

# 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율

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

금 동 혁*	김 훈*	조 영 길**
정회원	정회원	정회원
D. H. Keum	H. Kim	Y. K. Cho

### 1. 서론

곡물 중의 수증기압이 공기 중의 수증기압보다 크면 곡물 중의 수분이 증발하면서 공기와 평형을 이루게 되고, 반대로 곡물 중의 수증기압이 주위 공기 중의 수증기압보다 낮으면 곡물은 주위 공기로부터 수분을 흡수하여 평형을 이루게 된다. 이와 같이 곡물이 주위 공기와 평형을 이루었을 때 그 곡물의 수분함량을 주어진 주위공기 조건에서의 평형함수율(Equilibrium Moisture Content, EMC)이라 한다. 평형함수율은 곡물의 건조와 저장시스템 설계 및 운영에 있어서 매우 중요한 요인이 된다.

곡물은 품종, 수확년도, 수확시기 및 수확지역에 따라 평형함수율이 다르게 나타난다. 따라서, 매년 곡물의 평형함수율을 측정하는 것은 사실상 불가능하므로, 회귀분석 등 수치해석적 방법으로 모델화하여 사용하는 것이 일반적인 방법이다. 구미나 일본 등에서는 자국에서 생산되는 곡물의 평형함수율을 대부분 모델화하여 이용하고 있다. 그러나, 국내에서는 외국의 자료를 그대로 이용하거나 일부 변환해서 사용하고 있는 현실이다. 국내에서 생산되는 벼는 품종, 크기, 성분 등 물성이 외국의 벼와 비교해서 판이하게 다르므로 외국의 평형함수율 자료를 이용하는 것은 건조·저장 시스템의 성능을 저하시키는 중요한 원인이 된다. 따라서 국내에서 생산되는 벼의 평형함수율을 결정하는 것은 매우 중요한 과제이다.

본 연구의 목적은 국내에서 생산되는 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율을 온도 20 ~ 40°C, 상대습도 10 ~ 85%범위에서 정적인 방법으로 측정하는데 있다. 측정된 방습평형함수율은 Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin 방정식과 비선형회귀분석으로 회귀계수를 결정하고 RMSE(Root Mean Square Error)을 기준으로 모델의 적합성을 검증한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 공시재료

공시재료는 1997년 10월 경기도 철원지역에서 수확한 정부 보급 장려 품종인 오대벼이다. 공시재료의 초기 함수율은 24.2%(d.b.)이었다. 현미는 벼를 시험용 현미기로 탈부하였

\* 성균관대학교 생명자원과학부 생물기전공학과

\*\* 농촌진흥청 농업기계화연구소 가공기계과

고, 시험용 정미기로 정백수율 90%의 백미를 정미하여 공시재료로 사용하였다. 벼를 탈부하는 과정에서 왕겨를 분리하여 로탑시험기로 이물질을 제거한 후 공시재료로 사용하였다.

**나. 실험 방법**

본 연구의 방습평형함수 실험은 염용액을 이용하여 조성된 공기 중에 시료를 노출시키는 정적인 방법(static method)을 이용하였다. 표 1은 서로 다른 온도에서 염용액의 종류에 따른 각각의 평형상대습도를 나타내고 있다. (Greenspan, 1977)

표에서와 같이 본 연구에서는 온도를 20, 30, 40℃, 상대습도는 11.2 ~ 85.0%범위(8수준)에서 방습평형함수 실험을 수행하였다.

**Table 1 Difference temperature of equilibrium relative humidity for saturated salt solutions.**

Temperature (℃)	Salt (%)							
	<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

벼와 백미 및 현미는 10g, 왕겨는 3g을 stainless 철망으로 제작된 시료상자(40×40×50)에 담아 상대습도가 일정한 데시케이타에 넣고 항온기(-2℃ ~60℃ ±0.5℃)에서 실험을 시작하였다.

벼, 백미, 현미 및 왕겨의 초기함수율은 10립-135℃-24hr 건조법으로 측정된 후 표준 측정방법인 105도법으로 환산하였다. 벼, 백미, 현미 및 왕겨의 초기함수율은 23.64, 21.89, 24.39, 20.99 (%.d.b.)였다. 실험시작 후 1주일 간격으로 전자저울(satorius 420P ±0.001)을 이용하여 무게를 측정하였다. 시료의 무게 변화가 3주간 연속해서 0.002g 이하의 변화를 보일 때를 평형함수율에 도달한 것으로 하였다.

측정한 방습평형함수율 데이터는 기존의 모델과 SAS(ver 6.12)의 비선형회귀분석으로 회귀계수를 결정하고 RMSE(Root Mean Square Error)을 기준으로 적합성을 검정하였다. 평형함수율모델은 ASAE Standards에 제시되어 있는 Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin 방정식을 이용하였다. (ASAE D245.5, 1997.)

본 연구에서 사용한 모델은 다음의 식 (1),(2),(3)와 같다.

Chung-Pfost Equation

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

$$M = E - F \ln [ -(T+C) \ln(RH) ] \dots \dots \dots \text{식 (1)}$$

Modified-Henderson Equation

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

$$M = 0.01 \left[ \frac{\ln(1-RH)}{-K(T+C)} \right]^{\frac{1}{N}} \dots \dots \dots \text{식 (2)}$$

Modified-Oswin Equation

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

$$M = (A + B T) \left( \frac{RH}{1 - RH} \right)^N \dots \dots \dots \text{식 (3)}$$

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

RH = Relative humidity(dec)

T = Temperature(°C)

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

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 방습평형함수율

본 연구에서 측정된 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율은 표 2와 같다. 표에서와 같이 방습평형함수율은 온도가 높을수록 낮고, 상대습도가 높을수록 높은 것으로 나타났다. 같은 공기조건하에서의 곡물은 백미, 현미, 벼 및 왕겨 순으로 높게 나타났다.

상대습도 82%이상에서는 3주에서 5주사이에 곰팡이의 발생이 육안으로 확인되었지만 무게 변화에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단하여 무시하였다.

Table 2 Experimental desorption equilibrium moisture content data 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	5.0	5.3	5.8	4.1
	23.1	7.6	8.0	8.5	6.8
	33.1	9.1	9.6	10.2	8.1
	43.2	11.0	11.5	12.1	10.1
	54.4	13.0	13.5	14.1	11.9
	69.9	15.7	16.3	16.8	14.7
	75.5	17.0	17.5	17.9	16.0
	85.1	20.0	20.0	20.9	18.9
30	11.3	4.5	4.6	5.2	3.9
	21.6	6.7	7.0	7.6	5.7
	32.4	8.1	8.7	9.3	6.9
	43.2	10.1	10.4	11.0	8.8
	51.4	11.4	11.8	12.4	10.0
	67.9	14.2	14.5	15.1	12.8
	75.1	15.9	16.0	16.7	14.3
	83.6	17.9	17.9	18.6	16.6
40	11.2	3.1	3.5	3.5	2.1
	20.4	4.9	5.3	5.6	3.7
	31.6	6.6	7.3	7.5	5.3
	43.1	8.4	9.0	9.3	6.7
	48.4	9.2	9.7	10.1	7.3
	66.1	12.0	12.6	12.8	10.0
	74.7	13.5	14.1	14.6	11.8
	82.3	14.9	15.0	16.1	14.0

## 나. 모델의 적합성 검정

표 3은 측정된 방습평형함수율 데이터를 이용하여 Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin 방정식과 비선형회귀분석으로 회귀계수를 결정하고 RMSE (Root Mean Square Error)를 구한 결과이다. 세 가지 모델에서 Modified-Henderson 방정식이 왕겨를 제외한 벼, 현미 및 백미의 방습평형함수율 모델에 가장 적합한 것으로 나타났고, Chung-Pfost 방정식은 왕겨의 방습평형함수율 모델에 적합한 것으로 나타났다. 그러나 Chung-Pfost 방정식과 Modified-Henderson 방정식의 RMSE는 유사하게 나타나서, 두 모델은 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율 모델로 매우 적합한 것으로 판단된다. Modified-Oswin 방정식은 두 방정식 보다 RMSE가 비교적 높게 나타났지만, 방습평형함수율모델로 이용할 수 있는 것으로 판단된다.

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

Equation	Regression coefficients					RMSE		
	A	B	C	E	F	RH	EMC	
Chung-Pfost	Rough rice	209.7093	18.1866	13.8183	0.2939	0.0550	0.02037	0.00466
	Brown rice	232.0441	18.2862	14.2649	0.2979	0.0547	0.02106	0.00517
	White rice	230.8337	17.9161	11.8975	0.3037	0.0558	0.02091	0.00473
	Rice hull	141.9694	18.9519	5.0911	0.2615	0.0528	0.02317	0.00443
Equation	Regression coefficients			RMSE				
	K	C	N	RH	EMC			
Modified-Henderson	Rough rice	0.000167	13.5627	1.9257	0.02035	0.00405		
	Brown rice	0.000117	13.3872	2.0420	0.01722	0.00355		
	White rice	0.000097	12.0640	2.0909	0.02087	0.00415		
	Rice hull	0.000418	5.6864	1.7272	0.02739	0.00523		
Equation	Regression coefficients			RMSE				
	A	B	N	RH	EMC			
Modified-Oswin	Rough rice	0.1461	-0.00137	0.3706	0.02749	0.00797		
	Brown rice	0.1493	-0.00132	0.3508	0.02845	0.00833		
	White rice	0.1581	-0.00143	0.3404	0.02850	0.00801		
	Rice hull	0.1426	-0.00169	0.4073	0.02820	0.00838		

RMSE(Root Mean Square Error)

RH(Relative Humidity)

EMC(Equilibrium Moisture Content)

그림 1은 온도 20, 30, 40℃에서 측정된 벼의 방습평형함수율 데이터와 3가지 예측방정식을 비교한 것이다. 그림과 같이 온도 20℃에서 Chung-Pfost, Modified-Henderson 방정식은 80%이상의 높은 상대습도에서도 정확히 예측하는 것으로 나타났다. Modified-Oswin 방정식은 80%이상의 상대습도에서는 예측 오차가 크게 나타났다. 온도 30℃에서는 Modified-Oswin 방정식은 80%이상의 높은 상대습도에서의 예측 오차가 크게 나타났고, 다른 범위에서는 모든 방정식이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 온도 40℃에서는 상대

습도 30%이하의 낮은 상대습도에서는 Chung -Pfost 방정식이, 70%이상의 높은 상대습도 범위에서는 Modified-Henderson 방정식이 측정값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

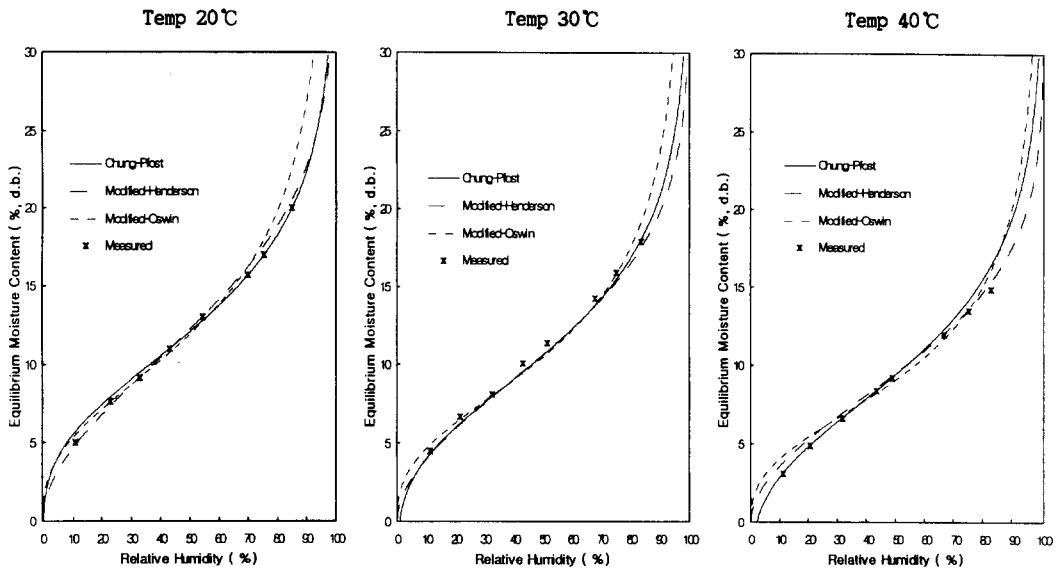


Fig. 1 Measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content of rough rice using Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin equation for temperatures 20°C, 30°C, 40°C.

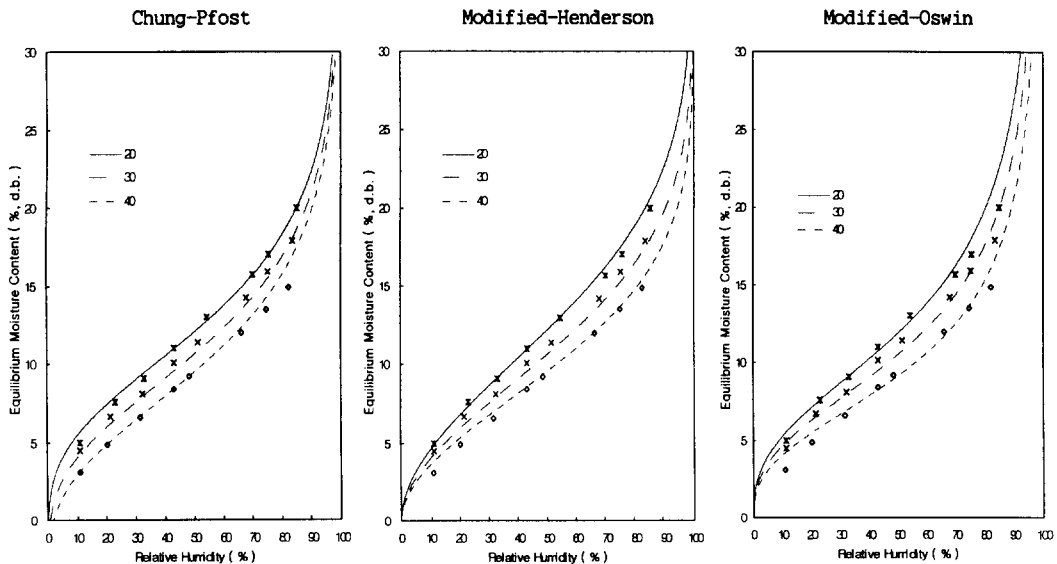


Fig. 2 Comparison of measured data and the predicted desorption equilibrium moisture content of temperatures using Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin equation for rough rice.

그림 2는 Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin 방정식으로 예측한 벼의 방습평형함수율과 실측치를 온도별로 비교한 것이다. 그림에서와 같이 방습평형함수율은 20°C, 30°C, 40°C 순으로 높게 나타났다. 그림에서와 같이 Chung-Pfost 방정식과 Modified-Henderson 방정식은 전체 상대습도 범위에서 벼의 방습평형함수율을 정확히 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 Modified-Oswin 방정식은 높은 상대습도 범위에서는 예측 오차가 크게 나타났다.

## 4. 결론

본 연구에서는 온도 20 ~ 40°C, 상대습도 10 ~ 85%범위에서의 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율을 정적인 방법으로 측정하였다. 측정된 평형함수율은 Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin 방정식과 비선형회귀분석으로 회귀계수를 결정하고 RMSE(Root Mean Square Error)을 기준으로 하여 적합성을 검정하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 방습평형함수율은 온도가 높을수록 낮게 나타났고, 상대습도가 높을수록 높게 나타났다. 곡류는 백미, 현미, 벼, 왕겨 순으로 높게 나타났다.
2. 측정된 방습평형함수율 데이터와 Chung-Pfost, Modified-Henderson, Modified-Oswin 방정식을 비선형회귀분석으로 회귀계수와 RMSE를 구한 결과는 표 3에 제시하였다.
3. 상대습도가 종속변수인 경우 왕겨의 RMSE는 Chung-Pfost 방정식이, 벼, 현미 및 백미는 Modified-Henderson 방정식이 가장 낮게 나타났다. 온도가 종속변수인 경우 벼, 현미 및 백미의 RMSE는 Modified-Henderson 방정식이, 왕겨는 Chung-Pfost 방정식이 가장 낮게 나타났다.
4. 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율은 본 연구에서 새로운 회귀계수를 결정한 Chung-Pfost 방정식과 Modified-Henderson 방정식으로 정확히 예측할 수 있으며, Modified-Oswin 방정식은 80%이상의 높은 상대습도를 제외한, 다른 범위에서는 예측이 가능하다.

## 참고문헌

1. 고헌균, 금동혁외 5인. 1990. 농산가공기계학. 향문사.
2. ASAE STANDARDS. 1997. Moisture Relationships of Plant-Based Agricultural Products. ASAE D245.5:452-464.
3. 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.
4. Greenspan, L. 1977. Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions. Journal of Research. National Bureau of Standards. 81A:89.
5. Henderson, S.M. 1952. A Basic Concept of Equilibrium Moisture. Agriculture Engineering. 2:29-32.
6. Oswin, C.R. 1946. The Kinetics of Package Life. III. Isotherm. J. Chem. Industry. 65:410-421