

벼의 저온 박층건조모델

김 훈 금동혁 김의웅

Low Temperature Thin Layer Drying Model of Rough Rice

H. Kim D. H. Keum O. W. Kim

This study was performed to develop thin layer drying equations for low temperature. Thin layer drying tests of short grain rough rice were conducted at three low temperature levels of 15, 25, 35°C and two relative humidity levels of 30, 50%, respectively. The measured moisture ratios were fitted to the selected four drying models (Page, Thompson, Simplified diffusion and Lewis model) using stepwise multiple regression analysis.

The overall drying rate increased as the drying air temperature was increased and as relative humidity was decreased, but the effect of temperature increase was dominant. Half response time (Moisture ratio=0.5) of drying was affected by both drying temperature and relative humidity at drying temperature of below 25°C, but at 35°C was mainly affected by drying temperature.

The results of comparing coefficients of determination and root mean square error of moisture ratio for four drying models showed that Page model was found to fit adequately to all drying test data.

Keywords : Low temperature, Thin layer drying, Moisture ratio, Rough rice

1. 서론

건조는 수분을 함유하고 있는 물질과 그를 둘러싸고 있는 환경사이에서 수분과 열의 이동이 동시에 진행되는 현상으로 곡물은 건조방법에 따라서 품질이 크게 좌우되므로 건조과정을 해석하고 적정 건조조건을 구명하는 것이 무엇보다도 중요하다.

건조모델은 박층건조(Thin layer drying)모델과 후층건조(Deep layer drying)모델로 구분할 수 있다. 얇은 두께의 곡물층의 건조속도를 나타내는 방정식을 박층건조모델이라 하고, 많은 박층으로 이루어진 후층에서의 건조과정을 해석할 수 있는 방정식을 후층건조모델이라고 한다.

곡물의 건조과정을 해석하고 건조조건을 구명하는데 있어

서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다(Keum and Park, 1997). 또한, 박층건조모델은 곡물의 후층건조를 예측하는 후층건조시뮬레이션 모델 개발에 가장 기본이 되는 요소이다(Basunia and Abe, 1998).

저온건조는 10~30°C 범위의 저온의 공기를 이용하여 곡물을 건조하는 방법으로 저온에서 건조가 이루어짐으로 건조 중의 열손상을 최소화하여 동할의 억제와 식미 향상 등 고품질의 쌀 생산에 가장 적합한 건조방법으로 보고되고 있다(Ishibashi 등, 1971). Tanaka 등(2000)은 온도 5~20°C 범위, 상대습도 6.3~87.1%범위에서 벼의 저온건조실험을 수행하여 건조속도는 구(球)모델이 평형함수율은 Chen-Clayton 모델이 가장 적합하다고 보고하였다.

국내에서는 벼의 박층건조모델에 관한 연구가 수행되었는

This study was supported by the Agricultural R&D Promotion Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication in September 2004, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2004.

The authors are Hoon Kim, KSAM member, Researcher, Oui Woung Kim, KSAM member, Senior Researcher, Korea Food Research Institute, Korea, Dong Hyuk Keum, KSAM member, Professor, 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@skku.ac.kr>

데, Keum 등(1997)은 건조온도 35~55℃, 상대습도 30~60%범위에서 단립중 벼의 박층건조실험을 수행하여 Page 모델과 Thompson 모델이 가장 적절한 모델이라고 보고하였다. Keum 등(2002)은 원적외선 건조온도 30~60℃, 초기함수율 20.7, 26.2%(w.b.)에 대하여 벼의 박층건조실험을 수행하여 Lewis 및 Page 모델로 나타내었다. 그러나, 벼의 박층건조모델은 대부분 고온의 온도영역으로 35℃이하의 저온 영역에서의 건조에 대한 적용여부는 검토가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 저온 건조온도 3수준, 상대습도 2수준에 대하여 건조속도를 측정하고, 곡물 건조방정식으로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검증하여 벼의 저온 박층건조모델을 개발하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

실험에 사용한 벼는 2002년 10월에 충북 음성지역에서 수확한 추정벼이며, 초기함수율은 26.8%(d.b.)였다. 수확한 벼를 산물상태로 구입하여 이물 등을 정선한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 밀폐하여 2℃의 저온저장고에 보관하였다.

실험시작 12시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 밀폐상태로 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다. 함수율은 10g-135℃-24시간 상압정온건조법으로 측정된 후 105℃법으로 환산하였다.

나. 실험방법

실험장치는 Keum 등(2002)이 이용한 건조실험장치를 사용하였다. 건조실험장치는 공기조화장치, 공기충만실, 건조실, 송풍기, 온·습도측정장치, 중량측정장치 및 시료대 등으로 구성하였다. 공기조화장치(MTH4100, SANYO, UK)는 온도 -45~105℃(±0.3℃), 상대습도 0~99%(±2.5%) 범위의 공기를 발생시킬 수 있으며, 조성된 공기는 송풍기에 의해 공기충만실과 건조실로 이송되며, 건조실을 통과한 공기는 다시 공기조화장치로 되돌아가도록 구성하였다. 건조실은 직경 28cm, 높이 40cm의 원통형으로 하부에 정류격자를 설치하여 공기분포가 일정하도록 하였다. 건조실내에 온도(Thermocouple, T type, OMEGA, USA) 및 상대습도(HMP45D, VAISALA, Finland)센서를 설치하였으며, 측정된 온·습도를 이용하여 공기조화장치를 제어하도록 하였다. 건조실 내의 풍속은 하부 10지점에 대하여 풍속계(ANO6141, KANOMAX, JAP)를 이용하여 측정하였으며, 0.54m/s(표준편차 0.04)로 나타났다. 다공판으로 구성된 직경 30cm의 원통형 시료대에 약

100g의 벼를 박층으로 퇴적하고, 시료대 상부에 설치된 전자저울(LC4200, SARTORIUS, GER)과 자료수집장치(7327, DataScan, UK)를 이용하여 시료의 무게 변화를 측정하여 PC에 기록하였다. 실험 시작 후 20분 간격으로 1분간 무게를 측정하여 평균값을 기록하였으며, 함수율비가 0.2에 도달할 때까지 건조를 수행하였다. 건조온도는 15, 25 및 35℃의 3수준, 상대습도는 30 및 50%의 2수준에 대하여 3회 반복 실험을 하였다.

다. 분석방법

벼의 저온 박층건조모델을 결정하기 위하여 기존의 곡물 건조방정식 중에서 정확도와 이용 편의성이 우수한 4개의 건조모델을 선정하였다(Keum 등, 1997). Page의 옥수수 박층건조실험에 적용한 모델, Thompson의 건조모델, Henderson의 수분확산법칙 해에 기초한 건조 모델, Lewis의 Newton 냉각법칙을 이용한 건조모델을 선정하였으며, 이들 모델들은 다음의 식 (1)~(4)와 같다. 벼의 평형함수율모델은 Keum 등(2000)이 개발한 식을 이용하였다.

$$\text{Page 모델 : } MR = \exp(-P \cdot t_0^Q) \quad (1)$$

$$\text{Thompson 모델 : } t = A \cdot \ln(MR) + B \cdot (\ln MR)^2 \quad (2)$$

$$\text{축소수분확산모델 : } MR = A \exp(-k_2 \cdot t) \quad (3)$$

$$\text{Lewis 모델 : } MR = \exp(-k_1 \cdot t) \quad (4)$$

여기서, $MR(t) = \frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e}$: 함수율비(무차원)

$MR(t)$: 함수율(dec,d.b.)

M_e : 평형함수율(dec,d.b.)

$$= 0.01 \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-0.00007836(T + 13.058)} \right]^{\frac{1}{2.1581}}$$

RH : 상대습도(dec) T : 온도(℃)

M_0 : 초기함수율(dec,d.b.) t : 건조시간(hr)

t_0 : 건조시간(min)

A, B, k_1, k_2, P, Q = 매개변수

함수율비의 실험치를 모델에 적합시켜 SAS의 비선형 회귀 분석 프로그램을 이용하여 매개변수를 결정하였다. 건조모델의 매개변수 A, B, k_1, k_2, P 및 Q 는 건조온도와 상대습도의 함수로 가정하고 다음의 식으로 설정하였다.

$$\begin{aligned} \text{매개변수} = & a_0 + a_1(T_0) + a_2(RH_0) + a_3(T_0)^2 \\ & + a_4(T_0 \cdot RH_0) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : 실험상수
 T_0 : 건조온도(°C) RH_0 : 상대습도(dec)

식 (5)에서 실험상수들의 조합은 SAS의 PROC STEPWISE를 이용하여 선정하였다. 함수율비 실험치와 모델에 의한 예측치 사이의 결정계수와 RMSE(Root Mean Square Error)를 모델의 검정에 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 건조속도

그림 1은 상대습도 및 건조온도 별 함수율비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 건조속도는 지수함수의 경향으로 감소하는 것으로 나타났다. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 상대습도가 30%일 때 건조온도 15°C에서 13.3시간, 건조온도가 25°C일 때는 6.7시

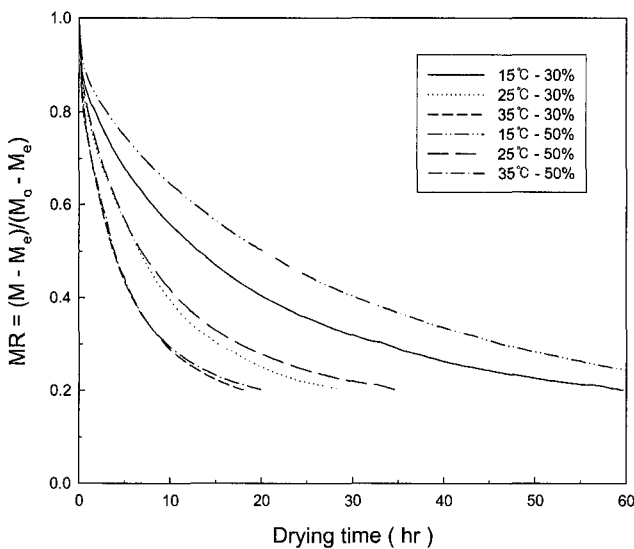


Fig. 1 Drying curves of rough rice at various drying air temperatures and relative humidities.

간으로 나타났으며, 건조온도 35°C에서는 3.7시간으로 나타났다. 따라서, 건조온도가 15°C에서 25°C로 10°C 증가할 때 반건조시간은 급격히 감소되었으며, 35°C에서는 온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 다소 줄어들었다. 상대습도 50%의 경우, 건조온도 15°C에서는 20.3시간, 건조온도 25°C에서는 7.0시간으로 급격히 감소하였으며, 건조온도 35°C에서는 4.0시간으로 나타났다. 건조온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 상대습도 30%에서와 유사한 경향으로 나타났다.

또한, 건조온도 15°C에서는 상대습도 30%일 때 반건조시간은 13.3시간으로 나타났고, 상대습도가 50%일 때는 20.3시간으로 상대습도가 낮을수록 반건조시간도 크게 감소하였다. 그러나, 건조온도 25°C에서는 반건조시간에 도달할 때까지 상대습도에 따른 건조속도의 차이는 크지 않았고, 반건조시간 이후는 다소 차이가 나타났다. 건조온도 35°C에서는 상대습도에 따른 반건조시간은 크게 영향을 미치지 않았다. 이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도의 영향을 받는 것으로 나타났으며 특히, 온도의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 상대습도에 따른 반건조시간은 건조온도가 높을수록 차이가 적게 나타났다.

나. 박층건조모델

건조실험 3회 중에서 2회의 결과치를 평균치로 구하여 모델의 실험상수를 결정하는데 이용하였으며, 1회의 건조실험 결과치를 모델의 검증에 이용하였다. 4개의 건조방정식 즉, Page, Thompson, 축소수분확산 및 Lewis 모델의 실험상수와 결정계수는 다음의 표 1과 같이 나타났다. 표에서와 같이 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 나타났다. 실험상수의 결정계수는 Thompson 모델과 수분확산모델의 상수 A의 경우 다소 낮게 나타났지만, 다른 실험상수는 0.96이상으로 나타났다.

4개 건조방정식의 적합성을 검정하기 위하여 온도별 함수

Table 1 Estimated values of experimental coefficients for selected drying models.

Models	Experiment coefficients	R ²
Page	$P = 0.01932 - 0.0002115(T_0) - 0.0692(RH_0) - 0.00000882(T_0)^2 + 0.00283(T_0 \cdot RH_0)$	0.9616
	$Q = 0.47652 + 0.0218(T_0) + 0.54742(RH_0) + 0.0001065(T_0)^2 - 0.02225(T_0 \cdot RH_0)$	0.9998
Thompson	$A = -1.56637 + 1.11379(T_0) - 91.10758(RH_0) - 0.03812(T_0)^2 + 3.15455(T_0 \cdot RH_0)$	0.8921
	$B = 43.18647 - 1.98255(T_0) - 5.03908(RH_0) + 0.02255(T_0)^2 + 0.52125(T_0 \cdot RH_0)$	0.9777
Simplified diffusion	$A = 0.70516 + 0.00166(T_0) + 0.35596(RH_0) + 0.00007175(T_0)^2 - 0.01432(T_0 \cdot RH_0)$	0.5583
	$k_2 = 0.01043 + 0.00148(T_0) - 0.04217(RH_0) + 0.0000395(T_0)^2$	0.9987
Lewis	$k_1 = 0.00883 + 0.00221(T_0) - 0.04967(RH_0) + 0.0000505(T_0)^2$	0.9989

율비의 실험치와 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 Page 모델의 경우 결정계수는 0.995 이상, RMSE는 0.018이하로 나타났다. Thompson 모델은 결정계수가 0.992이상, RMSE는 0.038이하로 나타났으며, Lewis 모델과 축소수분확산모델의 결정계수는 0.932이상, RMSE는 0.084이하로 나타나 Page 모델과 Thompson 모델에 비해 다소 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서, 함수율비(MR)의 값이 0~1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page 모델이 다른 3개 건조방정식에 비해 적합성이 인정되었다.

그림 2와 그림 3은 건조온도 15℃, 상대습도 30 및 50%에서의 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델과 Thompson 모델에 의한 예측치는 전체 건조시간에 걸쳐서 함수율비의 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났지만 수분확산모델과 Lewis 모델은 상당한 오차를 나타내었다. 그림 4와 그림 5는 건조온도 25℃, 상대습도 30 및 50%에서의 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델에 의한 예측치는 함수율비의 실험치와 전체 건조온도에서 잘 일치하는 것으로 나타났으나 Thompson 모델의 예측치

는 건조온도 15℃에서와는 달리 다소 오차를 나타내었다. 그림 6과 그림 7은 건조온도 35℃, 상대습도 30 및 50%에서의 함수율비의 실험치와 각 모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Page 모델에 비해 Thompson, 수분확산 및 Lewis 모델은 다소 오차를 나타내었다. 따라서, 건조온도와 상대습도에 따른 함수율비의 실험치와 모델에 의한 예측치를 비교해본 결과 Page 모델이 전 영역에서 잘 일치하였다.

그림 8은 본 연구에서 개발한 저온건조모델과 건조온도 35~55℃범위의 고온 영역에서 건조실험을 통하여 Page모델로 표현한 Keum 등(1997)의 고온건조모델을 상대습도 50%에서 건조온도별로 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조온도 15℃ 및 25℃에서는 저온건조모델과 Keum 등의 고온건조모델간에는 큰 차이가 나타났으며, 건조온도 35℃에서는 건조 초기에 비슷한 경향을 보였으나 이후 크게 차이가 나타났다. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 건조온도 15, 25 및 35℃에서 저온건조모델은 20.2, 6.6 및 4.1시간으로 고온건조모델의 4.1, 3.2 및 2.2시간과 큰 차이가 나타났다. 따라서, Keum 등(1997)의 고온건조모델은 저온건조온도 영역에서는 적용할 수 없는 것으로 판단된다.

Table 2 Estimated coefficients of determination and root mean square error of moisture ratio for selected drying models.

Models	R ²			RMSE		
	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃
Page	0.9986	0.9962	0.9950	0.01203	0.01845	0.01607
Thompson	0.9978	0.9946	0.9929	0.01588	0.02246	0.03872
Simplified diffusion	0.9581	0.9451	0.9326	0.03472	0.04365	0.04941
Lewis	0.9788	0.9721	0.9628	0.07531	0.08216	0.08470

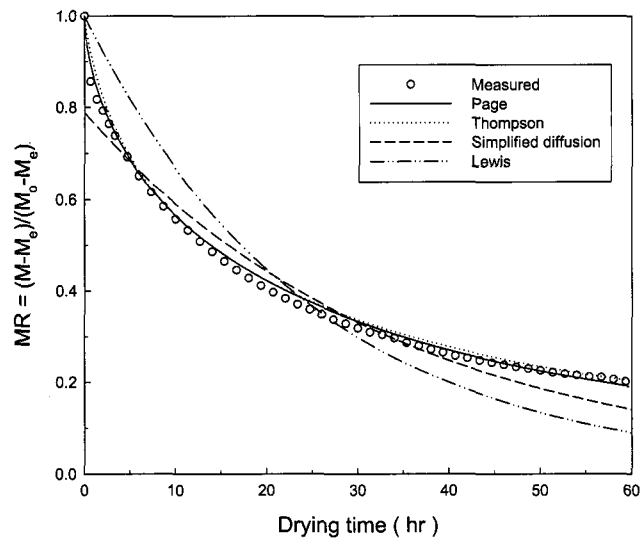


Fig. 2 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 15℃ and 30% rh.

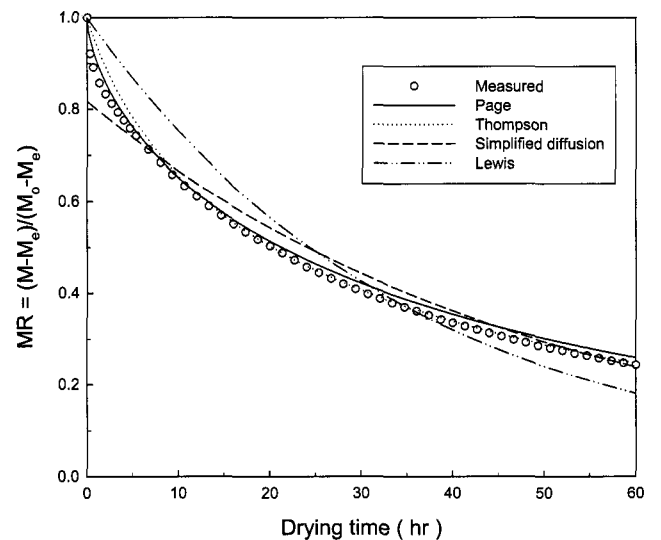


Fig. 3 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 15℃ and 50% rh.

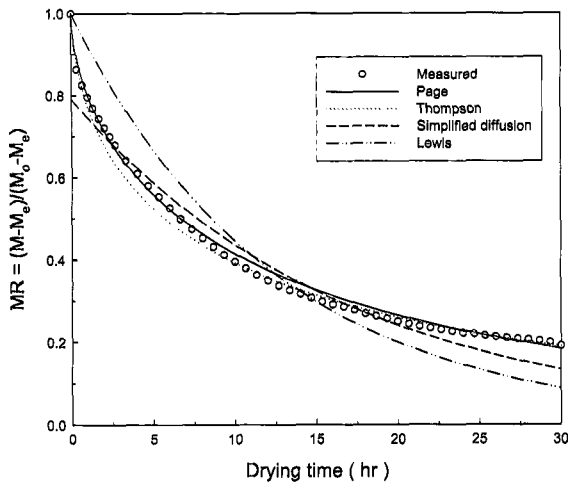


Fig. 4 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 25°C and 30% rh.

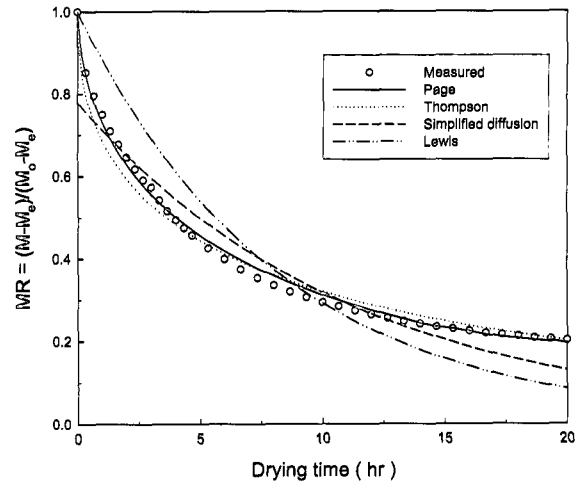


Fig. 7 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 35°C and 50% rh.

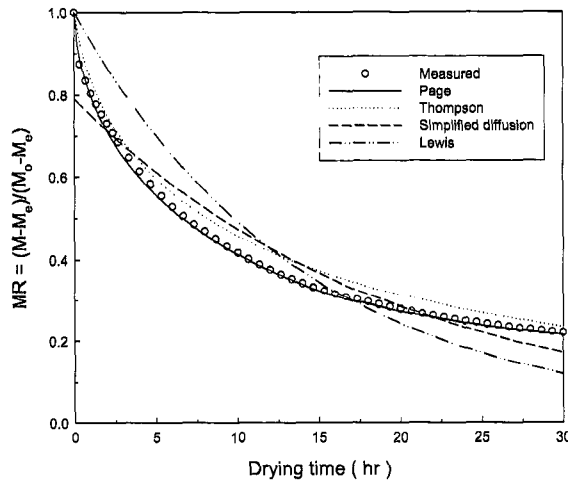


Fig. 5 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 25°C and 50% rh.

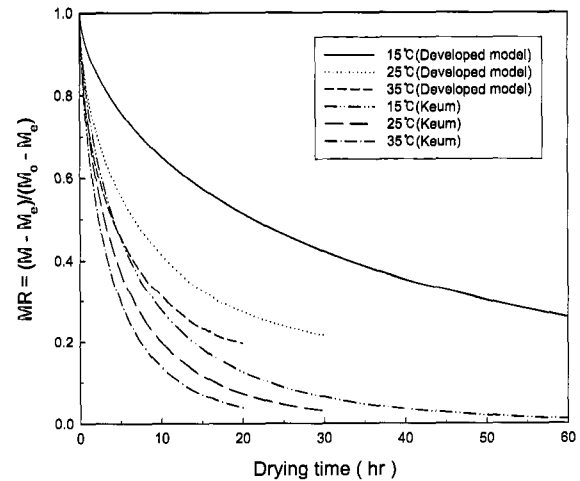


Fig. 8 Comparison of the low temperature drying model developed in this study and the high temperature drying model (Keum et al. (1997)) by drying air temperatures at the relative humidity of 50%.

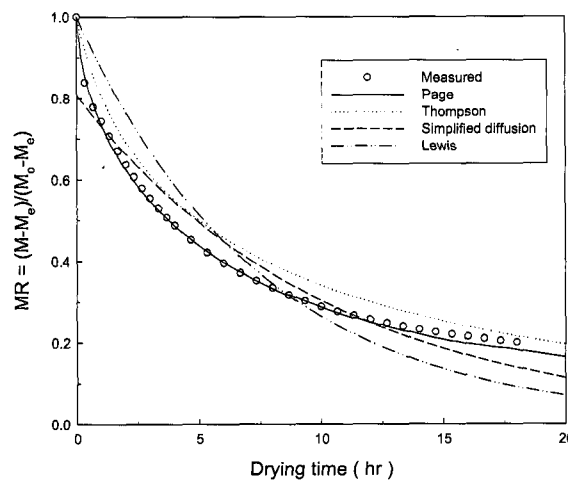


Fig. 6 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at 35°C and 30% rh.

4. 요약 및 결론

본 연구는 저온 건조온도 15, 25 및 35°C 3수준, 상대습도 30% 및 50% 2수준에 대하여 벼의 건조속도를 측정하고, 곡물 건조모델로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검증하여 저온 박층건조모델을 개발하기 위하여 수행되었다.

건조속도는 모든 온도 및 상대습도 영역에서 지수함수로 감소하는 것으로 나타났다. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도의 영향을 받는 것으로 나타났으며, 상대습도의 영향보다는 건조온도의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. 상대습도에 따른 반건조시간은 건조온도가 높을수

록 차이가 적게 나타났으며 특히, 건조온도가 낮은 15℃에서는 상대습도가 건조속도에 미치는 영향이 크게 나타났다.

건조실험 3회 중에서 2회의 결과치를 평균치로 구하여 모델의 실험상수를 결정하는데 이용하였으며, 1회의 건조실험 결과치를 모델의 검증에 이용하였다. 4개의 건조방정식의 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 나타났다. 4개의 건조방정식의 함수율비 예측치와 함수율비의 실험치 간의 RMSE와 결정계수로 건조방정식의 적합성을 검정하였다. Page 모델의 경우 결정계수는 0.995이상, RMSE는 0.018이하로 나타났다. Thompson 모델은 결정계수가 0.992이상, RMSE는 0.038이하로 나타났으며, Lewis 모델과 축소수분확산모델의 결정계수는 0.932이상, RMSE는 0.084이하로 나타나 Page 모델과 Thompson 모델에 비해 다소 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서, 함수율비(MR)의 값이 0~1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page 모델의 적합성이 인정되었다.

참고문헌

1. Basunia, M. A and T. Abe. 1998. Thin-layer drying characteristics of rough rice at low and high temperature. *Drying Technology* 16(3-5):579-595.
2. Ishibashi, S., S. Tanaka and Y. Fukumoto. 1971. Studies on cooling and cold air drying for grain storage(III). *J. of the JSAM* 34(3):242-251. (In Japanese)
3. 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 KSAM* 22(1):11-20. (In Korean)
4. Keum, D. H., H. Kim and N. U. Hong. 2002a. Equilibrium moisture contents and thin layer drying equations of cereal grains and mushrooms(II). *J. of the KSAM* 27(3):219-226. (In Korean)
5. Keum, D. H., H. Kim and S. J. Hong. 2002b. Far-infrared ray drying characteristics of rough rice(I). *J. of the KSAM* 27(1):45-50. (In Korean)
6. Keum, D. H., H. Kim and Y. G. Cho. 2000. Desorption equilibrium moisture content of rough rice, brown rice, white rice and rice hull. *J. of the KSAM* 25(1):47-54. (In Korean)
7. Tanaka, S., F. Tanaka., T. Okubo., Y. Maeda., K. Morita and L. R. Urasa. 2000. Low temperature drying characteristics of raw rough rice. *J. of the JSAM* 62(5):104-109. (In Japanese)