

Moisture sorption isotherms of corn powder as affected by roasting temperature

Hun-Sik Chung¹, Kwang-Sup Youn^{2*}

¹Department of Food Science and Technology, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea

²Department of Food Science and Technology, Catholic University of Daegu, Gyeongsan 712-702, Korea

볶음온도에 따른 옥수수 분말의 흡습특성

정현식¹ · 윤광섭^{2*}

¹부산대학교 식품공학과, ²대구가톨릭대학교 식품공학전공

Abstract

The moisture sorption isotherms of corn powder prepared from corn kernels roasted for 20 min at 160, 180, 200, 220, and 240 °C were determined at 20 °C using the static gravimetric method over the range of water activities (a_w) of 0.11~0.90. The moisture sorption isotherms showed a typical sigmoid shape, and the equilibrium moisture content tended to increase with increasing a_w , and increased sharply at above 0.75 a_w . At above 0.53 a_w , the equilibrium moisture content of the roasted corn powder increased with the increase in the roasting temperature. Six mathematical models (Bradley, Caurie, Halsey, Henderson, Kuhn, and Oswin) were used to fit the experimental data. The Oswin, Caurie, Henderson, and Halsey models were found to have suitability for describing the sorption curves, and the Oswin model was the best fit model for all the roasting temperatures. Concerning the monolayer moisture content, the Guggenheim-Anderson-Boer (GAB) equation showed high significance. The monolayer moisture content increased as the roasting temperature was increased, to 0.043 and 0.053 kg H₂O/kg solids in the corn powder roasted at 180 °C and 240 °C, respectively. These results suggest that the roasting temperatures of the corn kernels affected the moisture sorption characteristics (20 °C) of the corn powder.

Key words : com, roasting, sorption isotherm, monolayer moisture content, water activity

서 론

옥수수는 밀, 쌀과 더불어 세계 3대 곡물 중에 하나이며, 식품용으로는 steaming, boiling, grilling, puffing, milling, roasting 등의 처리를 거친 후 직접 소비되거나 전분, 옥배유, 에탄올 등과 같은 2차 가공품 제조에 이용된다. 이중 볶음 처리한 옥수수는 열수 추출 음료나 분말화하여 가공식품 원료로 이용되고 있어 이의 품질관리와 활용성 증대에 관한 연구가 필요한 실정이다. 일반적으로 볶음처리는 식품의 품질 개선과 변화, 유통기한 연장 및 가공효율성 개선 등의 효과를 가지며, 이러한 효과는 볶음 조건 중 온도와 시간의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다(1). 볶음처리의 영향

으로는, 옥수수에서 phenolic compounds의 증가효과(1), *Cassia occidentalis*에서 탄수화물과 탄닌(2), *Perilla frutescens*에서 단백질(3), 콩에서 방향성분(4), hazelnuts에서 riboflavin, thiamine, lysine 등(5), pistachio nuts에서 chlorogenic acid, caffeic acid, aflatoxins 등(6,7)의 감소효과가 각각 보고된바 있다. 또한 커피콩과 참깨의 갈변도 증가와 조직 약화효과(8,9), 땅콩의 산화안정성 향상효과(10), cocoa butter의 추출수율 증대효과(11) 등에 관한보고도 있다. 그러나 볶음처리가 식품의 흡습특성에 미치는 영향에 관한 연구는 미미한 실정이다.

식품의 흡습특성은 가공 및 저장 공정에서 품질관리의 중요한 지표인데, 식품 자체특성과 환경조건에 의해 결정되며 수분활성도(water activity, a_w)와 평형수분함량(equilibrium moisture content, EMC)의 관계를 나타내는 등온흡습곡선(moisture sorption isotherms)으로 설명할 수 있

*Corresponding author. E-mail : ksyoun@cu.ac.kr
Phone : 82-53-850-3209, Fax : 82-53-850-3209

다(12). 등온흡습곡선은 식품의 물리적 구조, 화학적 성분 조성 및 수분결합능 등에 의존적이어서 식품별 고유한 형태를 보이며, 특히 저수분 함량 식품에 적합한 가공 및 저장 공정 설계에 유용한 정보를 제공한다. 이러한 등온흡습곡선을 해석하여 식품의 흡습특성을 파악한 연구로는, 건조 방법에 따른 사과, 생강, 복분자의 흡습특성(12-14), 저장 조건에 따른 마늘의 흡습특성(15), 그리고 건포도, 무화과, 자두 및 살구(16), 감자(17), 양파(18)의 흡습특성 구명과 같은 다수의 보고가 있으나, 볶음조건이 옥수수 분말을 포함한 식품의 흡습특성에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 볶은 옥수수 분말의 제조와 저장 공정 중 품질 관리의 지표로 활용할 수 있는 흡습특성을 구명하기 위하여, 볶음온도에 따른 등온흡습곡선 작성과 흡습거동 예측기능 모델 설정 및 볶음온도가 단분자층 수분 함량에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

재료

실험용 옥수수(*Zea mays* var. *indurata* L.)는 경북 상주산을 구입하여 낱알을 분리하고 크기가 균일하고 건전한 것만 선별하여 사용하였다. 옥수수 낱알의 수분함량은 약 13%이었고, 100립중은 약 35 g이었다.

볶음처리

옥수수의 볶음처리는 시료 500 g을 미리 예열 및 온도 조정된 볶음기(DR-1, Taehwan Automation Industry Co., Seoul, Korea)의 드럼 내에 넣고 80 rpm의 속도로 회전시키면서 실시하였다. 이때 볶음온도는 160, 180, 200, 220, 240°C로 각각 구분하고, 볶음시간은 20분으로 고정하였다. 볶음이 완료되면 즉시 시료를 드럼에서 꺼내서 실온까지 냉각시킨 다음 플라스틱 봉지로 밀봉포장하여 보관하였다. 흡습실험 전 볶은 옥수수 낱알을 분쇄, 체질(20 mesh)하여 분말을 제조한 후 사용하였다.

등온흡습실험

옥수수 분말의 평형수분함량은 static gravimetric method로 측정하였다(14). 즉, 시료 0.2 g을 칭량접시에 담아 20°C로 유지되는 수분활성도 측정기(Thermoconstanter, TH200, Novasina, Swiss) 내에 넣고 포화염용액으로 내부의 수분활성도가 0.11, 0.33, 0.53, 0.75, 0.90이 되도록 조정한 후 각 수분활성도에서 시료의 중량변화가 없을 때까지 정지한 후 105°C 상압가열건조법으로 평형수분함량을 측정하였다. 이의 결과로 수분활성도에 따른 평형수분함량의 변화를 나타내는 등온흡습곡선을 작성하였다.

등온흡습 모델의 적합성 검증

옥수수 분말의 수분활성도와 평형수분함량과의 관계를 기존에 알려진 아래와 같은 6가지 모델(19-24)과의 적합성을 회귀분석 하여 검증하였다.

$$\text{Bradley model, } \ln \frac{1}{a_w} = K_2 K_1^M$$

$$\text{Caurie model, } \ln M = \ln A - r a_w$$

$$\text{Halsey model, } a_w = \exp\left(-\frac{a}{M^n}\right)$$

$$\text{Henderson model, } 1 - a_w = \exp(-KM^n)$$

$$\text{Kuhn model, } M = \frac{a}{\ln a_w} + b$$

$$\text{Oswin model, } M = a \left(\frac{a_w}{1 - a_w}\right)^n$$

여기서, M은 평형수분함량이고, a_w 는 수분활성도이며, 그 외 알파벳은 실험상수이다.

각 모델의 적합도는 회귀계수(R^2)와 아래 식으로 정의되는 편차(mean relative percentage deviation modules, P)를 이용하여 평가하였다.

$$P(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i}$$

여기서, M_i 는 실측 평형수분함량이고, M_{pi} 는 모델 예측 평형수분함량이며, n은 데이터수이다.

단분자층 수분함량 계산

옥수수 분말의 단분자층 수분함량은 아래와 같은 Brunauer-Emmett-Teller(BET) equation(25)과 Guggenheim-Anderson-Boer(GAB) equation(26)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{BET equation, } \frac{a_w}{M(1 - a_w)} = \frac{1}{M_1 C} + \frac{C - 1}{M_1 C} a_w$$

$$\text{GAB equation, } M = \frac{M_1 C k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C k a_w)}$$

여기서, a_w 는 수분활성도, M은 평형수분함량, M_1 는 단분자층 수분함량 그리고 C와 k는 실험상수이다.

결과 및 고찰

등온흡습곡선

옥수수의 볶음온도별 20°C 보관 분말의 수분활성도와

평형수분함량의 관계를 나타내는 등온흡습곡선은 Fig. 1과 같다. 볶은 옥수수 분말의 등온흡습곡선의 전체적인 모형은 일반적인 식품의 등온흡습곡선(14-18)과 유사한 전형적인 sigmoid 형태를 보였다. 볶은 옥수수 분말의 평형수분함

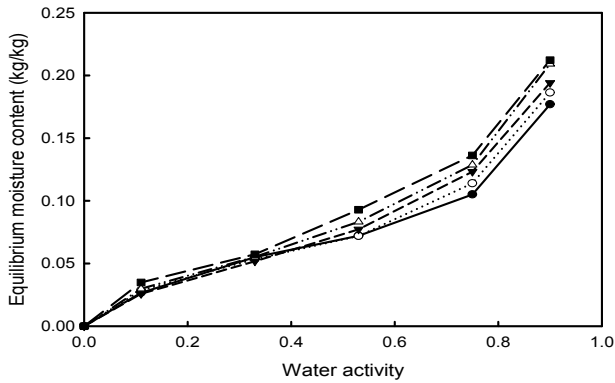


Fig. 1. Experimental sorption isotherms for corn powder in relation to roasting temperature.
●, 160°C; ○, 180°C; ▼, 200°C; △, 220°C; ■, 240°C.

량은 수분활성도가 증가함에 따라 증가하였으며, 특히 수분활성도 0.75 이상부터 급격하게 증가함을 보였다. 이러한 평형수분함량의 급증결과는 복분자 건조분말의 결과와 유사하였다(12). 평형수분함량에 미치는 볶음온도의 영향은 수분활성도 0.53 이상부터 나타나기 시작하였으며, 동일 수분활성도에서 볶음온도가 높은 분말일수록 높은 평형수분함량을 나타내었다. 즉, 수분활성도가 0.75와 0.9일 때 볶음온도 160, 180, 200, 220, 240°C에서의 평형수분함량은 각각 0.105, 0.114, 0.123, 0.129, 0.136 kg/kg과 0.177, 0.186, 0.194, 0.209, 0.212 kg/kg이었다. 이러한 결과는 볶음온도가 높을수록 옥수수의 벌크밀도가 감소하고 커피콩의 조직이 심하게 다공질화 된다는 보고(27,29)와 동결건조 식품의 경우 강한 수분흡착능을 가지는 다공성 조직을 형성하여 더욱 빠른 흡습속도와 높은 평형수분함량을 가진다는 보고(12,14)를 감안할 때, 볶음처리 온도에 따른 옥수수 조직의 다공질화 정도의 차이에 기인된 것으로 생각된다. 여기서 볶음처리에 따른 조직의 다공질화는 수분과 세포구조의 손실 때문에 발생하는 것으로 알려져 있다(29). 이로써 옥수

Table 1. Estimated coefficients of sorption models fitted to experimental sorption data of corn powder

Roasting temp. (°C)	Bradley			Caurie			Halsey		
	ln K ₂	ln K ₁	R ²	ln A	r	R ²	ln a	n	R ²
160	1.150	-20.207	0.971	-3.785	2.209	0.974	-4.922	-1.641	0.968
180	1.102	-18.862	0.972	-3.771	2.246	0.987	-4.859	-1.638	0.984
200	1.059	-17.694	0.984	-3.866	2.449	0.993	-4.475	-1.496	0.971
220	1.065	-16.555	0.978	-3.741	2.365	0.994	-4.508	-1.557	0.980
240	1.168	-16.671	0.983	-3.596	2.232	0.996	-4.619	-1.651	0.979
Roasting temp. (°C)	Henderson			Kuhn			Oswin		
	ln K	n	R ²	b	a	R ²	ln a	n	R ²
160	3.826	1.622	0.983	0.039	-0.015	0.949	-2.681	0.429	0.994
180	3.717	1.601	0.977	0.039	-0.016	0.950	-2.648	0.435	0.999
200	3.391	1.482	0.990	0.040	-0.018	0.930	-2.641	0.473	0.999
220	3.391	1.530	0.983	0.043	-0.019	0.942	-2.558	0.457	1.000
240	3.492	1.619	0.977	0.049	-0.018	0.926	-2.480	0.429	0.995

Table 2. Mean relative percentage deviation modules of sorption models fitted to experimental sorption data of corn powder

Roasting temp. (°C)	P (%) ¹⁾					
	Bradley	Caurie	Halsey	Henderson	Kuhn	Oswin
160	13.473	8.999	10.345	7.828	21.087	3.661
180	14.383	6.764	7.777	9.035	18.455	1.582
200	13.180	5.015	11.748	6.608	26.425	2.627
220	14.539	4.624	9.116	8.524	23.266	0.929
240	12.225	3.043	7.794	8.817	23.191	3.559
Average	13.560	5.689	9.356	8.162	22.485	2.472

¹⁾P(%), mean relative percentage deviation modules.

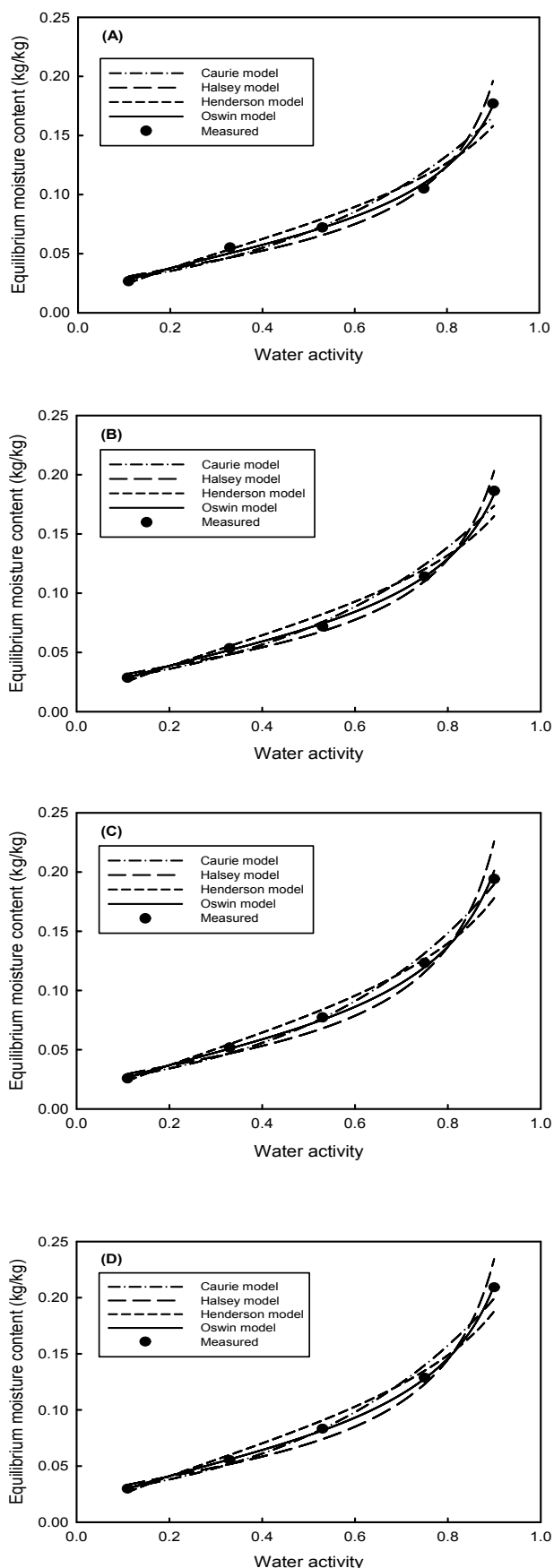
수의 볍음온도는 고수분 환경영역에서 분말의 흡습특성에 영향을 미치며 이때 볍음온도가 고온일수록 흡습을 잘하는 특성을 가지는 것으로 확인되었다. 따라서 볍은 옥수수 분말의 품질관리를 위한 흡습방지 방법은 원료 옥수수의 볍음 정도에 따라 다르게 적용해야 할 것으로 여겨진다.

등온흡습모델의 적합도

볶은 옥수수 분말의 등온흡습곡선과 Bradley, Caurie, Halsey, Henderson, Kuhn 및 Oswin 모델과의 적합성을 검정하였으며, 각 모델에 대한 회귀분석 계수 값은 Table 1에, 편차(P)를 계산한 결과는 Table 2에 각각 나타내었다. 모든 적합성 검정 모델의 R^2 값은 볍음온도별 약간의 차이를 보였으나 0.9 이상이었으며, 모델별 비교에서는 Oswin 모델에서 가장 높은 0.994~1.000을, Kuhn 모델에서 가장 낮은 0.926~0.950을 각각 나타내었으나 볍음온도별 뚜렷한 차이는 보이지 않았다. 한편, 편차를 이용한 모델의 적합성 판단 시 편차 값이 10% 이하일 경우에 적합한 것으로 간주하는데(30), Kuhn과 Bradley 모델은 각각 약 22.485%와 약 13.560%를 나타내어 예측 모델로서 적합성이 없는 것으로 판단되었고, 그 외 모델들은 모두 볍음온도별 뚜렷한 차이가 없이 10% 이하의 편차 값(볶음온도 160°C, 200°C의 Halsey 모델 제외)을 나타내어 적합성을 가지는 것으로 판단되었다. 이들 모델 중 Oswin 모델이 가장 적은 편차 값(0.929~3.661)을 보였으며, 다음으로 Caurie, Henderson, Halsey 모델 순인 것으로 나타났다. 이로써 볍은 옥수수 분말의 등온흡습곡선은 Oswin, Caurie, Henderson, Halsey 모델로 설명이 가능하며, 가장 적합한 모델은 Oswin 모델인 것으로 확인되었다. 그리고 등온흡습곡선에 대한 모델의 적합도는 볍음온도의 영향을 거의 받지 않는 것으로 확인되었다. 한편, 모델의 적합도는 일반적으로 식품의 화학성분 조성에 의존적이라고 알려져 있으며(31), 복분자 동결건조 분말의 경우는 Oswin, Caurie, Halsey 모델이 적합하고, 생강 건조분말의 경우는 Caurie, Bradley, Henderson 모델이 적합한 것으로 각각 보고된 바 있다(12,14). 볍은 옥수수 분말의 등온흡습 실험값과 Oswin, Caurie, Henderson, Halsey 모델로 예측된 등온흡습곡선을 그래프로 비교한 결과는 Fig. 2에 나타낸바와 같이 4가지 모델 모두 볍음온도와는 무관하게 전범위의 수분활성도 영역에서 실험값을 잘 설명하며, 특히 Oswin 모델이 가장 잘 설명하는 것으로 확인되었다.

단분자층 수분함량

단분자층 수분함량은 물 분자가 식품성분 중 carboxyl group이나 amino group과 이온결합을 하여 존재하는 상태이며, 건조식품의 저장성 유지에 최적인 수분함량으로 간주된다. 볍은 옥수수 분말의 단분자층 수분함량을 BET식과 GAB식으로 계산한 결과는 Table 3에 나타내었다. BET식



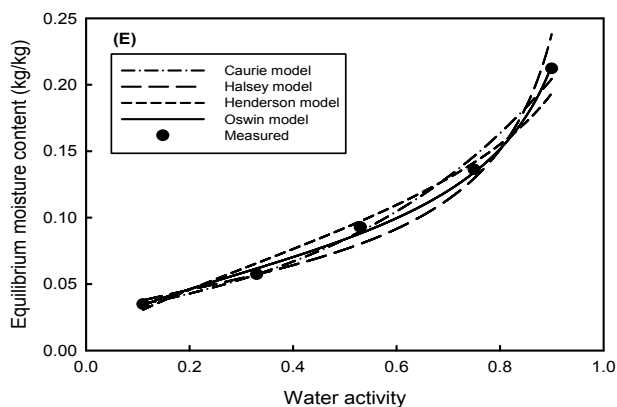


Fig. 2. Comparison of the experimental sorption data and sorption isotherms of corn powder fitted by sorption models. Symbols represent experimental values, lines represent the predicted isotherm. (A), 160°C; (B), 180°C; (C), 200°C; (D), 220°C; (E), 240°C.

Table 3. Coefficients and monolayer moisture contents of corn powder determined by BET and GAB equations

Roasting temp. (°C)	BET equation			GAB equation			
	C	$m_1^{1)}$	R^2	C	k	m_1	R^2
160	-6.826	0.021	0.870	12.871	0.818	0.045	0.932
180	-7.351	0.022	0.869	15.294	0.854	0.043	0.988
200	-8.320	0.023	0.846	9.206	0.845	0.048	0.999
220	-7.992	0.025	0.860	11.521	0.854	0.049	0.993
240	-6.983	0.026	0.842	13.200	0.841	0.053	0.946

¹⁾ m_1 , monolayer moisture contents (kg H₂O/kg solids).

을 적용한 결과, 회귀계수는 0.842~0.870 범위이었고, 단분자층 수분함량은 0.021~0.026 kg/kg 범위 내에서 볶음온도가 높아질수록 약간씩 증가하는 경향을 보였다. GAB식을 적용한 결과, 회귀계수는 0.932~0.999 범위이었고, 단분자층 수분함량은 볶음온도 180°C 이상의 분말에서 볶음온도가 증가할수록 높아지는 경향이었으며, 180°C와 240°C에서 각각 0.043 kg/kg과 0.053 kg/kg을 나타내었다. 단분자층 수분함량이 BET식보다 GAB식에서 높은 것은 일반적인 경우와 일치하는 결과이며(12,14), 회귀계수 값이 GAB식에서 보다 높아 볶은 옥수수 분말의 단분자층 수분함량 예측에 적합한 것으로 판단된다. 옥수수의 볶음온도가 높아질수록 분말의 단분자층 수분함량이 증가하는 경향을 보인 원인 중 하나로 전분질 재료의 경우에 건조방법에 따라 형성되는 조직구조의 차이로 인하여 단분자층 수분함량이 다르다는 보고(32)와 유사하게 옥수수의 볶음온도에 따라 형성된 다공질과 같은 조직구조의 차이를 들 수 있다. 이로써 옥수수의 볶음온도는 분말의 평형수분함량에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

이상의 결과를 종합해 보면, 볶은 옥수수 분말의 20°C에서 흡습곡선을 통하여 볶음온도가 옥수수 분말의 등온흡습

곡선 및 예측모델과 단분자층 수분함량에 영향을 미치는 것이 확인되었으며, 볶은 옥수수 분말의 품질관리에 원료의 볶음온도도 함께 고려되어야 할 것으로 여겨지지만 볶음온도에 따른 흡습특성이 상이한 구체적인 원인 규명에 대한 추가연구가 필요한 것으로 생각된다.

요 약

볶음온도에 따른 옥수수 분말의 흡습특성을 구명하기 위하여, 옥수수 낱알을 160, 180, 200, 220, 240°C에서 20분간 볶은 후 분쇄하고, 20°C에서 각 분말의 수분활성도(a_w) 0.11, 0.33, 0.53, 0.75, 0.90에 따른 평형수분함량(EMC)을 측정하여 등온흡습곡선을 작성하였다. 볶은 옥수수 분말의 등온흡습곡선은 a_w 증가에 따른 EMC 증가가 전형적인 sigmoid 형태를 보였으며, a_w 0.53 이상의 영역에서는 동일 a_w 에서 볶음온도가 고온일수록 높은 EMC를 나타내었다. 옥수수 분말의 등온흡습곡선은 볶음온도의 뚜렷한 영향이 없이 Oswin, Caurie, Henderson, Halsey 모델로 설명이 가능하였으며, 가장 적합한 모델은 Oswin인 것으로 나타났다. 단분자층 수분함량은 전범위의 a_w 영역에서 GAB 방정식으로 예측할 수 있었으며, 볶음온도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보여서 180°C에서는 0.043 kg H₂O/kg solids, 240°C에서는 0.053 kg H₂O/kg solids를 각각 나타내었다. 이로써 옥수수의 볶음온도가 분말의 20°C 흡습특성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Chung HS, Chung SK, Youn KS (2011) Effects of roasting temperature and time on bulk density, soluble solids, browning index and phenolic compounds of corn kernels. J Food Process Preserv, 35, 832-839
2. Medoua GN, Mboufung CMF (2007) Kinetics studies of some physico-chemical substances during roasting and preparation of beverage made by *Cassia occidentalis* seeds. LWT - Food Sci Technol, 40, 730-736
3. Longvah T, Deosthale YG (1998) Effect of dehulling, cooking and roasting on the protein quality of *Perilla*

- frutescens* seed. Food Chem, 63, 519-523
- Kato H, Doi Y, Tsugita T, Kosai K, Kamiya T, Kurata T (1981) Changes in volatile flavour components of soybeans during roasting. Food Chem, 7, 87-94
 - Ozdemir M, Ackurt F, Yildiz M, Biringen G, Gurcan T, Loker M (2001) Effect of roasting on some nutrients of hazelnuts (*Corylus Avellena* L.). Food Chem, 73, 185-190
 - Kahyaoglu T (2008) Optimization of the pistachio nut roasting process using response surface methodology and gene expression programming. LWT - Food Sci Technol, 41, 26-33
 - Yazdanpanah H, Mohammadi T, Abouhossain G, Cheraghali AM (2005) Effect of roasting on degradation of aflatoxins in contaminated pistachio nuts. Food Chem Toxicol, 43, 1135-1139
 - Pittia P, Rosa MD, Lerici CR (2001) Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. LWT - Food Sci Technol, 34, 168-171
 - Kahyaoglu T, Kaya S (2006) Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting. J Food Eng, 75, 167-177
 - Cammerer B, Kroh LW (2009) Shelf life of linseeds and peanuts in relation to roasting. LWT - Food Sci Technol, 42, 545-549
 - Asep EK, Jinap S, Tan TJ, Russly AR, Harcharan S, Nazimah SAH (2008) The effects of particle size, fermentation and roasting of cocoa nibs on supercritical fluid extraction of cocoa butter. J Food Eng, 85, 450-458.
 - Chung HS, Seong JH, Lee YG, Kim HS, Lee JB, Youn KS (2009) Browning and moisture sorption characteristics of *Rubus coreanus* prepared by different drying methods. Korean J Food Preserv, 16, 797-803
 - Saravacos GD (1967) Effect of the drying method on the water sorption of dehydrated apple and potato. J Food Sci, 32, 81-84
 - Shin HK, Hwang SH, Youn KS (2003) Absorption characteristics and prediction model of ginger powder by different drying methods. Korean J Food Sci Technol, 35, 211-216
 - Kim HK, Jo KS, Kang TS, Shin HS (1987) Browning and sorption characteristics of dried garlic flakes with relative humidity and storage temperature. Korean J Food Sci Technol, 19, 176-180
 - Tsami E, Maroulis ZB, Morunos-Kouris D, Saravacos GD (1990) Water sorption isotherms of raisins, currants, figs, prunes and apricots. J Food Sci, 55, 1594-1597
 - Mclaughlin CP, Magee TRA (1998) The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. J Food Eng, 35, 267-280
 - Sukumar D, Hermavathy J, Bhat KK (2002) Moisture sorption studies on onion powder. Food Chem, 78, 479-482
 - Bradley RS (1936) Polymolecular adsorbed films. Part I. The adsorption of argon on salt crystals at low temperatures and the determination of surface fields. J American Chem Soc, 77, 1467-1474
 - Caurie M (1981) Derivation of full range moisture isotherms. In: Water Activity: Influences on Food Quality, Rockland LB, Stewart GF (Editor), Academic Press, New York, USA, p 63-87
 - Halsey G (1948) Physical adsorption in non-uniform surfaces. J Chem Phys, 16, 931-937
 - Henderson SM (1952) A basic concept of equilibrium moisture. Agric Eng, 33, 29-32
 - Kuhn IJ (1964) A new theoretical analysis of adsorption phenomena. Introductory part: The characteristics expression of the main regular types of adsorption isotherms by a single simple equation. J Colloid Sci, 19, 685-698
 - Oswin CR (1946) The kinetics of package life. III. The isotherm. J Soc Chem Indus, 65, 419-421
 - Brunauer S, Emmett PH, Teller E (1938) Adsorption of gases in multimolecular layers. J American Chem Soc, 60, 308-319
 - Anderson R (1946) Modifications of the BET equation. J American Chem Soc, 68, 689-691
 - Chung HS, Chung SK, Youn KS (2011) Effects of roasting temperature and time on bulk density, soluble solids, browning index and phenolic compounds of corn kernels. J Food Process Preserv, 35, 832-839
 - Schenker S, Handschin S, Frey B, Perren R, Escher F (2000) Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions. J Food Sci, 65, 452-457
 - Jha SN (2005) Mathematical simulation of roasting of grain. J Food Eng, 71, 304-310
 - Lomauro CJ, Bakshi AS, Labuza TP (1985) Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I. Fruit, vegetable and meat products. LWT-Food Sci Technol, 18, 111-117
 - Boquet R, Chirife J, Iglesia HA (1978) Equations for fitting water sorption isotherms of foods. J Food Technol, 13,

319-329
32. Westgate P, Lee JY, Ladisch MR (1992) Modeling of

equilibrium sorption of water vapor on starch materials.
Trans American Soc Agric Eng, 35, 213-219

(접수 2014년 3월 11일 수정 2014년 4월 8일 채택 2014년 4월 16일)