

벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율†

Desorption Equilibrium Moisture Content of Rough Rice, Brown Rice, White Rice and Rice Hull

금 동 혁*
정회원
D. H. Keum

김 훈*
정회원
H. Kim

조 영 길**
정회원
Y. K. Cho

SUMMARY

This study was performed to determine desorption 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 available for rough rice, brown rice, white rice and rice hull.

주요용어(Key Words) : 방습평형함수율(Desorption equilibrium moisture content), 정적방법(Static method)

1. 서 론

곡물을 일정한 조건의 공기 중에 장시간 노출시키면 곡물 중의 수증기압과 주위 공기중의 수증기분압이 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. 평형함수율은 곡물의 건조와 저장 과정의 해석, 시스템 설계 및 운영에 있어서 기초가 되는 매우 중요한 요인 중의 하나다.

곡물의 평형함수율은 주의 공기의 온도와 상대습도의 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 항온항습기를 이용하여 측정하여 수정 Henderson 모델로 나타내어 보고한 바 있으나, 현미, 백미 및 왕겨에 대한 자료는 아직 없는 실정이다.

† 본 연구는 농림기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 성균관대학교 생명공학부 생물기전공학 전공

** 농촌진흥청 농업기계화연구소 가공기계과

본 연구의 목적은 국내에서 재배된 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율을 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 대한의 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율을 염용액을 이용한 정적방법으로 측정하고,

2) 평형함수율 측정치를 곡물의 평형함수율 모델로 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 장러 품종인 오대벼로 초기 함수율은 24.64%(d.b.)였다. 벼를 시험용 현미기(SYTH-88)와 시험용 정미기(SYTRM-92)를 사용하여 현미 및 백미 시료를 만들었으며, 벼, 현미, 백미 및 왕겨를 각 2kg씩 밀폐용기에 담아 완전 밀폐한 후 2℃의 저온실에 보관하였다.

나. 실험 방법

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

중류수를 담은 유리병을 각각 20, 30 및 40℃의

온도를 유지하는 항온기에 넣고 일정한 온도에 이르러 한 후 중류수에 염류를 넣어 혼합하면서 완전히 포화시켰다. 표 1에서와 같이 3수준의 온도별로 8종류의 염류를 포화시켜 유리병내의 공기가 8수준의 상대습도(11.2 ~ 85.1%)를 유지하도록 하였다.

이와 같이 상대습도와 온도가 일정하게 유지되는 유리병 내의 공간에 그림 1과 같이 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.

시료의 함수율은 10립-135℃-24hr 건조법으로 측정하였으며, 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 초기함수율은 각각 23.64, 24.39, 21.89 및 20.99%(d.b.)였다.

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

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

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

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

Temperature (°C)	Relative humidity (%)							
	LiCl	CH ₃ COOK	MgCl ₂	K ₂ CO ₃	Mg(NO ₃) ₂	KI	NaCl	KCl
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

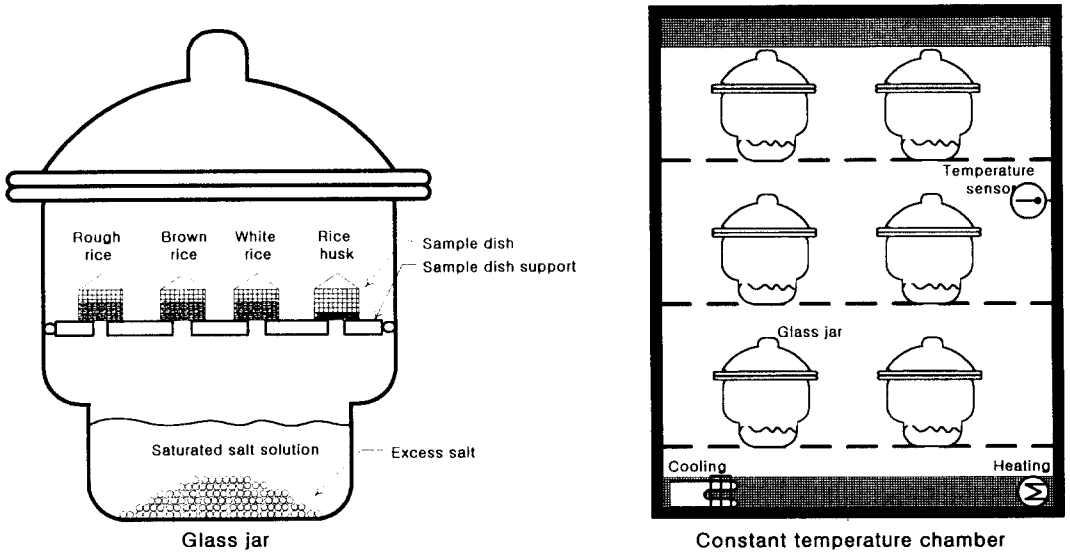


Fig. 1 Schematic diagram of constant relative humidity and temperature chamber.

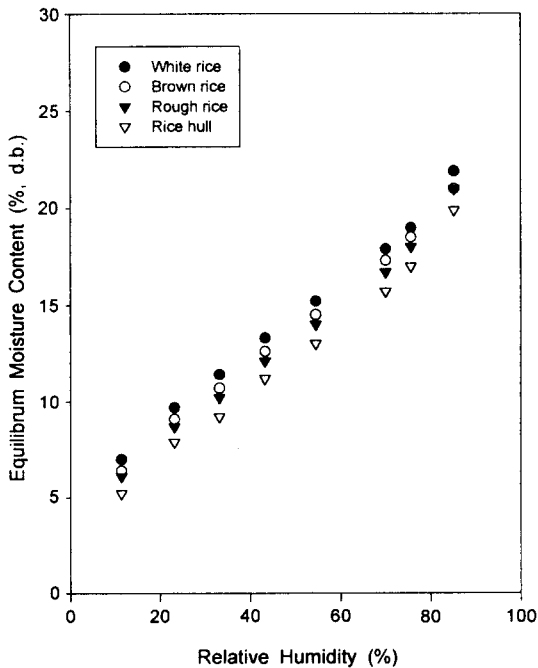


Fig. 2 Measured desorption equilibrium moisture contents of rough rice, brown rice, white rice and rice hull at temperature 20°C.

수정 Henderson 모델

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

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

수정 Oswin 모델

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

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

여기서, M = 평형함수율(dec, d.b.)

RH = 상대습도(dec)

T = 온도(°C)

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 결정에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 평형함수율

모든 시료는 실험시작 후 3주 내에 무게가 급격히

Table 2 Measured desorption 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	6.1	6.4	7.0	5.2
	23.1	8.7	9.1	9.7	7.9
	33.1	10.2	10.7	11.4	9.2
	43.2	12.1	12.6	13.3	11.2
	54.4	14.0	14.5	15.2	13.0
	69.9	16.7	17.3	17.9	15.7
	75.5	18.0	18.5	19.0	17.0
	85.1	21.0	21.0	21.9	19.9
30	11.3	5.6	5.7	6.4	5.0
	21.6	7.8	8.1	8.8	6.8
	32.4	9.2	9.8	10.5	8.0
	43.2	11.2	11.5	12.2	9.9
	51.4	12.5	12.9	13.5	11.1
	67.9	15.2	15.5	16.2	13.8
	75.1	16.9	17.0	17.8	15.3
	83.6	18.9	18.9	19.7	17.6
40	11.2	4.3	4.7	4.8	3.3
	20.4	6.0	6.4	6.8	4.9
	31.6	7.7	8.4	8.7	6.4
	43.1	9.5	10.1	10.5	7.8
	48.4	10.3	10.8	11.3	8.4
	66.1	13.1	13.7	13.9	11.1
	74.7	14.5	15.1	15.7	12.9
	82.3	15.9	16.0	17.2	15.0

감소하였으며, 7~14주 내에 평형함수율에 도달하였다. 온도 3수준, 상대습도 8수준의 공기에 대한 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율은 표 2와 같다. 표에서와 같이 방습평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났다.

그림 2는 온도 20°C에서 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 방습평형함수율은 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. 평형함수

율의 실험치와 각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.0030~0.0046 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 훨씬 높은 값을 나타내었다. 함수율의 측정정도를 고려하여 실측 및 예측 함수율 사이의 RMSE의 허용수준을 0.005로 설정할 때, 수정 Henderson 모델과 Chung-Pfost 모델은 허용수준을 만족하였으나, 수정 Oswin 모델은 허용수준을 벗어났다. 또한, EMC모델의 결정 계수(R^2)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

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^2		
	K	C	N	EMC	RH	EMC	RH	
Rough rice	0.00007836	13.058	2.1581	0.0037	0.0188	0.9935	0.9940	
Brown rice	0.00005224	12.844	2.2788	0.0030	0.0151	0.9956	0.9962	
White rice	0.00002076	11.3595	2.3437	0.0036	0.0187	0.9937	0.9941	
Rice hull	0.000196	5.1966	1.9680	0.0046	0.0250	0.9895	0.9894	

Chung - Pfost Model									
	Regression coefficients					RMSE		R^2	
	A	B	C	E	F	EMC	RH	EMC	RH
Rough rice	260.78	18.379	13.848	0.3027	0.0544	0.0047	0.0206	0.9897	0.9929
Brown rice	289.14	18.481	14.281	0.3066	0.0541	0.0052	0.0214	0.9877	0.9924
White rice	290.96	18.151	11.654	0.3126	0.0551	0.0046	0.0219	0.9901	0.9920
Rice hull	178.10	19.156	5.0829	0.2705	0.0522	0.0043	0.0231	0.9904	0.9910

Modified - Oswin Model								
	Regression coefficients			RMSE		R^2		
	A	B	N	EMC	RH	EMC	RH	
Rough rice	0.1571	-0.00136	0.3301	0.0066	0.0239	0.9847	0.9908	
Brown rice	0.1604	-0.00131	0.3140	0.0071	0.0251	0.9812	0.9901	
White rice	0.1701	-0.00143	0.3032	0.0067	0.0248	0.9836	0.9904	
Rice hull	0.1538	-0.00168	0.3569	0.0065	0.0228	0.9846	0.9916	

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

RMSE를 표 3에서 보면, 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.015~0.019 범위의 값을 나타내어 적합성이 매우 높게 나타났으나, 왕겨에서 0.025로 다소 높은 값을 나타내었다. Chung-Pfost 모델의 경우는 0.021~0.023, 수정 Oswin 모델의 경우는 0.023~0.025 범위의 값을 나타내어 수정 Henderson 모델에 비하여 다소 높은 값을 나타내었다. 결정계수는 3개의 모델 모두 0.99이상의 값을 나타내었다.

그림 3~그림 5는 온도 20, 30 및 40℃에서 벼의 평형함수율 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 상대습도 30% 이하에서는 Chung-Pfost 모델, 70% 이상에서는 수정 Henderson 모델이 잘 일치함을 알 수 있으며, 수정 Oswin 모델은 20% 이하와 80% 이상의 상대습도 범위에서는 오차가 크게 나타났다. 현미, 백미 및 왕겨의 경우도 벼와 비슷한 양상을 나타내었다.

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 적합지 못한 것으로 판단된다.

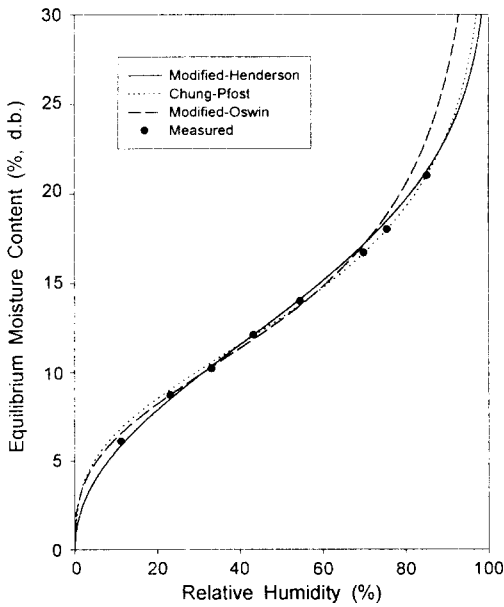


Fig. 3 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of rough rice by using Chung-Pfost, modified-Henderson, and modified-Oswin models at temperature 20°C.

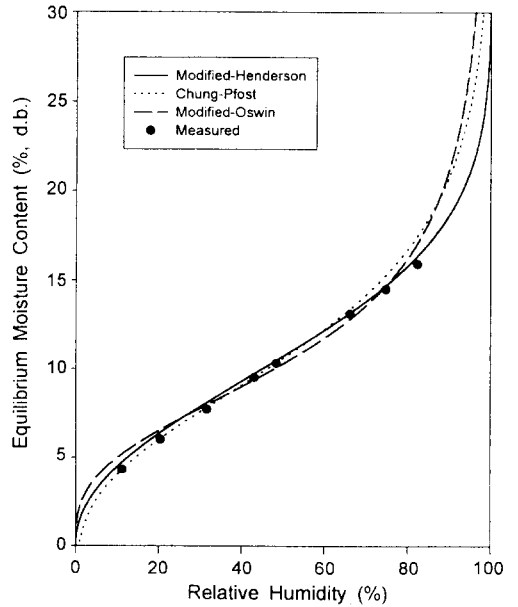


Fig. 5 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of rough rice by using Chung-Pfost, modified-Henderson, and modified-Oswin models at temperature 40°C.

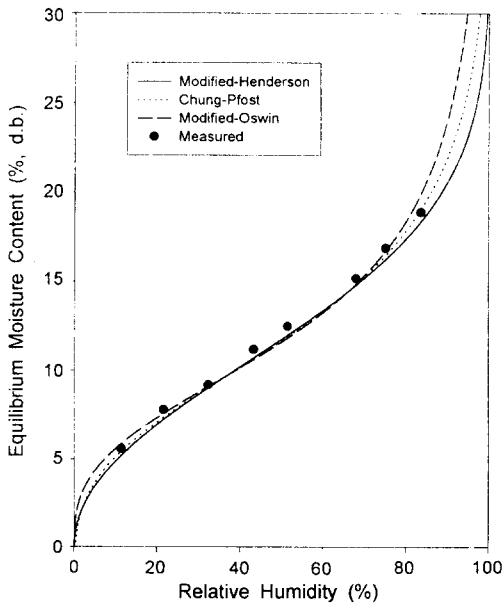


Fig. 4 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of rough rice by using Chung-Pfost, modified-Henderson, and modified-Oswin models at temperature 30°C.

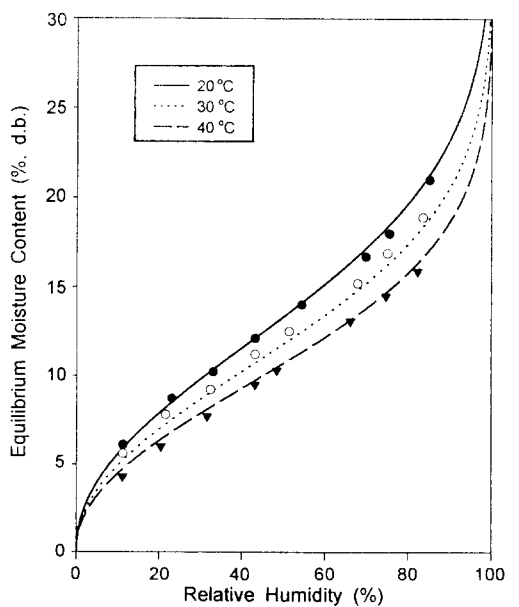


Fig. 6 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of rough rice by Modified-Henderson model.

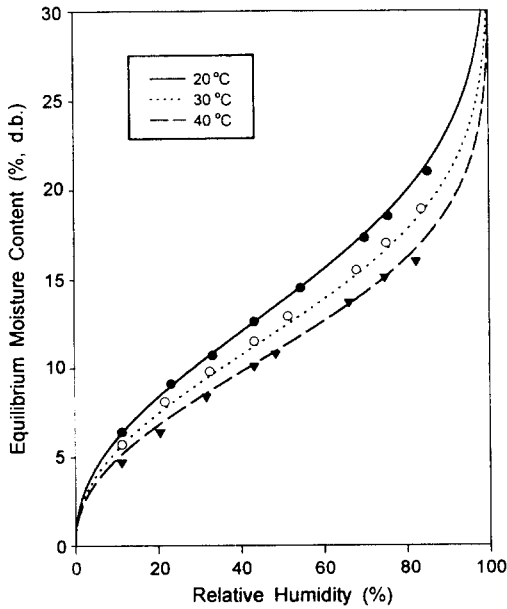


Fig. 7 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of brown rice by Modified-Henderson model.

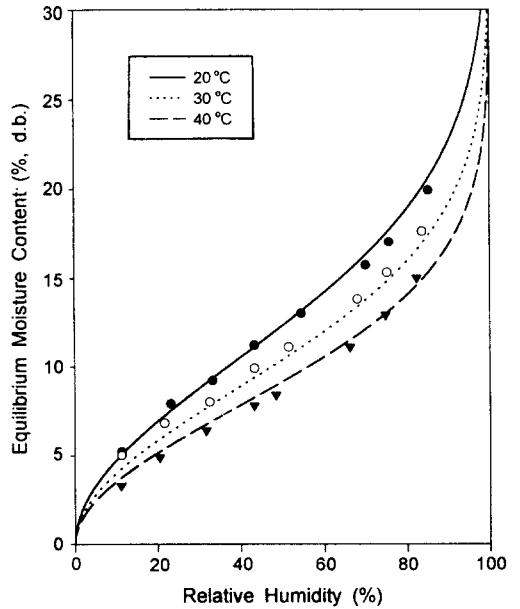


Fig. 9 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of rice hull by Modified-Henderson model.

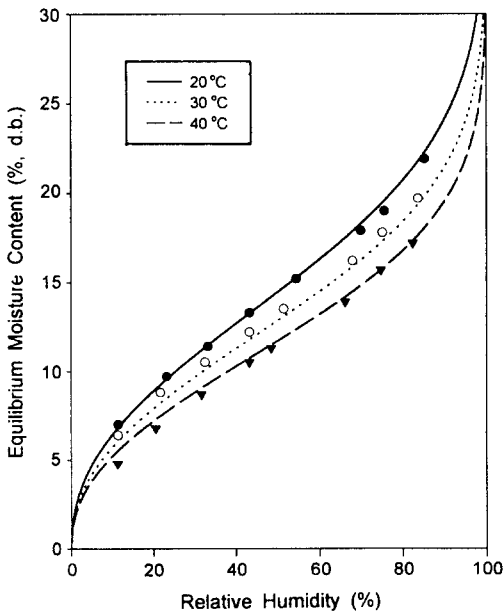


Fig. 8 Comparison of measured and predicted desorption equilibrium moisture contents of white rice by Modified-Henderson model.

그림 6~그림 9는 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율 실험치와 수정 Henderson 모델에 의한 예측치를 온도별로 비교한 것이다. 그림에서와 같이 실험치와 예측치가 전체 상대습도 범위에서 잘 일치함을 알 수 있다.

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 방습평형함수율을 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.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 방습평형함수율은 온도가 높을수록, 상대습도가 낮을수록 낮게 나타났으며, 백미, 현미, 벼 및 왕겨 순으로 높게 나타났다.
2. 방습평형함수율 측정자료를 수정 Henderson, Chung-Pfost 및 수정 Oswin 모델에 적합시켜 회귀

계수를 결정하고 RMSE와 결정계수를 구하여 제시하였다.

3. 평형함수율의 실험치와 각 모델에 의한 예측치 사이의 RMSE는 수정 Henderson 모델의 경우 벼, 현미 및 백미에서 0.0030~0.0046 범위로 가장 낮게 나타났고, 왕겨의 경우는 Chung-Pfost 모델과 수정 Henderson 모델이 비슷한 수준으로 나타났다. 결정 계수는 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 0.015~0.019, 왕겨에서 0.025로 가장 낮게 나타났으며, 결정계수는 3개의 모델 모두 0.99 이상의 나타났다.

5. 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율 모델로는 수정 Henderson 모델의 채택이 가장 바람직하며, 수정 Oswin 모델은 부적합한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 고희균. 1978. 벼의 평형함수율 측정에 관한 연구. 한국농업기계학회지 3(2):62-68.
2. 금동혁. 1986. 벼 건조과정 분석에 필요한 자료 및 관련식. 한국농업기계학회지 11(2):92-102.
3. ASAE STANDARDS. 1997. Moisture relationships of plant-based agricultural products. ASAE D245.5:452-464.
4. 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.
5. 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.
6. Day, D. L. and G. L. Nelson. 1965. Desorption isotherms for wheat. Transactions of the ASAE 8(2):293-297.
7. Greenspan, L. 1977. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. Journal of Research National Bureau of Standards 81A:89.
8. Henderson, S. M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. Agriculture Engineering 2:29-32.
9. Oswin, C. R. 1946. The kinetics of package life. III. isotherm. Journal of Chemical Industry 65:410-421.