

곡류 및 버섯류의 평형함수율 및 박층건조방정식에 관한 연구 (II)
- 표고버섯에 대하여 -

Equilibrium Moisture Contents and Thin Layer Drying
Equations of Cereal Grains and Mushrooms (II)
- for Oak Mushroom (*Lentinus edodes*) -

금동혁	김 훈	홍남운
정희원	정희원	
D. H. Keum	H. Kim	N. U. Hong

ABSTRACT

Desorption equilibrium moisture contents of oak mushroom were measured by the static method using salt solutions at four temperature levels of 35°C, 45°C, 55°C and 65°C and five relative humidity levels in the range from 11.0% to 90.8%. EMC data were fitted to the modified Henderson, Chung-Pfost, modified Halsey and modified Oswin models using nonlinear regression analysis.

Drying tests for oak mushroom were conducted in an experimental dryer equipped with air conditioning unit. The drying test were performed in triplicate at four air temperatures of 35°C, 45°C, 55°C and 65°C and three relative humidities of 30%, 50% and 70% respectively. Measured moisture ratio data were fitted to the selected four drying models(Lewis, Page, simplified diffusion and Thompson models) using stepwise multiple regression analysis.

The results of comparing root mean square errors for EMC models showed that modified Halsey was the best model, and modified Oswin models could be available for oak mushroom.

The results of comparing coefficients of determination and root mean square errors of moisture ratio for four drying models showed that Page model were found to fit adequately to all drying test data with a coefficient of determination of 0.9990 and root mean square error of moisture ratio of 0.00739.

Keywords : Oak mushroom, EMC, Drying model, Thin layer drying.

1. 서 론

표고버섯의 함수율은 70~90%로 높은 수분을 함유하고 있어 저장 중 수분손실로 인한 수축현상, 효소에 의한 갈변현상, 갖의 개열 및 자루의

신장, 호흡속도의 감소, 버섯의 성분 중 mannitol 함량의 감소 및 맛과 향의 손실 및 부패 등으로 저장이 어렵다. 표고버섯은 건조를 통하여 미생물이나 효소의 작용을 억제하여 저장성이 높아지고, 중량과 부피의 감소로 수송이 간편하게 되며, 새

The article was submitted for publication in February 2002, reviewed and approved by the editorial board of KSAM in May 2002. The authors are Dong Hyuk Keum, Professor, Hoon Kim, Research Associate, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Korea, Nam Un Hong, Chief of the HQ, Bohae Brewery, 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>.

로운 풍미와 조직을 갖추어 기호성이 향상된다.

표고버섯의 건조에는 자연건조와 열풍건조방법이 이용되고 있다. 자연건조방법은 일광과 바람으로 건조하는 방법으로 함수율 15~20% 정도까지 건조가 가능하나 건조중 곰팡이나 해충이 발생하기 쉬워 고품질로 건조하는데 어려움이 있다. 열풍건조방법은 건조시간이 짧고, 자연건조에 비해 비교적 균일한 품질의 표고버섯을 제조할 수 있으며, 외관과 광택 및 색깔이 선명하며 동시에 독특한 맛과 향이 있는 제품을 얻을 수 있다.

현재 국내에서는 상자형 농산물건조기가 표고버섯의 열풍건조에 이용되고 있다. 열풍건조기의 적정 건조조건 규명과 개선을 위해서는 평형함수율, 건조방정식 등의 기초적인 연구가 선행되어야 한다. 그러나, 이와 관련된 연구가 일부 이루어지고 있으나 연구결과가 미진한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 실험을 통하여 표고버섯의 정적 평형함수율과 열풍건조속도를 측정하고, 적절한 건조모델을 개발하는데 있다.

2. 문헌개요

가. 평형함수율

평형함수율의 모델에는 이론, 반이론 및 실험 모델 등 많은 모델이 사용되고 있으나, 이 중에서 수정 Henderson(1952), Chung-Pfost(1967), Oswin(1946) 및 수정 Halsey모델(1987) 등이 농산물의 평형함수율을 나타내는 모델로 많이 이용된다. 이들 모델은 각각 다음 식으로 표시된다.

수정 Henderson모델

$$RH = 1 - \exp[-A \cdot (T + C) \cdot (M_D)^B] \dots\dots\dots (1)$$

Chung-Pfost모델

$$RH = \exp\left[-\frac{A}{(T+C)} \exp(-B \cdot M_D)\right] \dots\dots\dots (2)$$

수정 Halsey모델

$$RH = \exp\left[-\frac{\exp(A+B \cdot T)}{(M_D)^C}\right] \dots\dots\dots (3)$$

수정 Oswin모델

$$RH = \frac{1}{(A + BT / M_D)^{\frac{1}{C}} + 1} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, M_D = 평형함수율(dec, d.b.)
 RH = 상대습도(dec)
 T = 온도(°C)
 A, B, C = 실험상수

Flood와 White(1984)는 옥수수의 평형함수율에 식 (1)과 (2)를 사용하였고, Pappas와 Rao(1987)는 콩의 평형함수율 측정에 식 (1), (2) 및 (3)을 이용하였다. 최(1992)는 태극삼의 방습 및 흡습평형함수율과 백삼의 방습 평형함수율 예측에는 Oswin 모델, 백삼의 흡습평형함수율 예측에는 Henderson 모델이 가장 적합하다고 보고하였다. 금 등(2000)은 벼, 현미, 백미 및 왕겨의 방습평형함수율이 Chung-Pfost모델과 수정 Henderson모델로 정확히 예측할 수 있다고 보고하였다.

나. 건조모델

건조모델에 관한 연구로는 Lewis(1921)의 Newton 냉각법칙을 이용한 건조모델, Page(1949)의 옥수수 박층건조실험에 적용한 모델, Henderson(1952)의 수분확산법칙 해에 기초한 건조 모델, Thompson(1968)의 건조모델 등이 이용되고 있으며, 이들 모델들은 다음과 같다.

Lewis모델

$$MR = \exp(-k_1 \cdot t) \dots\dots\dots (5)$$

Page모델

$$MR = \exp(-P \cdot t_o^Q) \dots\dots\dots (6)$$

축소수분확산모델

$$MR = A \exp(-k_2 \cdot t) \dots\dots\dots (7)$$

Thompson모델

$$t = A \cdot \ln(MR) + B \cdot (\ln MR)^2 \dots\dots\dots (8)$$

여기서, MR = 함수율비(dec)
 t = 건조시간(hr)
 t_o = 건조시간(min)
 A, B, k, P, Q = 실험상수

Syarief(1984)는 해바라기씨 건조 실험에 Lewis, Page 및 Thompson모델을 적용하였으며, 최(1992)

는 인삼의 건조모델에 Thompson, 유사확산모델 및 실험모델을 금 등(1997)은 벼의 박충건조모델에 Page 및 Thompson모델이 적합한 것으로 보고하였다.

3. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 연구에 사용한 표고버섯은 임협1호로 1998년 11월에 경기도 여주군 여주읍에 위치한 임협협동조합중앙회 임산미생물사업소에서 취득하였다. 임협1호는 가장 널리 보급되고 있는 표고버섯으로 함수율은 79%, 평균무게는 20g, 개화율은 60~70% 정도이며, 품질면에서 동고에 해당하였다. 갓의 직경을 기준으로 소편(3~4cm), 중편(5~6cm) 및 대편(7~8cm)으로 나누어 선별하였다. 정적인 방법으로 평형함수율을 측정하는데는 오랜 시간이 걸리므로 실험 중 부패를 막기 위해 함수율을 25%로 자연건조 시킨 다음 공시재료로 사용하였다.

건조실험에 사용한 표고버섯은 구입 후 함수율을 유지시키기 위해 밀봉하여 4℃의 저온저장고에 보관하였다. 실험 전 24시간 동안 실내에 방치해 두어 외기온도가 평형을 이루도록 하였으며, 갓을 기준으로 자루 3cm를 남기고 나머지 부분을 잘라낸 다음 공시재료로 사용하였다.

나. 실험 방법

(1) 평형함수율 측정

평형함수율은 포화 염용액을 이용하여 조성된

정온·정습의 공기 중에 시료를 노출시키는 정적 방법을 이용하여 측정하였다. 온도 4수준(35, 45, 55 및 65℃), 상대습도 5수준(11.0~90.8%범위)에서 평형함수율을 3반복 측정하였다. 표 1은 실험에 사용된 염용액의 종류와 포화염용액 주위의 온도별 상대습도를 나타낸 것이다(Greenspan, 1977).

증류수를 담은 유리병을 각각 35, 45, 55 및 65℃의 온도를 유지하는 항온기에 넣고 일정한 온도에 이르게 한 후 염류를 넣어 혼합하면서 완전히 포화시켰다. 유리병내에 설치한 시료 받침대 위에 소편, 중편 및 대편의 크기별로 표고버섯을 각각 3개씩 놓고 뚜껑을 실리콘으로 밀봉하였다. 표고버섯의 무게 측정은 전자저울($\pm 0.001g$)을 이용하여 1주일 간격으로 측정하였다. 무게 변화가 3주간 연속으로 0.002g 이하의 변화를 보일 때 평형함수율에 도달한 것으로 간주하였다. 표고버섯의 함수율은 105℃-24시간 공기오븐법을 이용하여 측정하였다.

(2) 건조 실험

그림 1은 건조실험에 사용된 장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 공기조화장치, 송풍장치, 건조실, 송풍관, 배기관, 무게측정장치 및 데이터 저장장치 등으로 구성되었다. 공기조화장치는 건구온도 -45~105℃, 상대습도 0~99% 범위의 공기를 발생시킬 수 있으며, 오차는 온도 $\pm 0.3^\circ C$, 상대습도 $\pm 2.5\%$ 이다. 건조실 내의 풍속은 시료상자 밑에서 풍속계를 이용하여 측정하였으며, 1.5 m/s로 나타났다. 시료의 무게 변화는 시료상자와 연결된 전자저울과 자료수집장치에 의하여 연속적으로 측정하였다. 시료상자는 원통형(직경 : 28.5 cm)으로 제작하였으며, 시료층을 통과하는 공기가

Table 1 Relative humidity at different temperature above the saturated salt solutions used in the test

Temperature (°C)	Relative humidity (%)						
	<i>LiCl</i>	<i>MgCl₂</i>	<i>Mg(NO₃)₂</i>	<i>NaBr</i>	<i>NaNO₃</i>	<i>KCl</i>	<i>KNO₃</i>
35	11.25	32.05	49.91	-	72.06	-	90.79
45	11.16	31.10	-	51.95	69.99	-	87.03
55	11.03	29.93	-	50.15	68.15	80.70	-
65	10.86	28.54	-	49.49	66.64	79.85	-

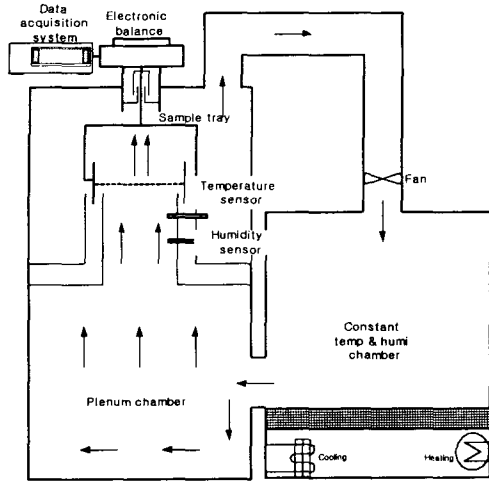


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for the drying test.

시료층 이외의 다른 통로로 유출되는 것을 방지하기 위하여 시료상자를 2중 원통 사이에 놓이게 하였다.

건조온도는 35, 45, 55 및 65℃의 4수준으로 하고, 상대습도는 30, 50 및 70%의 3수준으로 하였다.

시료의 무게변화는 자료수집장치를 통하여 컴퓨터에 연속적으로 기록하고, 풍속으로 인한 오차를 줄이기 위하여 측정값을 1초 간격으로 1분 동안 수집된 자료의 평균을 기록하였다. 건조실험은 24시간 동안 무게의 변화를 측정하였으며, 3반복 수행하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 평형함수율

온도 4수준, 상대습도 5수준의 공기에 대한 표고버섯의 방습평형함수율은 표 2와 같다. 온도 35℃, 상대습도 90%의 조건에서 9개의 표고버섯 중 1개만이 곰팡이가 발생하였으나, 무게변화에는 영향을 미치지 못하였으며 다른 온도에서는 곰팡이의 발생이 없었다. 평형함수율에 도달하는 시간은 약 12주정도 소요되었다.

표 2의 결과를 수정 Henderson, Chung-Pfost, 수정 Halsey 및 수정 Oswin모델에 적합시켰으며,

Table 2 Measured desorption equilibrium moisture contents of oak mushroom

Temperature (°C)	Relative humidity (%)	EMC (% d.b.)
35	11.25	4.39
	32.05	7.12
	49.91	10.85
	72.06	22.98
	90.79	79.56
45	11.16	3.71
	31.10	6.39
	51.95	9.86
	69.99	20.72
	87.03	72.62
55	11.03	3.05
	29.93	5.61
	50.15	8.73
65	68.15	19.01
	80.70	33.65
	10.86	2.51
	28.54	5.00
65	49.49	7.52
	66.64	17.89
	79.85	31.47

SAS(Ver. 6.12)의 비선형회귀분석 프로그램을 이용하여 결정한 각 모델의 실험상수와 RMSE 및 결정계수는 표 3과 같다.

표 3에서의 같이 평형함수율의 실측치와 예측치 간의 RMSE는 수정 Halsey모델과 수정 Oswin모델에서 가장 낮은 값을 나타내었으며, Chung-Pfost모델과 수정 Henderson모델에서 높은 값을 나타내었다. 또한 결정계수는 수정 Halsey모델과 수정 Oswin모델에서 높은 값을 나타내었다.

이상의 결과를 종합하면 표고버섯의 평형함수율 모델은 수정 Halsey 모델이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 수정 Oswin모델도 사용 가능한 모델로 판단되었다.

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

Models	Regression Coefficients			R ²	RMSE
	A	B	C		
Modified-Henderson	0.0330	0.9331	106.0312	0.9005	0.0235
Chung-Pfost	391.8132	9.1615	133.7697	0.7700	0.0318
Modified-Halsey	-2.1567	-0.0096	0.9915	0.9554	0.0103
Modified-Oswin	0.1537	-0.0009	1.3852	0.9559	0.0166

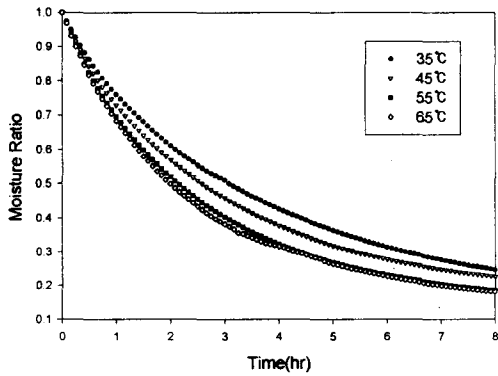


Fig. 2 Drying curves of oak mushroom for drying air temperatures of 35 °C, 45 °C, 55 °C and 65 °C respectively at relative humidity of 30%.

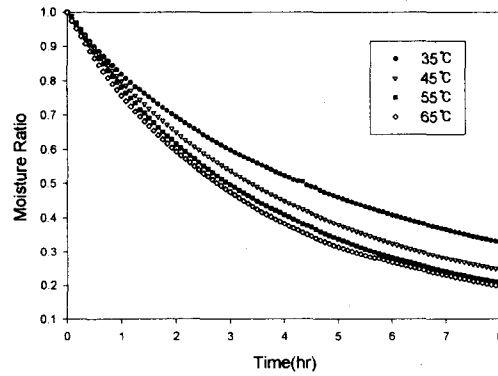


Fig. 3 Drying curves of oak mushroom for drying air temperatures of 35 °C, 45 °C, 55 °C and 65 °C respectively at relative humidity of 50%.

나. 건조 특성

(1) 건조곡선

표고버섯은 초기 함수율이 70 ~ 90%의 고탍수율을 가진 농산물이다. 관행적으로 건조를 수행할 경우는 40~60°C의 건조온도에서 함수율이 약 13% 정도가 될 때까지 15~21시간이 소요된다. 본 실험의 건조시간은 24시간까지로 하였으며, 3 반복 실험한 평균값을 분석자료로 사용하였다. 그림 2~4는 각각 상대습도 30, 50 및 70%일 때 건조온도별 함수율비 변화를 나타낸 건조곡선이다.

표 4는 건조조건별로 반감시간(함수율비가 0.5에 도달하는 시간)을 나타낸 것이다. 건조곡선과 표에서와 같이 건조속도의 지표가 되는 반감시간은 35, 45 및 55°C의 건조온도에서는 온도가 높을수록 반감시간이 크게 단축되지만, 55°C와 65°C에

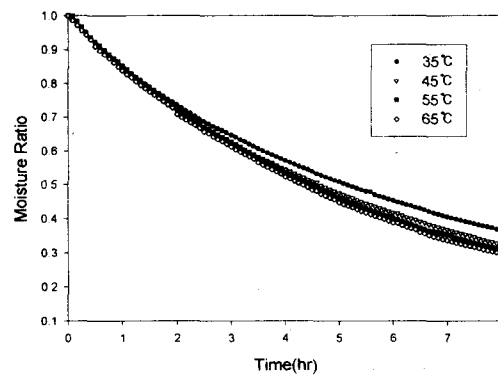


Fig. 4 Drying curves of oak mushroom for drying air temperatures of 35 °C, 45 °C, 55 °C and 65 °C respectively at relative humidity of 70%.

Table 4 Comparison of half response times by drying air conditions

Drying air temperature (°C)	Relative humidity(%)		
	30	50	70
35	3.1	4.5	5.3
45	2.7	3.4	4.6
55	2.1	3.0	4.5
65	2.0	2.8	4.4

서는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 건조온도가 건조속도에 미치는 영향은 상대습도가 높을수록 줄어들었다. 상대습도 70%인 경우는 45, 55 및 65°C의 건조온도에서 반감시간의 차이가 거의 나타나지 않았다.

건조온도가 일정한 경우 상대습도가 건조속도에 미치는 영향은 크게 나타났다. 건조온도가 35°C인 경우 상대습도가 30%에서 70%로 증가할 때 반감시간은 3.1시간에서 5.3시간으로 1.7배 증가하였으며, 건조온도가 65°C인 경우 2.0시간에서 4.4시간으로 2.2배 증가하였다. 건조온도가 높을수록 상대습도가 건조속도에 미치는 영향은 크게 나타났다.

이상의 결과를 종합하면, 풍속 1.5m/s에서 건조공기의 상대습도가 높을수록 건조온도가 건조속도에 미치는 영향은 적었으며, 건조온도에 관계없이 상대습도의 영향은 크게 나타났다.

(2) 박층건조모델

함수율비의 실험치를 모델에 적합시켜 실험상수를 결정하기 위하여 건조모델을 선형화하고 SAS의 회귀분석 프로그램을 이용하여 실험상수를 결정하였다. 건조 모델의 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 가정하고 다음 식(9)로 설정하였다.

$$\text{실험상수} = a_0 + a_1(RH) + a_2(T) + a_3(RH)^2 + a_4(T)^2 + a_5(RH \cdot T) \dots (9)$$

여기서, RH : 상대습도(dec)
T : 건조 온도 (°C)

식 (9)에서 변수들의 조합은 SAS의 PROC STEPWISE를 이용하여 선정하였다. 함수율비의 실험치와 Henderson, Lewis, Page 및 Thompson모델을

적합시켜 실험상수를 결정하였으며, 그 결과는 식 (10)~(13)과 같다.

Lewis모델

$$k_1 = 0.09725 + 0.00452(RH) - 0.00004969(RH \cdot T) \dots (10)$$

Page모델

$$P = 0.01326 - 0.0005515(RH) + 0.00051507(T) + 0.00000658(RH)^2 - 0.00000816(RH \cdot T)$$

$$Q = 0.73286 - 0.00003581(T)^2 + 0.00008071(RH \cdot T) \dots (11)$$

축소수분확산모델

$$A = 0.83388 + 0.00313(RH) - 0.00003506(RH)^2 - 0.00002414(T)^2 + 0.00004513(RH \cdot T)$$

$$k_2 = -0.03035 + 0.00873(T) - 0.00005042(T)^2 - 0.00003659(RH \cdot T) \dots (12)$$

Thompson모델

$$B = -4.95735 + 0.0997(T) - 0.00035418(RH)^2 - 0.00120(RH \cdot T)$$

$$C = 2.55486 - 0.00044673(RH \cdot T) \dots (13)$$

4가지 박층건조모델의 적합성을 검증하기 위하여 함수율비의 전체 실험치와 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 5에 나타내었다. 표에서와 같이 Page모델에서 결정계수는 0.9990로 가장 높게 나타났으며, RMSE는 0.00739로 가장 낮은 값을 나타내었다.

따라서 4개의 모델 중 Page모델이 표고버섯의 박층건조모델로 가장 적합한 것으로 판단되었다.

그림 5는 건조온도 35°C, 상대습도 30%일 때 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비

Table 5 Estimated coefficients of determination and root mean square error for 4 different drying models

Models	R ²	RMSE
Page	0.9990	0.00739
Thompson	0.9990	0.00980
Henderson	0.9846	0.02628
Lewis	0.9907	0.03755

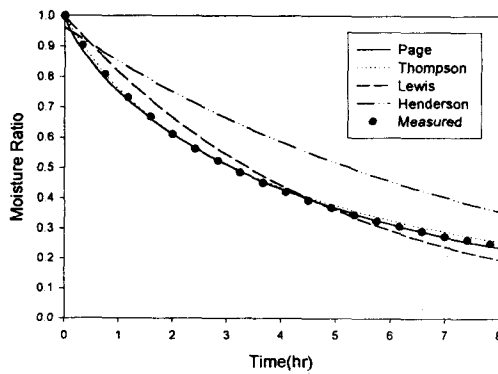


Fig. 5 Comparison of measured and predicted moisture ratios by 4 different drying models at 35°C and 30% rh.

교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델은 전체 건조시간에 걸쳐서 함수율비의 실측치와 예측치가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결론 및 요약

본 연구는 표고버섯의 평형함수율과 건조모델을 개발하기 위하여 수행되었다. 평형함수율은 온도 4수준(35°C, 45°C, 55°C, 65°C), 상대습도 5수준(11.0~90.8%)에서 정적방법으로 측정하였으며, 건조실험은 온도 4수준(35°C, 45°C, 55°C, 65°C), 상대습도 3수준(30%, 50%, 70%)에서 경시적인 함수율비의 변화를 측정하였다. 평형함수율은 기존의 4개의 평형함수율모델, 건조속도는 기존의 4개의 박층건조모델에 적합시켜 실험상수를 결정하고 모델의 적합성을 검증하였다.

연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 표고버섯의 평형함수율은 곡류 등의 농산물과 같이 온도가 낮을수록 상대습도가 높을수록 높게 나타났으며, 온도보다는 상대습도의 영향이 더 크게 나타났다.
- 2) 평형함수율 모델로는 수정 Halsey모델이 가장 적합하였으며, 수정 Oswin모델도 오차의 수준이 허용 가능한 범위이었다.
- 3) 표고버섯의 건조모델로는 Henderson, Lewis, Page 및 Thompson모델 중 Page모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.
- 4) 건조공기의 상대습도가 높을수록 건조온도가 표고버섯의 건조속도에 미치는 영향은 감소하였으며, 건조온도에 관계없이 건조속도에 대한 상대습도의 영향은 크게 나타났다.

참고 문헌

1. Choi, B. M. 1992. Equilibrium moisture content and drying model of Korea Ginseng. Ph.D. thesis. Chonbuk National University.
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. Flood, C. A., Jr. and G. M. White. 1984. Desorption equilibrium moisture relationships for popcorn. Transactions of the ASAE. 27(2):561-565, 571.
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. 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).
7. Keum, D. H and C. W. Park. 1997. Equilibrium moisture contents and thin layer drying equations of cereal grains and mushrooms(I). J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 22

- (1):11-20(In Korea).
8. Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of solid materials. *Int. Eng. Chem.* 13(5):427-32.
 9. Oswin, C. R. 1946. The Kinetics of Package Life.Ⅲ. Isotherm. *J. Chem. Industry.* 65:410-421.
 10. Page, C. 1949. Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers. M. S. Thesis, Purdue University.
 11. Pappas, G. and V. N. M. Rao. 1987. Sorption isotherms of cowpeas from 25°C to 70°C. *Transactions of the ASAE.* 30(5):1478-1483.
 12. Syarief, A. M., R. V. Morey and R. J. Gustafson. 1984. Thin-layer drying rates of sunflower Seed. *Trans. of the ASAE* 27(1):195-200.
 13. Thompson, T. L., R. M. Peart and G. H. Foster. 1968. Mathematical Simulation of Corn drying-A New Model. *Transactions of the ASAE.* 11(4): 582-586.