

벼 및 현미의 평형함수율/평형상대습도

최병민

EMC/ERH of Rough Rice and Brown Rice

B. M. Choi

Abstract

Adsorption and desorption experiments were carried out on rough rice and brown rice (Nampyung) at 5, 15, 25, 35, 45 °C for moisture contents between 8.7 and 25% (db). The method employed was to measure the equilibrium relative humidity (ERH) of air in contact with the grain under static conditions, using an electronic hygrometer. The effects of temperature and moisture contents were investigated, and the measured values were fitted to the modified Henderson, the modified Chung-Pfost, the modified Halsey and the modified Oswin model. The ERHs of rough rice and brown rice decreased with an decrease in moisture content and temperature, and the effects of temperature was no significant at moisture content of 25% (db). Equilibrium moisture content (EMC) of brown rice was higher than rough rice at same temperature and relative humidity. Desorption EMC is higher than the adsorption, but there is no significant difference between desorption and adsorption EMC in moisture content near 25% (db) at rough rice and near 9, 21 and 25% (db) at brown rice.

The modified Oswin model was the best in describing the adsorption EMC and the modified Chung-Pfost model was the best in describing the adsorption ERH of rough rice. The modified Oswin model was the best in describing the adsorption EMC/ERH of brown rice. The modified Chung-Pfost model was the best in describing the desorption EMC/ERH of rough rice and brown rice.

Keywords : Rough rice, Brown rice, EMC(equilibrium moisture content), ERH(equilibrium relative humidity)

1. 서론

미곡을 장기 저장하려면 벼나 현미로 조제하여 저장 전에 적절한 수준으로 건조하여 함수율을 감소시켜야 한다. 건조는 단순한 수분의 제거 조작이지만 농산물이나 식품과 같은 물질의 경우 미생물의 번식을 방지하고 효소반응과 비효소적인 반응을 좌우할 수 있으며 품질에 지대한 영향을 미친다. 이들 물질의 수분의 역할과 관계가 있는 것들은 물질의 함수율, 용질의 농도, 삼투압, 이들과 접하고 있는 공기의 습도이다(한, 1984).

어떤 물질을 일정한 온도와 습도를 가진 공기중에 장시간

두었을 때 더 이상 흡습하거나 방습하지 않고 함수율이 변하지 않게 되는데 이 때의 함수율을 그 물질의 평형함수율(equilibrium moisture content, EMC)이라 한다. 물질이 수분을 잃어 주위의 대기조건과 평형을 이룰 때의 함수율을 방습 평형함수율이라 하고 흡습하여서 주위의 대기조건과 평형을 이룰 때의 함수율을 흡습 평형함수율이라 하며, 방습과 흡습 평형함수율 사이에는 차이가 있는 것으로 알려져 있다(Ma 등, 1998). 또한 어떤 물질로 채워진 밀폐된 공간에서 물질 사이에 있는 공기는 주위의 온도와 물질의 함수율에 대응하여 일정한 상대습도를 유지하게 되는데 이 때의 밀폐된 공간에 있는 평형상태의 공기의 상대습도를 그 물질의 평형상대습도

(equilibrium relative humidity, ERH)라 하며 이때 물질이 가지고 있는 함수율은 온도간에 유의차를 보이지 않는다(Loewer 등, 1994).

따라서 곡물로 채워진 밀폐된 공간에서의 공기의 평형상대습도를 측정하는 방법으로 곡물의 평형함수율을 찾아 낼 수 있는데 Putranon 등(1979)은 벼의 흡습 평형함수율/평형상대습도를 측정하기 위하여 Vaisala 사의 Humicap HM14 센서를 사용하여 실험한 바 있고, Chen과 Morey(1989)는 옥수수의 평형상대습도를, Ng 등(1995)은 옥수수의 저장 중 품질저하와 평형상대습도의 관계를 실험하기 위하여 역시 Vaisala 사의 23UTA 센서를 사용하여 실험한 바 있다.

미곡과 같은 흡습성재료의 평형함수율/평형상대습도는 건조 및 저장 문제와 밀접한 관계를 가지고 있으므로 고품질의 쌀 생산을 위한 건조시스템과 저장을 위해서는 건조, 가공 및 저장의 가장 기본적인 기초자료로 이용되고 있는 평형함수율/평형상대습도의 구명이 선결되어야 한다. 벼의 평형함수율에 관한 실험결과는 국내에서 Koh(1978)와 Keum 등(2000)이 보고한 바 있으나 아직도 이들의 구명이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 벼와 현미를 시료로 하여 여러 환경조건에서 저장능력을 결정할 뿐만 아니라 건조시스템의 설계와 작동의 기초자료인 흡습 및 방습 평형함수율/평형상대습도를 벼 및 현미로 채워진 밀폐된 공간의 공기의 평형상대습도를 측정하는 방법으로 구명하고, 농산물이나 식품에 널리 이용되고 있는 평형함수율/평형상대습도를 예측할 수 있는 4개의 기존 모델들과 본 실험에서 얻은 결과와의 적합성 검정을 하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

1) 시료

2002년 순천대학교 부속농장에서 수확한 벼(품종 남평)를 대상으로 현미 시료는 실험용 현미기(한성공업주식회사, HSMC-4)를 사용하여 제현하였다.

흡습 시료로 사용할 벼와 현미는 45°C의 오븐에서 항량에 도달할 때까지 건조한 후, 증류수를 가수하여 5구간(8.7~25% db)의 함수율로 흡습시켜 조절한 다음 3°C의 냉장고에 2주간 저장하여 함수율이 평형이 되도록 한 후 시료로 사용하였다.

방습 시료로 사용할 벼와 현미는 증류수를 가수하여 25%(db)로 함수율을 조절하고 3°C의 냉장고에 2주간 저장하여 함수율이 평형이 되도록 한 다음, 이들 시료를 45°C의 오븐에서 흡습 시료와 같은 5구간의 함수율이 되도록 건조한 후,

3°C의 냉장고에 2주간 저장하여 함수율이 평형이 되도록 한 후 시료로 사용하였다.

2) 실험장치

일정한 함수율로 조절된 벼와 현미 시료를 각각 약 250 cm³ 정도를 넣어 가득 채운 밀폐된 용기(직경 55 mm, 길이 125 mm)의 뚜껑에 상대습도 측정센서(Vaisala, HMP238, Finland)가 용기내의 중앙에 위치하도록 장착하고, 이 용기를 항온기(Jeio Tech, AT-P150, Korea) 속에 설치한 후 각 온도에서 평형상대습도를 측정하였으며, 항온기 내의 온도편차는 각 온도에서 ±0.5°C 이내였다.

나. 실험방법

함수율이 5수준으로 조절된 벼와 현미 시료를 5°C부터 45°C까지 10°C씩 증가시키며 5수준의 항온에서 상대습도 측정센서 5개를 이용 5반복 실험하였고, 예비실험 결과 상대습도 값이 온도를 셋팅한 후 48~60 시간 정도 지난 후 거의 변하지 않고 평형상태를 이루었으나 더 안전한 값을 얻기 위하여 110~120 시간 사이에 측정(1 시간 간격)한 값의 평균값을 평형상대습도 값으로 하였다. 각 시료의 함수율은 실험 전의 함수율과 실험 후의 함수율 측정치의 평균값으로 하였으며 10 g의 시료를 135°C의 오븐에서 24 시간 건조하여 결정하였다.

다. 모델의 적합성 검정

표 1과 같은 평형함수율/평형상대습도를 예측할 수 있는 4개의 기존 모델(ASAE, 2003)의 상수를 비선형회귀분석을 통하여 구하고, 각각의 모델에 대하여 결정계수(coefficient of determination)와 F값 및 평균상대오차율(mean relative percentage deviation)을 구하여 벼와 현미의 흡습 및 방습 평형함수율/평형상대습도 예측모델로서의 적합성검정을 하였다. 비선형회귀분석, 결정계수 및 F 값은 SAS(Ver. 8.01) 프로그램을 이용하였으며, 평균상대오차율(P)은 다음 식에 의하여 구하였다.

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - Y'|}{Y}$$

P : 평균상대오차율(%)

N : 측정값의 수(the number of data points)

Y : 실측 함수율(% wb), Y' : 예측 함수율(% wb)

Table 1 Equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity models.

Model	Equation
Modified Henderson	$M = \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-A(T + C)} \right]^{\frac{1}{B}}$ $RH = 1 - \exp[-A(T + C)M^B]$
Modified Chung-Pfost	$M = \frac{\ln A}{B} - \frac{1}{B} \cdot \ln[-(T + C)\ln RH]$ $RH = \exp\left[-\frac{A}{T + C} \exp(-B \cdot M)\right]$
Modified Halsey	$M = [\exp(A + B \cdot T)]^{\frac{1}{C}} \cdot [-\ln RH]^{-\frac{1}{C}}$ $RH = \exp\left[-\frac{\exp(A + B \cdot T)}{M^C}\right]$
Modified Oswin	$M = (A + B \cdot T) \left[\frac{1 - RH}{RH} \right]^{-\frac{1}{C}}$ $RH = \left[\left(\frac{A + B \cdot T}{M} \right)^C + 1 \right]^{-1}$

RH : Equilibrium Relative Humidity (decimal)
 M : Equilibrium Moisture Content (% , db)
 T : Temperature (°C), A, B, C : Parameters

3. 결과 및 고찰

가. 평형함수율/평형상대습도

벼와 현미를 함수율 8.7~25%(db) 사이의 구간에서 흡습 및 방습시켜 시료를 조제하여 온도 5수준(5, 15, 25, 35, 45°C)

에서 평형상대습도를 측정한 결과는 표 2와 같다.

표 2에서와 같이 벼와 현미 모두 온도가 낮을수록 그리고 함수율이 낮을수록 평형상대습도가 낮은 값을 나타내었고 온도가 낮고 상대습도가 높을수록 높은 평형함수율을 나타내었으나 함수율 25%(db) 정도에서는 벼나 현미 시료 모두 평형상대습도 값에 온도간의 유의차가 없었다.

흡습과 방습시료로 조제된 벼의 평형함수율/평형상대습도를 비교해 보면 비슷한 함수율을 갖는 시료에서 동일온도의 방습 평형상대습도가 흡습 평형상대습도보다 낮은 값을 가져 동일 온도에서 방습 평형함수율이 흡습 평형함수율보다 높은 값을 가지는 것을 알 수 있으나, 함수율 25%(db) 정도의 시료에서는 흡습 시료와 방습 시료간에 별 차이를 보이지 않았다.

현미의 흡습과 방습 평형상대습도는 함수율 12~17%(db) 정도의 시료에서는 벼와 마찬가지로 동일온도에서 방습 평형상대습도가 흡습 평형상대습도보다 낮은 값을 가졌으나, 함수율 9%(db) 근처와 21%(db) 및 25%(db) 근처의 시료에서는 별 차이가 없었다.

그림 1은 25°C에서 벼와 현미의 흡습 평형함수율/평형상대습도의 차이를 비교한 것이다. 동일한 함수율에서 벼가 현미보다 높은 평형상대습도 값을 가져 동일한 온도와 상대습도에서 현미가 벼보다 높은 평형함수율을 갖는 것을 알 수 있으며 이는 5, 15, 35, 45°C에서도 같은 경향을 보이고, 방습 시료에서도 같은 경향을 나타냈으며, Keum 등(2000)의 실험결

Table 2 Experimental adsorption and desorption equilibrium relative humidity data for rough rice and brown rice.

Material	Moisture Content (% , db)	Equilibrium Relative Humidity (%)				
		5°C	15°C	25°C	35°C	45°C
Rough Rice (Adsorption)	9.45	24.27	27.00	29.40	31.22	33.19
	13.21	44.86	48.03	50.70	53.23	56.28
	16.63	65.41	67.76	70.10	71.94	74.17
	20.86	79.64	81.10	82.22	83.10	84.11
	25.09	87.92	88.02	88.23	88.36	88.05
Rough Rice (Desorption)	8.94	19.52	21.33	23.28	25.48	28.20
	12.71	37.56	40.20	43.03	46.68	51.70
	16.60	58.84	61.90	64.47	67.78	71.84
	20.73	78.11	79.70	80.90	82.51	83.84
	24.42	87.04	87.75	87.98	88.36	88.29
Brown Rice (Adsorption)	9.27	16.96	19.02	21.42	23.51	25.64
	12.93	39.40	42.60	45.44	47.72	50.40
	16.73	60.67	63.51	66.08	68.06	70.58
	20.83	76.29	78.14	79.62	80.80	81.93
	24.98	86.01	86.38	87.25	87.19	86.32
Brown Rice (Desorption)	9.03	15.97	17.84	17.84	22.30	24.71
	12.84	33.48	36.55	36.55	43.58	48.22
	16.73	57.72	60.70	60.70	66.73	70.66
	20.60	77.13	78.76	78.76	81.83	83.26
	24.58	87.10	87.34	87.34	87.95	87.97

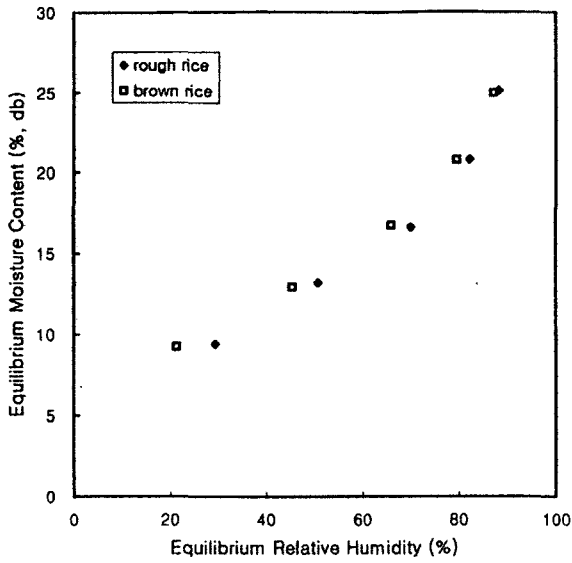


Fig. 1 Adsorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for rough rice and brown rice at 25°C.

과와도 같은 경향을 보였다.

나. 평형함수율/평형상대습도 모델의 적합성

흡습 및 방습시료로 조제된 벼와 현미의 평형함수율/평형상대습도를 예측하기 위하여, 표 1과 같은 4개의 모델(ASAE Standards, 2003)을 대상으로 회귀분석하여 구한 실험상수와,

이 실험상수를 이용하여 평형함수율과 평형상대습도를 각각 종속변수로 하여 구한 예측값과 측정값 간의 평균상대오차는 표 3과 같다.

표 3에서와 같이 4개의 모델 모두 결정계수가 0.99 이상의 높은 값을 가졌으며, 고도의 유의성이 인정되어 온도 5~45°C 사이에서 함수율 8.7~25%(db) 사이의 벼와 현미의 흡습 및 방습 평형함수율/평형상대습도의 예측에는 본 실험에서 선정 분석한 4개의 모델 모두 사용 가능하다.

각각의 모델에 의한 예측값과 실측값의 평균상대오차율(P)을 비교해 보면, 흡습 평형함수율 예측에 있어서는 벼와 현미 모두 수정 Oswin 모델이 1~2% 정도로서 가장 낮은 값을 나타냈고 수정 Chung-Pfost 모델, 수정 Halsey 모델, 수정 Henderson 모델 순으로 평균상대오차율이 낮았으며, 평형상대습도 예측은 벼의 경우 수정 Chung-Pfost 모델이 1.7%로서 가장 낮은 값을 나타냈고 수정 Oswin 모델, 수정 Henderson 모델, 수정 Halsey 모델의 순으로 평균상대오차율이 낮게 나타났으며, 현미의 경우는 수정 Oswin 모델이 1.29%로 가장 낮은 값을 가졌으며 수정 Chung-Pfost 모델, 수정 Halsey 모델, 수정 Henderson 모델의 순으로 낮게 나타났다.

방습 평형함수율 예측에 있어서는 벼와 현미 모두 수정 Chung-Pfost 모델이 1~2% 정도로서 가장 적은 값을 나타냈고, 벼에서는 수정 Henderson, 수정 Oswin, 수정 Halsey 모델 순으로, 현미에서는 수정 Oswin, 수정 Henderson, 수정

Table 3 Adsorption and desorption parameters and mean relative percentage deviation (P) for modified Henderson, modified Chung-Pfost, modified Halsey and modified.

Model	Rice	Parameter			R ²	F	P (%)	
		A	B	C			EMC	ERH
Modified Henderson	Rough(A) [⊙]	0.000028	1.9477	138.6	0.9987	5778**	3.511	3.35
	Rough(D) [◇]	0.000021	2.1118	105.6	0.9992	9469**	2.502	2.813
	Brown(A)	0.000014	2.0297	202.2	0.9997	3209**	4.816	6.951
	Brown(D)	0.000012	2.3103	100.4	0.9988	6032**	3.122	4.116
Modified Chung-Pfost	Rough(A)	751.6	0.1601	111	0.9995	14335**	2.191	1.734
	Rough(D)	705.4	0.1612	88.8981	0.9997	21134**	1.786	2.219
	Brown(A)	892	0.1627	108.8	0.9994	11772**	2.431	2.868
	Brown(D)	825.7	0.1689	84.1342	0.9995	15356**	2.021	2.809
Modified Halsey	Rough(A)	6.049	-0.00494	2.4811	0.9993	9926**	2.908	5.303
	Rough(D)	6.6846	-0.00688	2.6683	0.9983	4392**	4.582	10.811
	Brown(A)	5.9257	-0.00772	2.3534	0.9994	11397**	2.839	3.616
	Brown(D)	7.0416	-0.00672	2.7717	0.9984	4582**	4.526	12.111
Modified Oswin	Rough(A)	13.8982	-0.0426	3.0735	0.9997	22807**	2.006	1.939
	Rough(D)	14.3397	-0.0352	3.321	0.9993	10501**	2.890	4.696
	Brown(A)	14.8888	-0.0449	3.2624	0.9998	39407**	1.225	1.285
	Brown(D)	14.8805	-0.0348	3.5139	0.9993	10091**	2.754	4.797

⊙ : (A) denotes adsorption material., ◇ : (D) denotes desorption material.

Halsey 모델 순으로 평균상대오차율이 적었으며, 평형상대습도 예측 또한 수정 Chung-Pfost 모델이 벼와 현미에서 모두 가장 적은 값을 나타냈으며, 수정 Henderson, 수정 Oswin, 수정 Halsey 모델의 순으로 평균상대오차율이 적게 나타나 벼와 현미의 방습 평형함수율/평형상대습도 예측에는 수정 Chung-Pfost 모델이 가장 적합한 것을 알 수 있다.

그림 2와 3은 각각 벼의 흡습 평형함수율과 흡습 평형상대습도 예측에 가장 적은 평균상대오차율을 보인 수정 Oswin 모델과 수정 Chung-Pfost 모델에 의해 벼의 흡습 평형함수율/평형상대습도를 예측한 그림이며, 그림 4는 현미의 흡습 평형

함수율과 흡습 평형상대습도 예측에서 가장 적은 평균상대오차율을 보인 수정 Oswin 모델에 의하여 현미의 흡습 평형함수율/평형상대습도를 예측한 그림이다.

그림 5와 6은 각각 벼와 현미의 방습 평형함수율 및 방습 평형상대습도의 예측에서 가장 적은 평균상대오차율을 보인 수정 Chung-Pfost 모델에 의하여 벼와 현미의 방습 평형함수율/평형상대습도를 예측한 그림이다.

그림 7과 8은 본 연구에서 적합성 검정을 한 모델들의 비교를 위하여 각각 25°C에서의 벼의 흡습 평형함수율/평형상대습도와 25°C에서의 현미의 방습 평형함수율/평형상대습도를

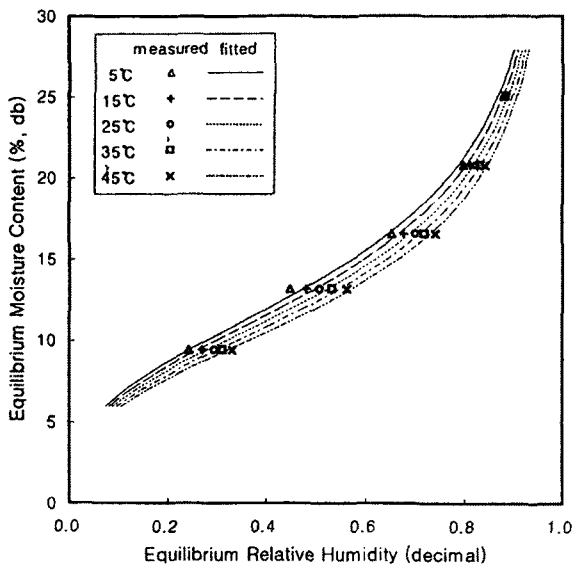


Fig. 2 Adsorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for rough rice by using modified Oswin model.

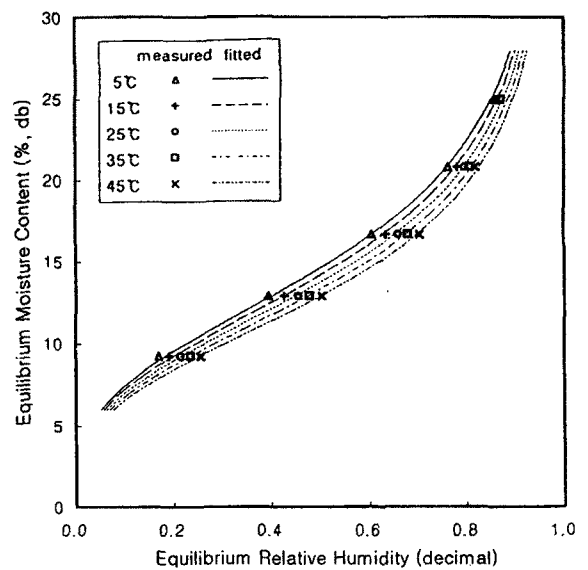


Fig. 4 Adsorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for brown rice by using modified Oswin model.

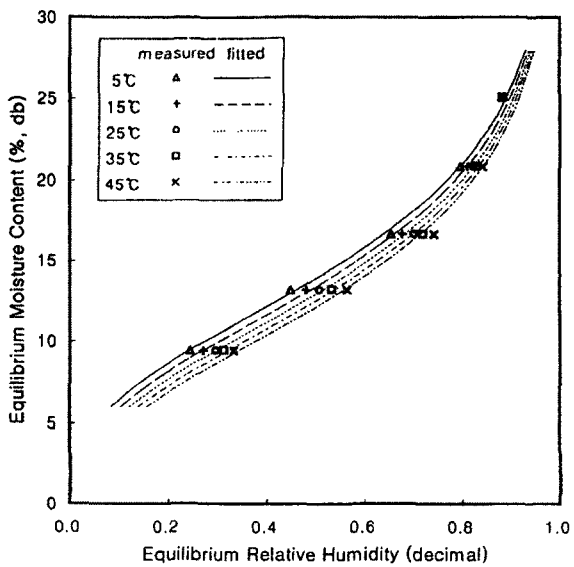


Fig. 3 Adsorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for rough rice by using modified Chung-Pfost model.

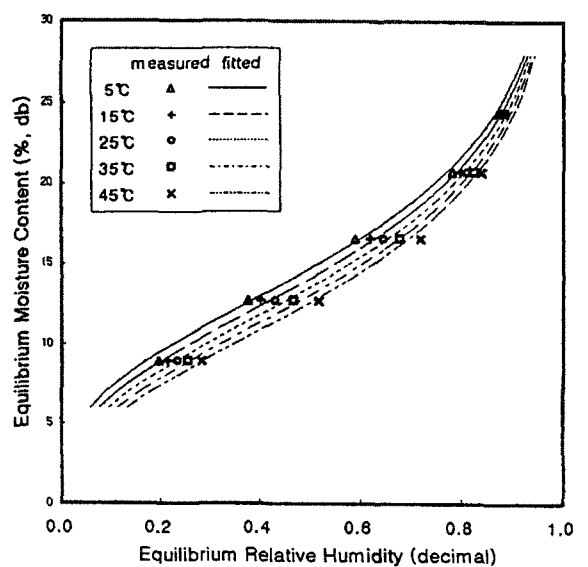


Fig. 5 Desorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for rough rice by using modified Chung-Pfost model.

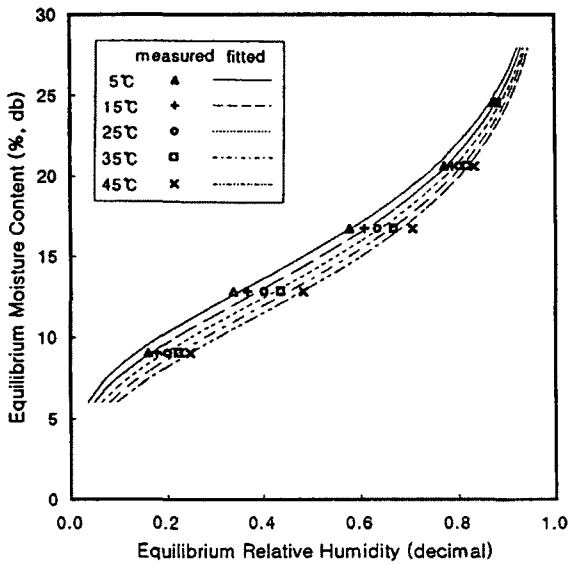


Fig. 6 Desorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for brown rice by using modified Chung-Pfost model.

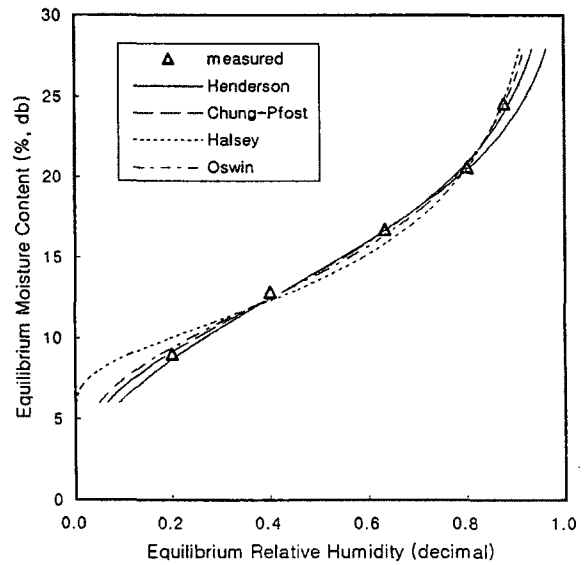


Fig. 8 Comparison of desorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for brown rice with various models at 25°C.

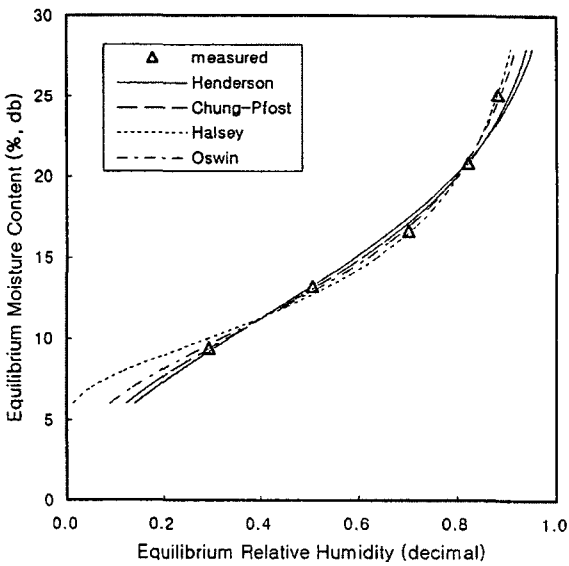


Fig. 7 Comparison of adsorption equilibrium moisture content/equilibrium relative humidity for rough rice with various models at 25°C.

4가지 모델에 의하여 예측한 그림이다.

4. 요약 및 결론

남평 벼와 현미를 5구간(8.7~25% db)의 함수율로 조절 한 흡습시료와 방습시료로 조절하여 온도 5°C에서 45°C까지 10°C씩 증가시키며 5수준의 온도에서 평형상대습도를 측정하였다. 농산물의 평형함수율/평형상대습도 예측에 많이 쓰

이고 있는 수정 Henderson 모델, 수정 Chung-Pfost 모델, 수정 Halsey 모델, 수정 Oswin 모델에 대하여 SAS(Ver. 8.01)의 비선형회귀분석을 통하여 실험상수를 구하고, 결정계수와 F값 및 평균상대오차율을 기준으로 하여 예측 모델로서의 적합성을 검정을 한 결과는 다음과 같다.

- (1) 벼와 현미는 온도가 낮을수록 그리고 함수율이 낮을수록 평형상대습도 값이 적었으며, 함수율 25%(db) 정도의 시료에서는 평형상대습도 값에 온도간의 유의차가 없었다.
- (2) 동일한 온도와 상대습도에서 현미가 벼보다 높은 평형함수율을 가졌다.
- (3) 동일 온도에서 방습 평형함수율이 흡습 평형함수율보다 높은 값을 가지나, 벼는 함수율 25%(db) 정도의 시료와 현미는 함수율 9%(db) 근처와 21%(db) 및 25%(db) 근처의 시료에서는 별 차이가 없었다.
- (4) 벼와 현미의 흡습 및 방습 평형함수율/평형상대습도의 예측에는 본 실험에서 선정 분석한 4개의 모델 모두 사용 가능하나, 벼의 흡습 평형함수율 예측에는 수정 Oswin 모델이 흡습 평형상대습도 예측에는 수정 Chung-Pfost 모델이 가장 적합하고, 현미의 흡습 평형함수율과 평형상대습도의 예측에는 모두 수정 Oswin 모델이 가장 적합하였으며, 방습 평형함수율과 방습 평형상대습도 예측에는 벼와 현미 모두 Chung-Pfost 모델이 가장 적합하였다.

참고 문헌

1. ASAE Standards. 2003. Moisture relationships of plant-based agricultural products. pp. 538.
2. Chen C. and R. V. Morey. 1989. Equilibrium relative humidity (ERH) relationships for Yellow-dent corn. TRANSACTIONS of the ASAE. 32(3):999-1006.
3. Keum, D. H., H. Kim and Y. K. Cho. 2000. Desorption Equilibrium Moisture Content of Rough Rice, Brown Rice and Rice Hull. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery. 25(1):47-54. (in Korean)
4. Koh, H. K. 1978. Determination of Equilibrium Moisture Content of Rough Rice. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery. 3(2):62-68. (in Korean)
5. Loewer O. J., T. C. Bridges and R. A. Bucklin. 1994. On-Farm Drying and Storage Systems. ASAE. pp. 49-55.
6. Ma L., D. C. Davis, L. G. Obaldo and G. V. Barbosa-Canovas. 1998. Engineering Properties of Foods and Other Biological Materials: A Laboratory Manual. ASAE. pp. 198.
7. Ng H. F., R. V. Morey, W. F. Wilcke, R. A. Meronuck and J. P. Lang. 1995. Relationship between equilibrium relative humidity and deterioration of shelled corn. TRANSACTIONS of the ASAE. 38(4):1139-1145.
8. Putranon R., R. G. Bowrey and J. Eccleston. 1979. Sorption isotherms for two cultivars of paddy rice grown in Australia. FOOD TECHNOLOGY IN AUSTRALIA. December 1979. pp. 510-515.
9. 한국식품과학회. 1984. 식품공학. 형설출판사. pp. 281-283.