

## 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율

# Adsorption Equilibrium Moisture Content of Rough Rice, Brown Rice, White Rice and Rice Hull

금동혁            김 훈  
정회원            정회원  
D. H. Keum      H. Kim

### SUMMARY

This study was performed to determine adsorption equilibrium moisture contents of rough rice, brown rice, white rice and rice hull grown in Korea. EMC values were measured by static method using saturated salt solutions at three temperature levels of 20°C, 30°C and 40°C, and eight relative humidity levels in the range from 11.2% to 85.0%.

The measured EMC values were fitted to modified Henderson, Chung-Pfost, and modified Oswin models by using nonlinear regression analysis. The results of comparing root mean square errors for three models showed that modified Henderson and Chung-Pfost models could serve as good models, and that modified Oswin model could not be applicable to rough rice, brown rice, white rice and rice hull.

**Keywords** : Adsorption equilibrium, Moisture content, Rice, Regression analysis.

### 1. 서    론

곡물을 일정한 조건의 공기 중에 장시간 노출시키면 곡물 중의 수증기압과 주위 공기 중의 수증기압이 평형을 이루게 되어 곡물은 일정한 함수율에 도달하게 된다. 이와 같이 곡물이 주위 공기와 평형을 이루었을 때 그 곡물의 함수율을 주어진 주위 공기 조건에 대한 평형함수율(equilibrium moisture content, EMC)이라 한다. 곡물 중의 수증

기압이 공기 중의 수증기압보다 크면 곡물 중의 수분이 증발하면서 공기와 평형을 이루게 되는데 이때의 함수율을 방습평형함수율(desorption EMC)이라 하며, 반대로 곡물 중의 수증기압이 주위 공기 중의 수증기압보다 낮으면 곡물은 주위 공기로부터 수분을 흡수하여 평형을 이루는 함수율을 흡습평형함수율(adsorption EMC)이라 한다. 방습평형함수율은 흡습평형함수율 보다 항상 높은 값을 나타내는데 이와 같이 차이가 나타나는 현상을 이력

---

The article was submitted for publication in January 2001; reviewed and approved by the editorial board of KSAM in February 2001. The authors are Dong Hyuk Keum, Professor, Hoon Kim, Research Associate, Dept of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Korea. The corresponding author is D. H. Keum, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea. E-mail: <dhkeum@yurim.skku.ac.kr>.

(Hysteresis)현상이라 한다.

곡물의 평형함수율은 주의 공기의 온도와 상대 습도의 함수로 표시되며, 이를 평형함수율 모델이라 한다. 곡물에 대한 평형함수율 모델은 Oswin (1946), Henderson(1952), Day-Nelson(1965), Chung-Pfost(1967), Strohmman-Yoerger(1967), Chen-Clayton (1971), Henderson-Thompson(1972) 등이 제시한 모델이 대표적으로 이용되고 있으나, 넓은 상대습도 범위에서 실험치와 잘 일치할 뿐만 아니라 이용상의 편의성 때문에 Henderson-Thompson 모델(수정 Henderson 모델), Chung-Pfost 모델 및 수정 Oswin 모델이 가장 널리 이용되고 있다.

곡물의 평형함수율은 품종, 재배지역 및 수확시기에 따라 다르므로 외국에서 발표된 자료를 그대로 이용하기 어렵다. 고(1978)는 국내에서 재배된 벼에 대한 평형함수율을 향온함습기를 이용하여 측정하여 수정 Henderson 모델로 나타내어 보고하였다. 금 등(2000)은 정적인 방법으로 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율을 측정하여 수정 Henderson, Chung-Pfost 및 수정 Oswin 모델에 적합시켜 회귀계수를 결정하고 RMSE와 결정계수를 구하여 제시하였다.

본 연구의 목적은 국내에서 재배된 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율을 측정하여 적합한 평형함수율식을 개발하는 데 있으며, 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

- (1) 온도는 20, 30 및 40℃의 3수준, 상대습도는 11.2~85.0% 범위에서 8수준에 대한 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율을 염용액을 이용한 정적방법으로 측정하고,
- (2) 평형함수율 측정치를 곡물의 평형함수율 모

델로 가장 널리 이용되는 수정 Henderson, Chung-Pfost 및 수정 Oswin 모델에 적합시켜 실험상수를 결정하고 모델의 적합성을 검증한다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

공시재료는 1997년 10월 경기도 철원지역에서 수확한 정부 보급 장려품종인 오대벼이다. 벼를 시험용 현미기(SYTH-88)와 시험용 정미기(SYTRM-92)를 사용하여 현미 및 백미 시료를 만들었으며, 30℃의 열풍으로 함수율을 조정하였다.

### 나. 실험 방법

평형함수율은 포화 염용액을 이용하여 조성된 정온·정습의 공기 중에 시료를 노출시키는 정적 방법(static method)을 이용하여 측정하였다. 표 1은 실험에 사용된 염용액의 종류와 포화 염용액 주위의 온도별 상대습도를 나타낸 것이다(Greenspan, 1977).

증류수를 담은 유리병을 각각 20, 30 및 40℃의 온도를 유지하는 향온기에 넣고 일정한 온도에 이르게 한 후 증류수에 염류를 넣어 혼합하면서 완전히 포화시켰다. 표 1에서와 같이 3수준의 온도 별로 8종류의 염류를 포화시켜 유리병내의 공기가 8수준의 상대습도(11.2 ~ 85.1%)를 유지하도록 하였다.

이와 같이 상대습도와 온도가 일정하게 유지되

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

Temperature (℃)	Relative humidity (%)							
	<i>LiCl</i>	<i>CH<sub>3</sub>COOK</i>	<i>MgCl<sub>2</sub></i>	<i>K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub></i>	<i>Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></i>	<i>KI</i>	<i>NaCl</i>	<i>KCl</i>
20	11.3	23.1	33.1	43.2	54.4	69.9	75.5	85.1
30	11.3	21.6	32.4	43.2	51.4	67.9	75.1	83.6
40	11.2	20.4	31.6	43.1	48.4	66.1	74.7	82.3

는 유리병 내의 공간에 시료(벼, 현미 및 백미는 각각 10g, 왕겨는 3g)를 담은 시료접시를 배치하고, 시료의 무게를 주기적으로 계량하였다. 실험 시작 후 1주일 간격으로 전자저울(±0.001g)을 이용하여 무게를 측정하였다. 시료의 무게 변화가 3주간 연속해서 0.002g 이하의 변화를 보일 때를 평형함수율에 도달한 것으로 간주하였다 (금동혁 등, 2000).

시료의 함수율은 10립-135℃-24hr 건조법으로 측정하였다.

다. 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 수정 Henderson 모델, Chung-Pfost 모델 및 수정 Oswin 모델을 선택하였다. 이 3개의 모델은 다음과 같다.

Chung-Pfost 모델

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

$$RH = \exp \left[ \frac{-A}{(T+C)} \exp(-BM) \right] \dots (1)$$

수정 Henderson 모델

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

$$RH = 1 - \exp[-K(T+C) (100 M)^N] \dots (2)$$

수정 Oswin 모델

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

$$RH = \frac{1}{(A + BT / M)^{\frac{1}{N}} + 1} \dots (3)$$

여기서, M = 평형함수율(dec, d.b.)

RH = 상대습도(dec)

T = 온도(℃)

A, B, C, E, F, K, N = 실험상수

SAS의 비선형회귀분석 프로그램을 이용하여 3개의 모델에 포함된 실험상수를 결정하였으며, RMSE(root mean square error)를 모델의 비교 검증에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 평형함수율

온도 3수준, 상대습도 8수준의 공기에 대한 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율은 표 2와 같다. 표에서와 같이 흡습평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났다.

그림 1은 온도 20℃에서 벼, 현미, 백미 및 왕겨

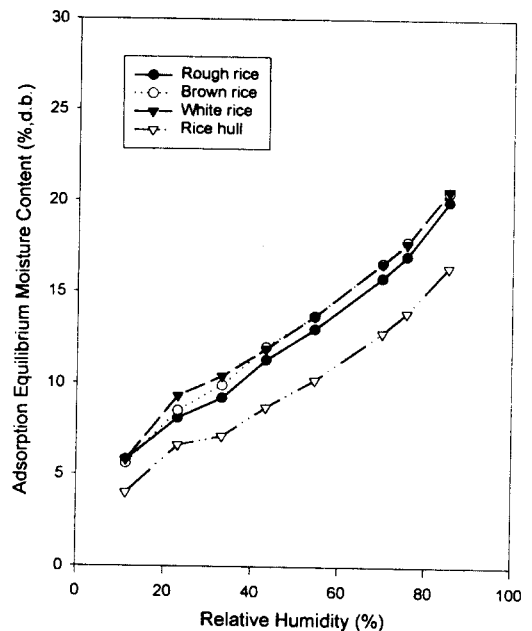


Fig. 1 Measured adsorption equilibrium moisture contents of rough rice, brown rice, white rice and rice hull at temperature 20℃.

Table 2 Measured adsorption equilibrium moisture contents of rough rice, brown rice, white rice and rice hull

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	Equilibrium moisture content (% d.b.)			
		Rough rice	Brown rice	White rice	Rice hull
20	11.3	5.8	5.6	5.8	4.0
	23.1	8.1	8.5	9.3	6.6
	33.1	9.2	9.9	10.4	7.1
	43.2	11.3	12.0	11.9	8.7
	54.4	13.0	13.7	13.7	10.2
	69.9	15.8	16.6	16.6	12.8
	75.5	17.0	17.8	17.7	13.9
	85.1	20.0	20.5	20.6	16.4
30	11.3	5.4	5.4	6.0	4.4
	21.6	7.6	7.4	7.9	5.7
	32.4	8.4	9.3	9.8	6.5
	43.2	10.6	11.2	11.0	7.8
	51.4	12.0	12.5	12.5	9.2
	67.9	14.6	15.1	15.2	11.4
	75.1	15.9	16.7	16.8	12.6
	83.6	17.9	18.2	18.6	14.6
40	11.2	4.3	4.3	4.8	2.8
	20.4	5.5	5.6	6.6	4.0
	31.6	7.4	7.7	8.2	4.9
	43.1	9.0	9.2	9.9	6.2
	48.4	9.6	9.9	10.7	6.8
	66.1	12.4	12.6	13.4	9.1
	74.7	14.1	14.6	15.5	11.6
	82.3	15.8	15.8	17.0	12.3

의 흡습평형함수율을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 흡습평형함수율은 백미가 가장 높은 값을 나타내었으며, 다음으로 현미, 벼의 순으로 높게 나타났으며, 왕겨가 가장 낮은 값을 나타내었다. 온도 30°C와 40°C에서도 같은 양상을 나타내었다.

#### 나. 모델의 적합성 검증

3개의 평형함수율 모델 즉, 수정 Henderson 모델, Chung-Pfost 모델 및 수정 Oswin 모델의 회귀

계수(실험상수)와 RMSE는 표 3과 같다. 평형함수율의 실험치와 각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.0031~0.0041 범위를 나타내어 3개 모델 중 가장 낮은 값을 나타내었으며, 왕겨의 경우는 Chung-Pfost 모델과 수정 Henderson 모델이 비슷한 수준을 나타내었다. 수정 Oswin 모델의 RMSE는 2개의 모델에 비하여 높은 값을 나타내었다. 함수율의 측정정도를 고려하여 실측 및 예측 함수율 사이의 RMSE의 허용수준을 0.005로 설

Table 3 Estimated regression coefficients and root mean square error for Chung-Pfost, modified Henderson and modified Oswin models

	Modified - Henderson Model								
	Regression coefficients			RMSE		R <sup>2</sup>			
	K	C	N	EMC	RH	EMC	RH		
Rough rice	0.00008935	18.652	2.1014	0.0038	0.0220	0.9924	0.9918		
Brown rice	0.00008922	13.338	2.1182	0.0041	0.0222	0.9921	0.9917		
White rice	0.00004796	23.688	2.2475	0.0031	0.0172	0.9948	0.9950		
Rice hull	0.00030945	10.360	1.8786	0.0050	0.0343	0.9827	0.9801		
	Chung - Pfost Model								
	Regression coefficients					RMSE		R <sup>2</sup>	
	A	B	C	E	F	EMC	RH	EMC	RH
Rough rice	283.97	19.029	19.780	0.2969	0.0526	0.0041	0.0220	0.9913	0.9919
Brown rice	251.93	18.322	14.154	0.3018	0.0546	0.0054	0.0246	0.9869	0.9899
White rice	348.54	18.962	22.479	0.3088	0.0699	0.0033	0.0152	0.9944	0.9962
Rice hull	189.73	22.828	9.5514	0.2298	0.0438	0.0046	0.0300	0.9848	0.9848
	Modified - Oswin Model								
	Regression coefficients			RMSE		R <sup>2</sup>			
	A	B	N	EMC	RH	EMC	RH		
Rough rice	0.1449	-0.00117	0.3385	0.0060	0.0246	0.9863	0.9900		
Brown rice	0.1556	-0.00137	0.3368	0.0078	0.0279	0.9785	0.9875		
White rice	0.1507	-0.00107	0.3137	0.0056	0.0211	0.9867	0.9929		
Rice hull	0.1226	-0.00130	0.3703	0.0060	0.0290	0.9796	0.9859		

RMSE(Root Mean Square Error).  
 RH(Relative Humidity).  
 EMC(Equilibrium Moisture Content).

정할 때, 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델은 허용수준을 만족하였으나, 수정 Oswin 모델은 허용수준을 벗어났다. 또한, EMC모델의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델의 경우 0.99 이상의 높은 값을 나타낸 반면, 수정 Oswin 모델은 0.98 수준을 나타내어 전자의 모델의 적합성이 높은 것을 알 수 있다.

한편, 평형상대습도의 실험치와 예측치 사이의

RMSE를 표 3에서 보면, 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.0172~0.0222 범위의 값을 나타내어 적합성이 매우 높게 나타났으나, 왕겨에서 0.0343로 다소 높은 값을 나타내었다. Chung-Pfost 모델의 경우는 0.0152~0.0246, 수정 Oswin 모델의 경우는 0.0211~0.0290 범위의 값을 나타내어 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다. 결정계수

는 3개의 모델 모두 0.98~0.99 범위의 값을 나타내었다.

그림 2~그림 4는 온도 20, 30 및 40℃에서 벼의 평형흡수율 실험치와 수정 Henderson 모델, Chung-Pfost 모델 및 수정 Oswin 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 온도 20℃와 30℃에서 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델의 예측치는 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났으나, 수정 Oswin 모델은 80%이상의 상대습도에서는 오차가 크게 나타났다.

온도가 40℃ 일 경우 수정 Henderson 모델에 의한 예측치는 실험치와 잘 일치하였으나, 상대습도 80% 이상에서는 Chung-Pfost 모델은 오차가 나타났으며, 수정 Oswin 모델은 20% 이하와 80% 이상의 상대습도 범위에서는 오차가 크게 나타났다. 현미, 백미 및 왕겨의 경우도 벼와 비슷한 양상을 나타내었다.

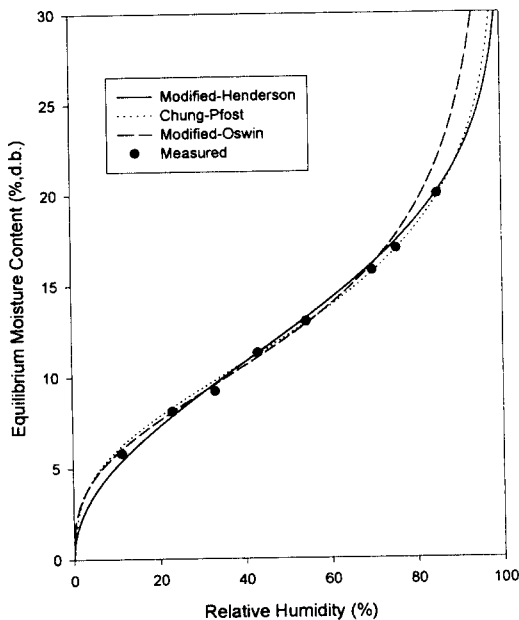


Fig. 2 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of rough rice by using Chung-Pfost, modified-Henderson, and modified-Oswin models at temperature 20℃.

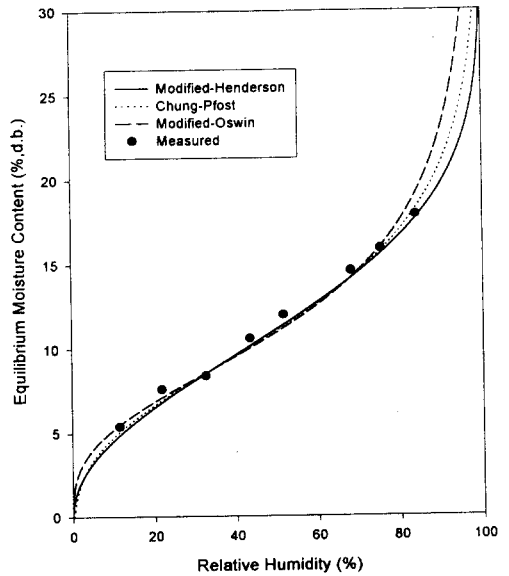


Fig. 3 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of rough rice by using Chung-Pfost, modified-Henderson, and modified-Oswin models at temperature 30℃.

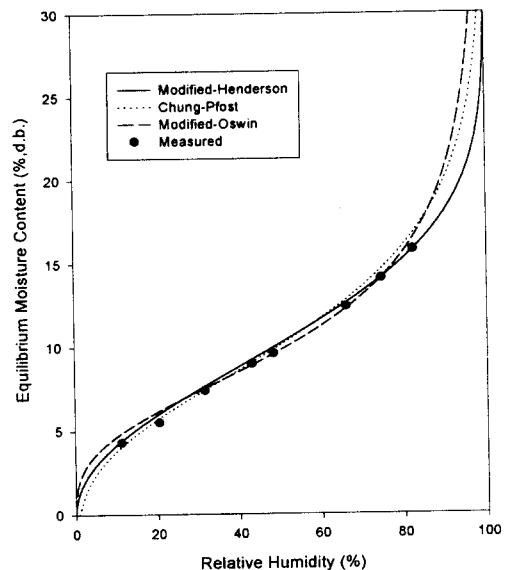


Fig. 4 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of rough rice by using Chung-Pfost, modified-Henderson, and modified-Oswin models at temperature 40℃.

이상의 결과를 종합하면, 평형함수율의 실험치와 예측치 사이의 RMSE가 가장 작은 값을 나타내고 전체의 상대습도 범위에서 잘 적합하는 수정 Henderson 모델이 가장 우수한 것으로 판단되며, Chung-Pfost 모델도 사용가능하나 수정 Oswin 모델은 적합하지 못한 것으로 판단된다.

그림 5~그림 8은 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율 실험치와 수정 Henderson 모델에 의한 예측치를 온도별로 비교한 것이다. 그림에서와 같이 실험치와 예측치가 전체 상대습도 범위에서 잘 일치함을 알 수 있다.

다. 이력현상

그림 9~그림 12는 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습과 방습평형함수율을 수정 Henderson 모델로 나타낸 것이다. 방습평형함수율은 금 등(2000)이 발표한 자료를 이용하였다. 그림에서와 같이 흡습평형함수율은 방습평형함수율에 비해 낮은 값을 나

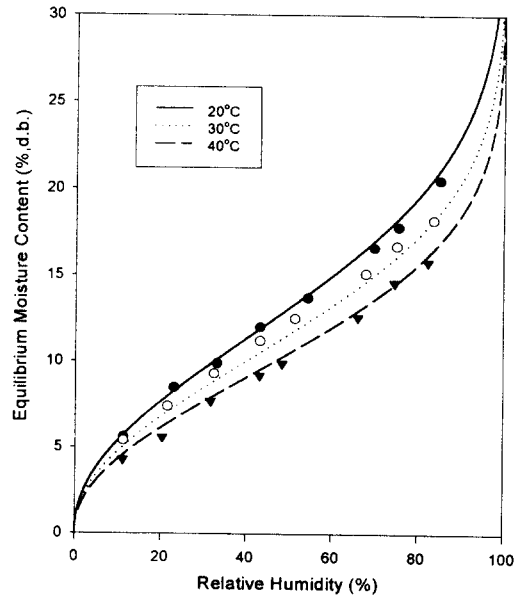


Fig. 6 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of brown rice by modified-Henderson model.

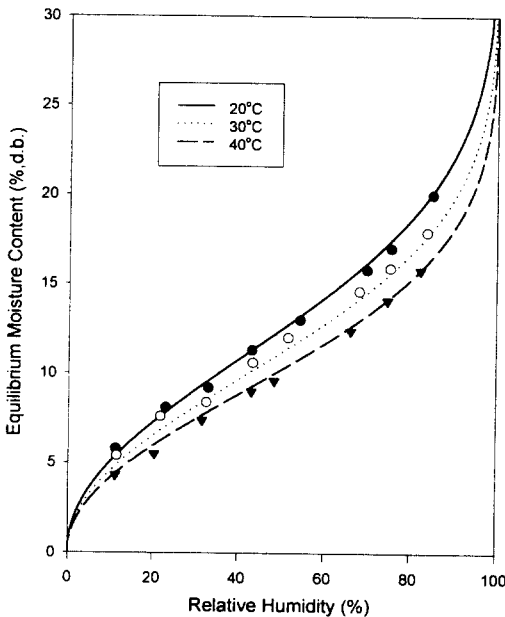


Fig. 5 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of rough rice by modified-Henderson model.

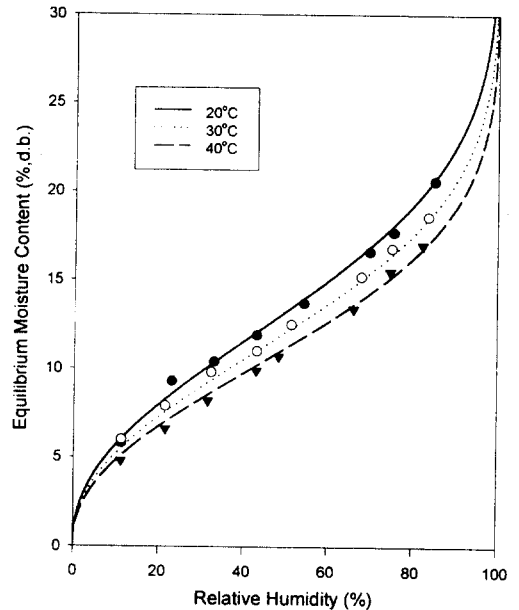


Fig. 7 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of white rice by modified-Henderson model.

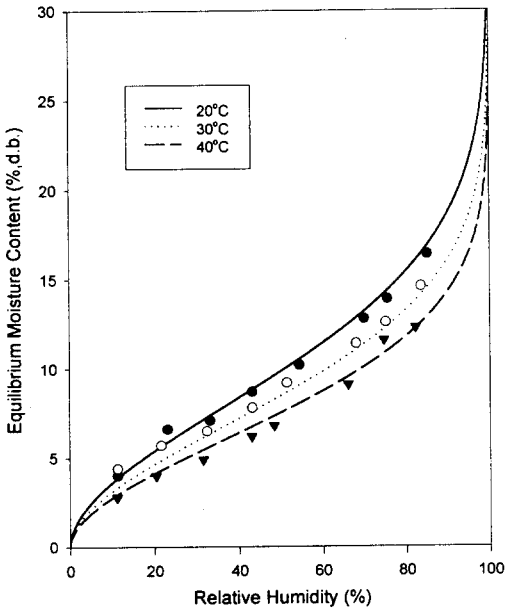


Fig. 8 Comparison of measured and predicted adsorption equilibrium moisture contents of rice hull by modified-Henderson model.

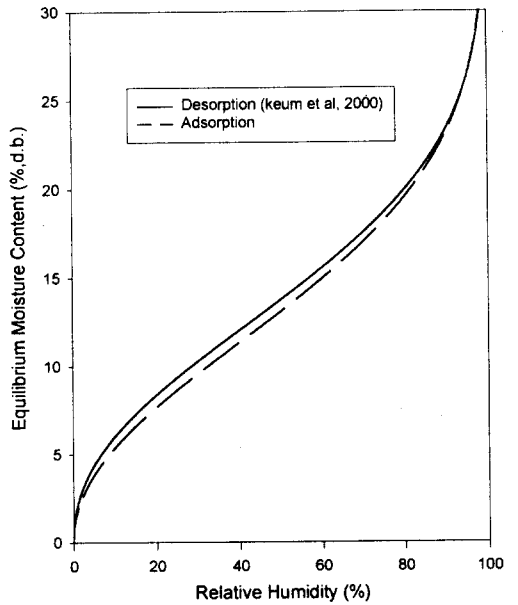


Fig. 10 Comparison of desorption and adsorption equilibrium moisture contents of brown rice by modified-Henderson model.

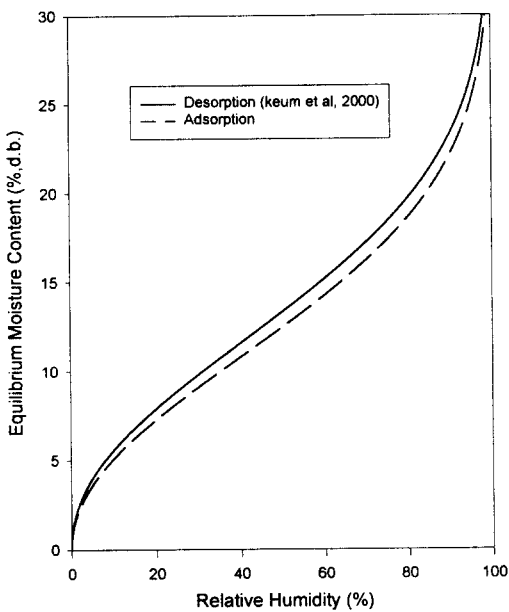


Fig. 9 Comparison of desorption and adsorption equilibrium moisture contents of rough rice by modified-Henderson model.

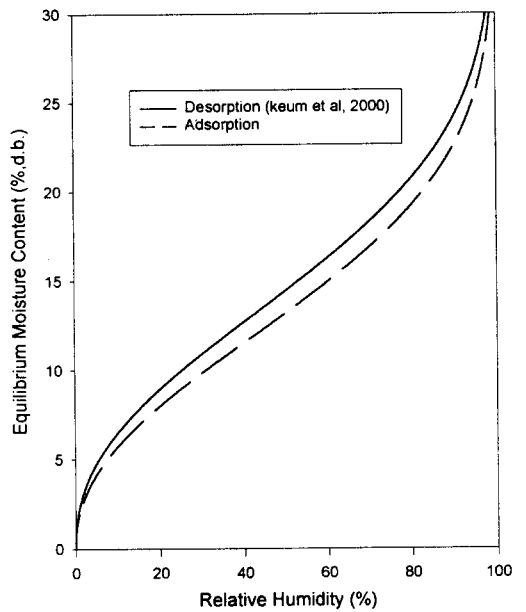


Fig. 11 Comparison of desorption and adsorption equilibrium moisture contents of white rice by modified-Henderson model.



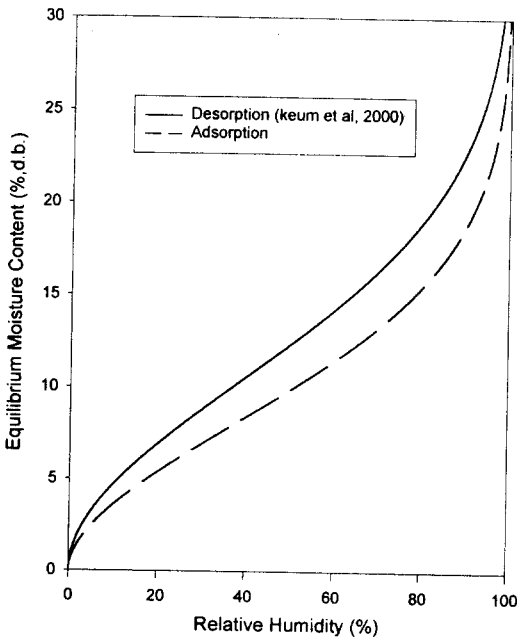


Fig. 12 Comparison of desorption and adsorption equilibrium moisture contents of rice hull by modified-Henderson model.

타냈다. 상대습도 60% 범위에서 벼의 경우 최대 1.4%(d.b.), 현미는 0.7%(d.b.), 백미는 1.9%(d.b.)의 차이가 났으며, 왕겨의 경우는 최대 6.1%(d.b.)까지 차이가 나는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 온도 20, 30 및 40°C의 3수준, 상대습도 11.2~85.0% 범위에서 8수준의 공기에 대한 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율을 정적방법으로 측정하였으며, 측정한 평형함수율은 곡물의 평형함수율 모델로 많이 이용되는 수정 Henderson 모델, Chung-Pfost 모델 및 수정 Oswin 모델에 적합시켜, RMSE를 기준으로 적합성을 판단하였다. SAS의 비선형회귀분석 프로그램을 분석에 이용하였다. 또한, 기존의 방습평형함수율과 비교하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 흡습평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났으며, 백미, 현미, 벼 및 왕겨 순으로 높게 나타났다.

2) 흡습평형함수율 측정자료를 수정 Henderson, Chung-Pfost 및 수정 Oswin 모델에 적합시켜 회귀계수를 결정하고 RMSE와 결정계수를 구하여 제시하였다.

3) 평형함수율의 실험치와 각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.0031~0.0041 범위로 가장 낮게 나타났고, 왕겨의 경우는 Chung-Pfost 모델과 수정 Henderson 모델이 비슷한 수준으로 나타났다. 결정계수는 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델의 경우 0.99 이상으로 나타났다.

4) 평형상대습도의 실험치와 예측치 사이의 RMSE는 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.0172~0.0222, 왕겨에서 0.0343으로 나타났으며, 결정계수는 3개의 모델 모두 0.98 ~ 0.99 범위로 나타났다.

5) 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 흡습평형함수율 모델로는 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델의 채택이 가장 바람직하며, 수정 Oswin 모델은 부적합한 것으로 판단되었다.

6) 기존의 방습평형함수율과 비교해 본 결과 흡습평형함수율의 값이 낮게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. ASAE STANDARDS. 1997. Moisture relationships of plant-based agricultural products. ASAE D245.5:452-464.
2. Chung, D. S. and H. B. Pfost. 1967. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. part II: development of the general isotherm equation. Transactions of the ASAE 10(4):552-555.
3. Chen, C. S. and J. T. Clayton. 1971. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. Transactions of the ASAE 14(5): 927-929.

4. Day, D. L. and G. L. Nelson. 1965. Desorption isotherms for wheat. Transactions of the ASAE 8(2):293-297.
5. Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of Research National Bureau of Standards 81A:89.
6. Henderson, S. M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agriculture Engineering 2:29-32.
7. 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 Korea).
8. Oswin, C. R. 1946. The kinetics of package life. III. isotherm. Journal of Chemical Industry 65:410-421.