

유채씨의 방습 평형함수율

김유호 한재웅 금동혁

Desorption EMC Models for Rapeseed

Y. H. Kim J. W. Han D. H. Keum

Abstract

This study was performed to determine desorption equilibrium moisture contents(EMC) of rapeseed grown in Korea. EMC values were measured by static method using saturated salt solutions at three temperature levels of 30, 40 and 50°C, and eight relative humidity levels in the range from 11.0 to 83.6%. The measured EMC values were fitted to Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Henderson and Modified Oswin models by using nonlinear regression analysis. The results of root mean square errors for four models showed that Halsey and Modified Oswin Models could serve as good models, but the Chung-Pfost and Modified Henderson models could not show reasonably good fitting.

Keywords : Desorption equilibrium moisture content, Rapeseed, Regression analysis

1. 서론

바이오 디젤을 생산할 수 있는 원료로 유채씨, 대두, 팥, 코코넛, 해바라기씨 등이 있지만, 이모작이 가능하고 착유(榨油)율이 45% 이상으로 타 작물보다 높으며, 국내의 기후에서 생산이 용이한 유채씨의 기름은 유동점이 낮아 겨울에 잘 얼지 않아 바이오 디젤 원료로서 최적의 재료로 선택되고 있다.

유채씨를 일정한 조건의 공기 중에 장시간 노출시키면 유채씨 내부의 수증기압과 주위 공기의 수증기 분압이 평형을 이루게 되어 유채씨는 일정한 함수율에 도달하게 된다. 이와 같이 농산물이 주위 공기와 평형을 이루었을 때, 그 농산물 함수율을 주어진 주위 공기 조건에 대한 평형함수율(Equilibrium Moisture Content, EMC)이라 한다. 평형함수율은 곡물의 건조와 저장 과정의 해석, 시스템 설계 및 운영에 있어서 기초가 되는 매우 중요한 인자 중 하나이다.

농산물의 평형함수율은 주위 공기의 온도와 상대습도의 함

수로 표시되며, 이를 평형함수율 모델이라 한다. 농산물에 대한 평형함수율 모델은 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin, Guggenheim-Anderson-deBoer(ASABE, 2006) 등이 제시한 모델이 대표적으로 이용되고 있으나, 넓은 상대습도 범위에서 실험치와 잘 일치할 뿐만 아니라 이용상의 편의성 때문에 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin 모델 등이 널리 이용되고 있다(Choi, 2005).

유채씨의 평형함수율은 재배지역 및 수확시기에 따라 EMC 특성이 다르므로 외국에서 발표된 자료를 그대로 이용하기 어렵다. Keum과 Kim(2000, 2001)은 국내에서 재배된 벼에 대한 평형함수율을 정적방법으로 측정하여 검증한 결과 Modified Henderson 및 Chung-Pfost 모델이 평형함수율 예측에 적합하다고 보고하였으며, Sun과 Byrne(1998)는 유채씨의 평형함수율을 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Oswin 모델에 대하여 검증한 결과 Modified Halsey

The article was submitted for publication in November 2007, reviewed and approved by the editorial board of KSAM in December 2007. The authors are You Ho Kim, KSAM member, Principal researcher, National Institute of Agricultural Engineering, Jea Woong Han, KSAM member, Professor, and Dong Hyuk Keum, KSAM member, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University, Korea. Corresponding author: D. H. Keum, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea; E-mail: <dhkeum@skku.edu>.

모델이 가장 적합하다고 보고하였다.

본 연구의 목적은 국내에서 재배된 유채씨의 방습 평형함수율을 측정하고, 이를 예측할 수 있는 4개의 기존모델로서 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin 모델의 적합성을 검증하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 실험방법

공시재료는 2007년 5월 전라남도 영광지역에서 수확한 선망(*Brassica napus* L.) 품종의 유채씨로 초기 함수율은 33.1% (d.b.)였다.

평형함수율은 포화 염용액과 항온기(한국종합기기제작소, HK-BI025, Korea)를 이용하여 조성된 정온·정습의 공기 중에 시료를 노출시키는 정적방법(static method)을 이용하여 측정하였다. 표 1은 실험에 사용된 염용액의 종류와 포화 염용액주위의 온도별 상대습도를 나타낸 것이다(Greenspan, 1977).

Table 1 Relative humidities at different temperatures above the saturated salt solutions used in the test

Temp. (°C)	Relative humidity(%)							
	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	KI	NaCl	KCl
30	11.3	21.6	32.4	43.1	51.4	67.9	75.1	83.6
40	11.2	20.4	31.6	43.2	48.4	66.1	74.7	82.3
50	11.0		30.5	43.2	45.4	64.5	74.4	81.2

염용액은 일정한 온도를 유지하는 항온기(한국종합기기제작소, HK-BI025, Korea)속에 증류수가 들어 있는 유리병을 넣고 일정한 온도에 이르게 한 후 증류수에 염류를 넣어 혼합하면서 완전히 포화시켰다. 온도는 열전대(T-TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 측정하였다. 표 1에서와 같이 30, 40 및 50°C의 3수준의 온도별 8종류의 염류를 포화시켜 유리병 내의 공기가 8수준의 상대습도(11.0~83.6%)를 유지하도록하였다.

상대습도와 온도가 일정하게 유지되는 유리병 내의 공간에 시료 10 g을 담은 시료 접시를 배치하고, 실험 시작 후 2~3일 간격으로 ±0.001 g정밀도의 전자저울(R420P, Sartorius, Germany)을 이용하여 무게를 측정하였다. 시료의 무게 변화가 2주간 연속해서 0.002 g이하의 변화를 보일 때를 평형함수율에 도달한 것으로 간주하였다. 시료의 함수율은 10 g-130°C-4 h(ASAE standard, 2004) 건조법으로 측정하였다.

나. 분석방법

평형함수율 자료를 적합시키는데 이용되는 많은 모델을 검토한 후 곡물의 평형함수율 모델로 가장 많이 이용되고 있으며, 3개의 매개 변수를 포함하고 있어 적합성이 높고, 함수율을 온도와 상대습도의 양함수로 또는 상대습도를 온도와 함수율의 양함수로 쉽게 표현할 수 있는 특성을 지닌 Chung-Pfost, Modified Halsey, Modified Henderson 및 Modified Oswin 모델을 선택하였다. 이 4개의 모델은 다음과 같다.

(1) Chung-Pfost Equation :

$$RH = \exp\left[-\frac{A}{(T+C)} \exp(-BM)\right]$$

$$M = E - F \ln[-(T+C) \ln(RH)]$$

(2) Modified Halsey Equation :

$$RH = \exp(-\exp(A+BT)M^{-C})$$

$$M = [\exp(A+BT)]^{\frac{1}{C}} (-\ln RH)^{-\frac{1}{C}}$$

(3) Modified Henderson Equation :

$$RH = 1 - \exp[-K(T+C)(100M)^N]$$

$$M = 0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-K(T+C)} \right]^{\frac{1}{N}}$$

(4) Modified Oswin Equation :

$$RH = \frac{1}{(A+BT/M)^{\frac{1}{N}} + 1}$$

$$M = (A+BT) \left(\frac{RH}{1-RH} \right)^N$$

여기서, M = Equilibrium moisture content(dec., d.b.)

RH = Relative Humidity(dec.)

T = Temperature(°C)

A, B, C, E, F, K, N = Regression coefficients

각 모델의 실험상수들은 SAS(Ver. 9.1.3)의 비선형회귀분석 프로그램을 이용하여 결정하였으며, RMSE(Root Mean Square Error)를 모델의 비교 검증에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 평형함수율

모든 시료는 실험 시작 후 2주 내에 무게가 급격히 감소하

였으며, 4~6주 내에 평형함수율에 도달하였다. 온도 3수준, 상대습도 8수준의 공기에 대한 유채씨의 평형함수율은 표 2와 같다. 표에서와 같이 방습 평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났다.

Table 2 Experimental desorption equilibrium moisture content data of rapeseed

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Equilibrium moisture content (% , d.b.)
30	11.3	3.79
	21.6	4.59
	32.4	5.41
	43.1	6.23
	51.4	6.97
	67.9	9.24
	75.1	10.95
	83.6	14.53
40	11.2	3.36
	20.4	4.20
	31.6	5.03
	43.2	5.80
	48.4	6.20
	66.1	8.97
	74.7	10.57
	82.3	12.98
50	11.0	3.24
	30.5	4.65
	43.2	5.41
	45.4	5.54
	64.5	7.46
	74.4	9.86
	81.2	10.91

나. 모델의 적합성 검증

4개의 평형함수율 모델 즉, Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin 모델의 회귀계수(실험상수)와 RMSE는 표 3과 같다. 평형함수율의 실험치와

각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 Modified Halsey 모델의 경우 0.281%(d.b.)를 나타내어 4개 모델 중 가장 낮은 값을 나타내었다. 함수율의 측정정도를 고려하여 실측 및 예측 함수율 사이의 RMSE의 허용수준을 0.5%(d.b.)로 설정할 때, Modified Halsey 모델과 Modified Oswin 모델은 허용수준을 만족하였으나, Modified Henderson과 Chung-Pfost 모델은 허용수준을 벗어났다. 또한 평형함수율 모델의 결정계수(R^2)는 Modified Halsey 모델의 경우 0.99 이상의 높은 값을 나타내었으며, 그 외 모델들도 0.95 이상으로 나타났으나 전자의 모델이 적합성이 높은 것을 알 수 있었다.

한편, 평형상대습도의 실험치와 예측치 사이의 RMSE는 표 3에서와 같이, Modified Halsey 모델이 1.909%를 나타내어 적합성이 매우 높게 나타났다. Chung-Pfost 모델의 경우는 4.479%, Modified Henderson 모델의 경우는 4.661%, Modified Oswin 모델의 경우는 2.986%의 값을 나타내어 Modified Halsey 모델에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다. 결정계수는 4개의 모델 중 Modified Halsey 모델이 0.99 이상을 나타내었다.

그림 1~3은 온도 30, 40 및 50°C에서 유채씨의 평형함수율 실험치와 Modified Halsey 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 온도 30°C의 경우 상대습도에 따른 Modified Halsey 모델로 예측한 평형함수율은 전체적으로 실험치와 잘 일치하였으며, 40°C에서는 상대습도 50~80%에서 약간의 오차가 나타났으나 전반적으로는 잘 일치하였다. 50°C에서도 40°C에서와 비슷한 경향을 보였다.

결론적으로, 평형함수율의 실험치와 예측치 사이의 RMSE가 가장 작은 값을 나타내고 넓은 상대습도 범위에서 잘 적합하는 Modified Halsey 모델이 가장 우수한 것으로 판단되며, Modified Oswin 모델도 사용가능한 것으로 판단된다. 한편 Modified Henderson 및 Chung-Pfost 모델은 적합하지 못한 것으로 판단된다.

Table 3 Estimated regression coefficients and root mean square error for Chung-Pfost, Halsey, Modified-Henderson, Modified-Oswin equation.

Equation	Regression coefficients					RMSE		R^2	
						RH (%)	EMC (% ,d.b.)	RH	EMC
Chung-Pfost	A	B	C	E	F	4.479	0.653	0.9667	0.9559
	391.7	27.885	44.1262	0.2196	0.0385				
Modified Halsey	A		B		C	1.909	0.281	0.9936	0.9925
	-4.9758		-0.0132		1.8755				
Modified Henderson	K		C		N	4.661	0.682	0.9619	0.9564
	0.000282		38.3729		1.7844				
Modified Oswin	A		B		N	2.986	0.496	0.9846	0.9816
	0.0861		-0.00048		0.3775				

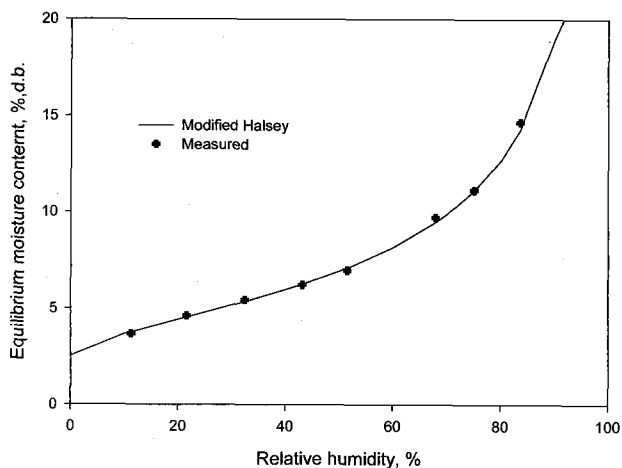


Fig. 1 Measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content of rapeseed using Modified-Halsey equation for temperature 30°C.

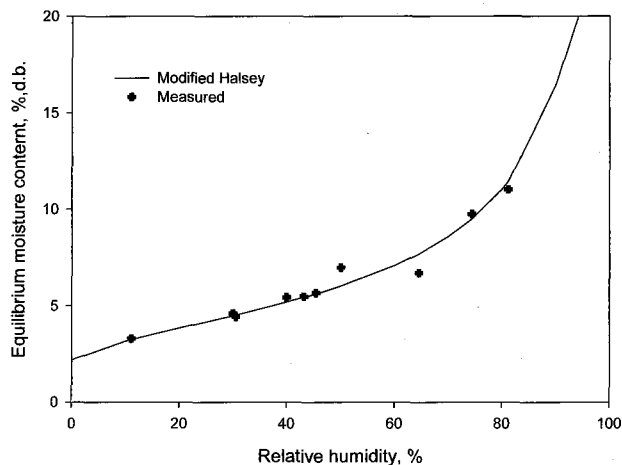


Fig. 3 Measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content of rapeseed using Modified Halsey equation for temperature 50°C.

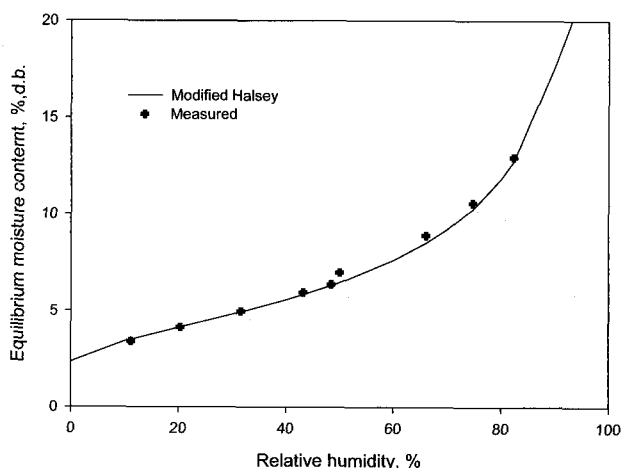


Fig. 2 Measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content of rapeseed using Modified Halsey equation for temperature 40°C.

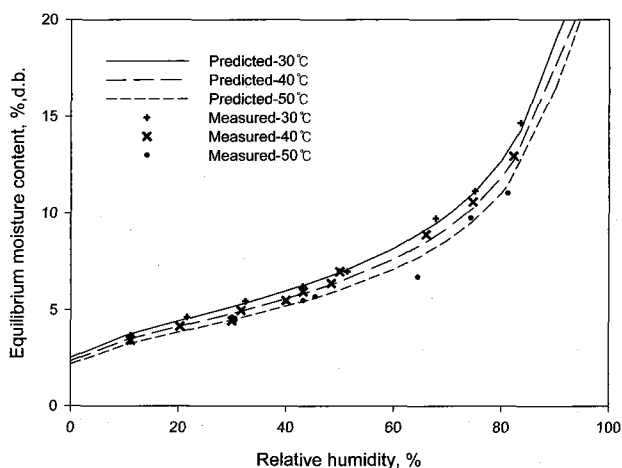


Fig. 4 Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content using Modified Halsey equation for rapeseed.

그림 4는 Modified Halsey 모델의 30, 40 및 50°C의 온도에서의 예측치와 실측치를 비교한 그림이다. 전체적으로 실험치 온도가 높을수록 평형함수율이 낮게 나오는 경향은 예측치에서도 비슷한 경향으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 온도 30, 40 및 50°C의 3수준, 상대습도 11.0~83.6% 범위에서 8수준의 공기에 대한 유채씨의 방습 평형함수율을 정적방법으로 측정하였으며, 측정한 평형함수율은 곡물의 평형함수율 모델로 많이 이용되는 Modified Henderson, Chung-Pfost, Modified Halsey 및 Modified Oswin 모델에 적합시켜, RMSE를 기준으로 모델의 적합성을 판단하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 방습 평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났다.
- (2) 평형함수율 실험치와 각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 Modified Halsey 모델의 경우 0.281%(d.b.)로 가장 낮게 나타났고, Modified Halsey 모델의 결정계수는 0.99 이상으로 나타났다.
- (3) 평형상대습도의 실험치와 예측치 사이의 RMSE는 Modified Halsey 모델의 경우 1.909%, 결정계수는 0.99 이상으로 나타났다.
- (4) 유채씨의 방습평형함수율 모델로는 Modified Halsey 모델의 채택이 가장 바람직하며, Modified Henderson, Chung-Pfost 및 Modified Oswin 모델은 Modified Halsey 모델에 비하여 적합하지 못한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. ASAE Standards. 2004. Moisture measurement-unground grain and seeds. pp. 582.
2. ASABE Standards. 2006. Moisture relationships of plant-based agricultural products. pp. 552.
3. Choi, B. M. 2005. EMC/ERH of rough rice and brown rice. J. of Biosystems Engineering 30(2):95-101. (In Korean)
4. Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. J. of Research National Bureau of Standards 81A:89.
5. Keum, D. H. and H. Kim. 2000. Desorption equilibrium moisture content of rough rice, brown rice, white rice, and rice hull. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 25(1):47-54. (In Korean)
6. Keum, D. H. and H. Kim. 2001. Adsorption equilibrium moisture content of rough rice, brown rice, white rice, and rice hull. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 26(1): 57-66. (In Korean)
7. SAS Institute, SAS V9.1.3, North carolina, USA.
8. Sun, D. W. and C. Byrne. 1998. Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed. J. of Agriculture Engineering Research 69:307-315.