Drouzas AE, Schubert H. 1996. Microwave application in vacuum drying of fruits. *Journal of Food Engineering* 28:203-209.
- Harish A, Vivek BS, Sushma R, Monisha J, Krishna Murthy TP. 2014. Effect of microwave power and sample thickness on microwave drying kinetics elephant foot yam (*Amorphophallus Paeoniifolius*). *American Journal of Food Science and Technology* 2:28-35.
- Henderson SM, Pabis S. 1961. Grain drying theory II: Temperature effects on drying coefficients. *Journal of Agricultural Engineering Research* 6:169-174.

- Karathanos VT, Belessiotis VG. 1999. Application of a thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. *Journal of Agricultural Engineering Research* 74:355-361.
- Kassem AS, Shokr AZ, El-Mahdy AR, Aboukarima AM, Hamed EY. 2011. Comparison of drying characteristics of Thompson seedless grapes using combined microwave oven and hot air drying. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 10:33-40.
- Lee D, So JD, Jung HM, Mo C, Lee SH. 2018. Investigation of drying kinetics and color characteristics of white radish strips under microwave drying. *Journal of Biosystems Engineering* 43:237-246.
- Lee HS, Oh KJ, Gu JD, Lee JS. 2011. A study on drying characteristics of food sludge using microwave. *The Korean Society of Mechanical Engineers* 2011:260-267. [in Korean]
- Lee KA, Yang YJ. 1999. Effect of chemical treatment on reduction of chilling injury and physiological change during cold storage of squash (*Cucurbita moschata*). *Horticulture Environment and Biotechnology* 40:669-672. [in Korean]
- Madamba PS, Driscoll RH, Buckle KA. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering* 29:75-97.
- Maskan M. 2000. Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering* 44:71-78.
- Motevali A, Minaei S, Banakar A, Ghobadian B, Darvishi H. 2016. Energy analyses and drying kinetics of chamomile leaves in microwave-convective dryer. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 15:179-187.
- O'callaghan JR, Menzies DJ, Bailey PH. 1971. Digital simulation of agricultural drier performance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 16:223-244.
- Paengkanya S, Soponronnarit S, Nathakarakule A. 2015. Application of microwaves for drying of durian chips. *Food and Bioproducts Processing* 96:1-11.
- Page GE. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis. Purdue Univ., Purdue, USA.
- Park KS, Huh YC, Lee HE, Park DK. 2006. Effect of plastic bagging cultivation of squash (*Cucurbita moschata*) on yield and uniformity, quality change during storage. *Journal of Bio Environment Control* 15:387-390. [in Korean]
- Park HW, Han WY, Yoon WB. 2015. Effect of grain size and drying temperature on drying characteristics of soybean (*Glycine max*) using hot air drying. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition* 44:1700-1707.
- Prabhanjan DG, Ramaswamy HS, Raghavan GV. 1995. Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. *Journal of Food Engineering* 25:283-293.
- Sharma GP, Prasad S. 2001. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering* 50:99-105.
- Soysal Y. 2004. Microwave drying characteristics of parsley. *Biosystems Engineering* 89:167-173.

- Wang Z, Sun J, Liao X, Chen F, Zhao G, Wu J, Hu X. 2007. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International* 40:39-46.
- Yagcioglu A, Degirmencioglu A, Cagatay F. 1999. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy* 565-569.
- Youn KS, Bae DH, Choi YH. 1997. Effect of pretreatments on the drying characteristics of dried vegetables. *Korean Journal of Food Science and Technology* 29:292-301. [in Korean]
- Zarein M, Samadi SH, Ghobadian B. 2015. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 14:41-47.
- Zhang M, Bhandari B, Fang Z. 2017. *Handbook of drying of vegetables and vegetable products*. pp. 45-47. ISBN: 978-1-4987-5386-9 (Hardback), CRC press, USA.
- Zhao D, An K, Ding S, Liu L, Xu Z, Wang Z. 2014. Two-stage intermittent microwave coupled with hot-air drying of carrot slices: Drying kinetics and physical quality. *Food and Bioprocess Technology* 7:2308-2318.
- Zielinska M, Michalska A. 2016. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture. *Food Chemistry* 212:671-680.