

## 청립의 박층건조모델

한재웅 금동혁 김 훈 이세은

### Thin Layer Drying Model of Green Rice

J. W. Han D. H. Keum H. Kim S. E. Lee

#### Abstract

This study was performed to develop thin layer drying equations for green rice. Thin layer drying tests of green rice were conducted at three temperature levels of 30, 40, 50°C and two relative humidity levels of 30, 50% respectively. The measured moisture ratio 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 and as relative humidity was increased, 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. Drying rate was mainly affected by relative humidity at drying temperature of 50°C. The results of comparing coefficients of determination and root mean square error of moisture ratio for four drying models showed the Page model was found to fit adequately to all drying test data.

**Keywords :** Green rice, Thin layer drying, Moisture ratio

#### 1. 서론

벼의 수확시기는 완전미 비율, 단백질 함량 및 함수율 등 수량과 품질 뿐만 아니라 도정 및 식미특성 등 여러 요인들을 고려하여 결정하게 된다. 벼의 품종이나 지역 등에 따라 수확 시기는 다소 차이가 있지만 식미를 고려할 경우 출수 후 40~50일로 보고되고 있다(Chae and Jun, 2002). 도정 및 이화학 특성을 고려할 경우 수확시기는 출수 후 45~55일이며, 조기 수확할 경우 수율이 저하되고 함수율, 단백질 및 아밀로스 함량은 높아지는 것으로 보고되고 있다(김기종 등, 2001). Champagne 등(2005)은 수확시기에 따라 아밀로스보다는 단백질 함량에서 차이( $P<0.05$ )가 발생하였고, 취반한 밥은 수확 시기가 빠를 경우 경도 및 응집성이 높아진다고 보고하였다.

청립(green rice)은 수확시기 즉, 황숙기에서 완숙기에 접어들기 전에 조기수확한 벼로서 함수율 및 단백질 함량이 높고, 생리활성 물질이 많이 함유되어 있다. 청립은 일반 벼에 비해 배유부가 많이 존재하여 수분흡수속도가 높고 호화개시온도, 호화엔탈피 및 전분의 붕괴정도가 낮아 가공성이 높을 뿐만 아니라 아미노산, GABA, 폴리페놀류의 함량도 높아(Lee 등, 2006; Champagne 등, 2005) 이를 이용한 가공제품 및 기능성제품으로의 활용이 가능하다. 베트남 등 일부 동남아시아에서 녹색계열의 유색미를 빵소재로 일부 이용하고 있고, 국내에서는 찹쌀을 조기수확하여 수세, 침지, 탈수, 건조 및 도정과정을 거쳐 제품(올벼쌀)으로 생산하고 있으나 품질수준이 매우 낮고 생산량도 매우 낮은 실정이다(Park 등, 2005). 청립은 수확량과 관능적 식미는 낮지만 가공성과 기능성이

This study was supported by the agricultural R&D Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication in September 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2006. The authors are Jea Woong Han, Researcher, KSAM member, Dong Hyuk Keum, Professor, KSAM member, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Korea, Hoon Kim, Researcher, KSAM member, Se Eun Lee, Principal researcher, KSAM member, Korea Food Research Institute, Korea. The Corresponding author is H. Kim, Researcher, Korea Food Research Institute, Sungnam, 463-746, Korea; Fax: +82-31-780-9210; E-mail: <hkim@kfri.re.kr>.

우수하여 쌀 가공제품으로의 소재로 활용할 가능성이 높다.

벼 수확 후 첫 번째 공정인 건조는 저장성과 가공성을 향상시키기 위한 중요한 공정이다. 건조는 일반적으로 여러개의 박층으로 이루어진 후층에서 진행되는데, 이 후층건조를 해석하기 위해서는 우선적으로 박층건조의 해석이 가능하여야 한다. 또한, 박층건조는 적정 건조조건을 구명하기 위한 중요한 요소로서 국내외적으로 많은 연구가 진행되었다(Basunia and Abe, 1998; Kameoka, 1988; Keum and Park, 1997; Keum 등, 2002; Kim 등, 2004; Wang and Singh, 1978). 그러나, 청립 벼는 일반 벼에 비해 성분함량이 다르고, 함수율이 매우 높아(Kwon and Shin, 1980) 건조과정이 다소 상이할 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구의 목적은 건조온도 3수준, 상대습도 2수준에 대하여 청립 벼의 건조속도를 측정하고, 곡물의 건조방정식으로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검정하여 박층건조모형을 개발하는데 목적이 있다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

공시재료는 2004년 경기도 화성지역에서 재배하는 추청벼로서 출수 후 27일이 되는 시기에 수작업으로 수확하였다. 수확한 청립 벼를 밀봉하여 -10℃를 유지하는 냉동고에 보관하였으며, 실험시작 24시간 전에 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 하였고, 수작업으로 녹색계열의 정립만을 선별하여 실험에 사용하였다. 청립 벼의 초기함수율은 31.9%(w.b.)이었으며, 현미의 b값은 29로서 일반 현미 19~21에 비해 높은 수준이었다.

### 나. 실험방법

박층건조실험은 Keum 등(2002)이 이용한 공기조화장치(MTH4100, SANYO, UK)를 사용하였다. 공기조화장치는 온도 20~70℃(±0.3℃), 상대습도 30~98%(±2.5%)범위의 건조공기를 발생시킬 수 있으며, 조성된 공기는 송풍기에 의해 공기층만실과 건조실로 이송되며, 건조실을 통과한 공기는 다시 공기조화장치로 되돌아가도록 구성하였다. 건조실은 직경 280mm, 높이 400mm의 원통형으로 하부에 정류격자를 설치하여 공기분포가 일정하도록 하였다. 건조실 내의 풍속은 5개 지점에 대하여 풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)로 측정하였으며, 0.56m/s(표준편차 0.06)로 나타났다.

건조실 내부에 설치된 직경 300mm의 다공판으로 제작된

시료대에 초기중량 160 g의 청립 벼를 박층으로 퇴적하였다. 시료대의 중량은 전자저울(LC4200, SARTORIUS, Germany)을 이용하여 10분 간격으로 중량을 측정하여 PC에 기록하였으며, 평형함수율에 도달할 때까지 건조를 수행하였다. 건조온도는 30, 40 및 50℃의 3수준, 상대습도 30 및 50% 2수준에 대하여 3회 반복 실험 하였다.

박층건조모형을 결정하기 위하여 기존의 곡물건조방정식 중에서 널리 사용되고 있는 Page(1949)의 옥수수 박층 건조실험에 적용한 모델, Thompson(1967)의 건조모델, Henderson(1952)의 수분확산법칙 해에 기초한 건조 모델 및 Lewis(1921)의 Newton 냉각법칙을 이용한 건조모델 등 4개의 건조모델을 선정하였다(식 (1)~(4)). 평형함수율은 실험 중 측정된 최종 함수율을 이용하였다.

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

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

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

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

여기서,  $MR = \frac{M(t) - M_e}{M(t_0) - M_e}$  : 함수율비(무차원)

$MR(t)$  : 함수율(dec,d.b.)

$M_e$  : 평형함수율(dec,d.b.)

$RH$  : 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 실험값을 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 식 (5)로 설정하였다.

매개변수 =

$$a_0 + a_1(T_0) + a_2(RH_0) + a_3(T_0)^2 + a_4(T_0 \cdot RH_0) \quad (5)$$

여기서,  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  : 실험상수

$T_0$  : 건조온도(℃)  $RH_0$  : 상대습도(dec)

실험상수들의 조합은 SAS의 PROC STEPWISE를 이용하여 선정하였다. 함수율비 실험값과 모델에 의한 예측값 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 청립은 함수율이 매우 높아 건조시작 후 30분까지 함수율비가 0.8 수준까지 급격히 감소하였다. 건조 초기 30분을 제외한 건조속도는 지수함수의 경향으로 감소하는 것으로 나타났다. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 상대습도가 30%일 때

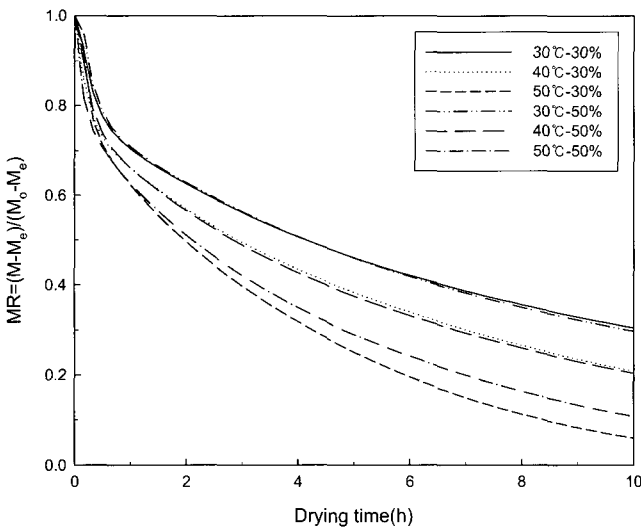


Fig. 1 Drying curves of green rice at various drying air temperatures and relative humidities.

건조온도 30, 40 및 50°C에서 4.2, 2.8 및 1.8시간으로 건조온도의 증가에 따라 건조시간은 크게 단축되었다. 상대습도 50%에서 건조온도 30, 40 및 50°C는 4.1, 2.8 및 2.1시간으로 나타났으며, 건조온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 상대습도 30%에서와 유사한 경향으로 나타났다.

건조온도 30 및 40°C에서 상대습도의 조건은 반건조시간에 크게 영향을 미치지 않았다. 건조온도 50°C에서 상대습도의 조건은 반건조시간에 도달할 때까지는 크게 영향을 미치지 않았지만 반건조시간 이후로는 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도의 영향을 받는 것으로 나타났으며 특히, 온도의 영향이 지배적인 것으로 나타났다.

#### 나. 박층건조모델

건조실험 3회 중에서 2회의 결과값을 평균값으로 구하여 모델의 실험상수를 결정하는데 이용하였으며, 1회의 건조실험 결과값을 모델의 검증에 이용하였다. 4개의 건조방정식 즉 Page, Thompson, 축소수분확산 및 Lewis모델의 실험상수와 결정계수는 다음의 표 1과 같다. 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 표현되었으며, 결정계수는 Thompson모델 및 수분확산모델의 상수 A는 각각 0.96 및 0.95이었으며, 다른 모델의 실험상수는 0.98이상으로 나타났다.

4개 건조방정식의 적합성을 검증하기 위하여 온도별 함수율비의 실험값과 예측값 간의 RMSE와 결정계수를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 Page모델의 경우 결정계수 0.97

Table 1 Estimated values of experimental coefficients for drying models

Model	Experiment coefficients	R <sup>2</sup>
Page	$P = 0.00297 - 0.00294(T_0) - 0.10417(RH_0) - 0.00005675(T_0)^2 + 0.00277(T_0 \cdot RH_0)$	0.9867
	$Q = 0.62748 - 0.01794(T_0) + 0.94467(RH_0) + 0.0004563(T_0)^2 - 0.02613(T_0 \cdot RH_0)$	0.9853
Thompson	$A = 9.48012 - 0.31674(T_0) - 19.25167(RH_0) + 0.0008368(T_0)^2 + 0.44287(T_0 \cdot RH_0)$	0.9622
	$B = 21.76997 - 0.59538(T_0) - 12.27167(RH_0) + 0.00289(T_0)^2 + 0.3077(T_0 \cdot RH_0)$	0.9999
Simplified diffusion	$A = 0.98455 - 0.01701(T_0) + 0.484(RH_0) + 0.0002888(T_0)^2 - 0.01352(T_0 \cdot RH_0)$	0.9530
	$k_2 = 0.12025 - 0.00889(T_0) + 0.427(RH_0) + 0.000246(T_0)^2 - 0.01228(T_0 \cdot RH_0)$	0.9869
Lewis	$k_1 = 0.11743 - 0.00529(T_0) + 0.32017(RH_0) + 0.0001953(T_0)^2 - 0.00927(T_0 \cdot RH_0)$	0.9917

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

Model	R <sup>2</sup>			RMSE		
	30°C	40°C	50°C	30°C	40°C	50°C
Page	0.9897	0.9762	0.9798	0.0159	0.0311	0.0402
Thompson	0.9745	0.9756	0.9742	0.0269	0.0329	0.0478
Simplified diffusion	0.9023	0.9295	0.9674	0.0438	0.0501	0.0496
Lewis	0.8923	0.9112	0.9619	0.0784	0.0794	0.0618

이상, RMSE 0.04이하, Thompson모델은 결정계수가 0.97이상, RMSE는 0.04이하로 나타났으며, 축소수분확산모델은 결정계수가 0.90이상, RMSE는 0.05이하로 나타나 30°C의 결정계수가 40 및 50°C 보다 낮게 나타났다. Lewis모델은 결정계수가 0.89이상, RMSE는 0.07이하로 나타났으며, 50°C를 제외한 온도에서 결정계수와 RMSE 값이 Page 및 Thompson 모델과 다소 차이가 나타났다. 따라서, 결정계수와 RMSE 값을 비교할 경우 Page모델이 적합성이 우수한 것으로 판단되었다.

그림 2는 건조온도 30°C, 상대습도 30%에서의 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값을 비교한 것이다. 그림과 같이 Page모델은 전체영역에서 비교적 잘 일치하였으며, Thompson

모델은 MR이 0.8에 도달할 때까지는 잘 일치하나, 이후로는 다소 오차가 나타났다. 축소수분확산모델은 건조초기, Lewis 모델은 전체영역에서 일치하지 않았다.

그림 3은 건조온도 30°C, 상대습도 50%에서의 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값을 비교한 것이다. Page모델은 MR 0.5까지 잘 일치하였으며, Thompson모델은 건조초기에 다소 오차가 나타났다. 축소수분확산 및 Lewis 모델은 건조조건 30°C-30%에서와 비슷한 경향이였다.

그림 4와 5는 건조온도 40°C에서의 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값을 비교한 것이다. Page모델은 MR이 0.6에 도달할 때까지 잘 일치하였으나, Lewis모델은 전체영역에서 잘 일치하지 않았다. Thompson 및 축소수분확산모델

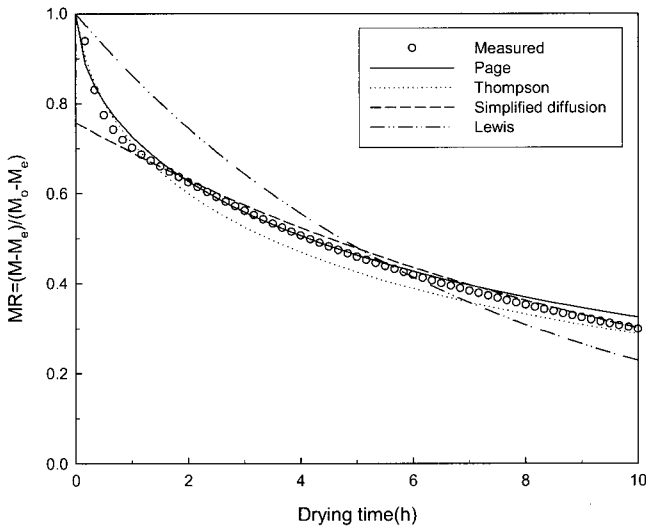


Fig. 2 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at drying condition 30°C and 30%.

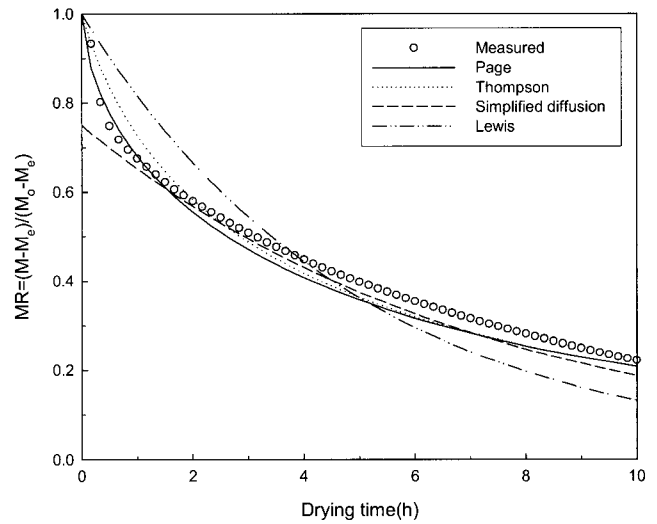


Fig. 4 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at drying condition 40°C and 30%.

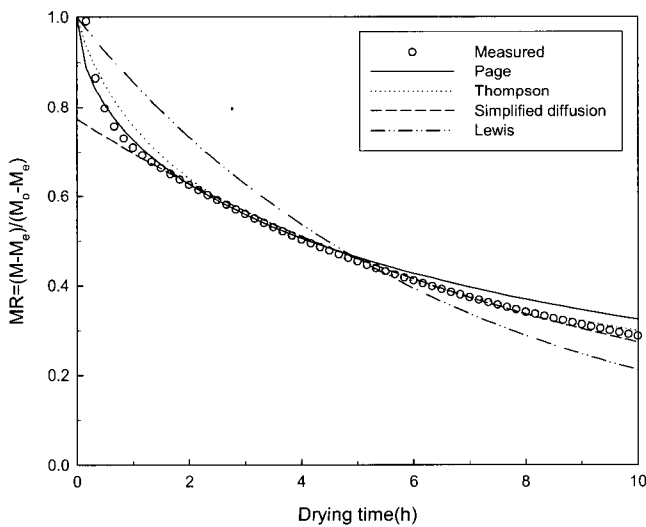


Fig. 3 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at drying condition 30°C and 50%.

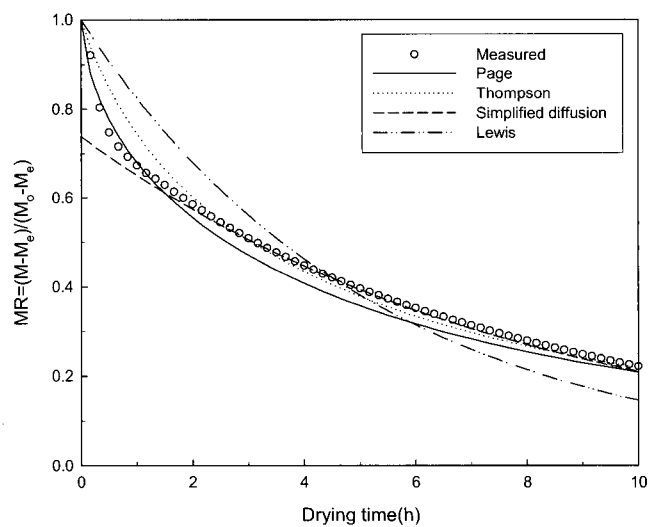


Fig. 5 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at drying condition 40°C and 50%.

은 건조조건 40℃-30%에서는 다소 오차가 나타났고, 건조조건 40℃-50%에서는 건조초기를 제외한 다른 영역에서는 비교적 잘 일치하였다.

그림 6과 7은 건조온도 50℃에서의 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값을 비교한 것으로 건조온도 40℃와 비슷한 경향으로 나타났다.

그림 8은 본 연구에서 개발한 청립 벼의 건조모델과 건조온도 35~55℃ 범위의 일반 벼의 건조실험을 통하여 Page 모델로 표현한 Keum 등(1997)의 건조모델을 건조온도 40 및 50℃, 상대습도 50%에서 비교한 것이다. 청립과 일반벼의 건조모델은 건조온도 40 및 50℃에서 각각 MR 0.7 및 0.8까지는 비슷한 경향이었지만, 이후로는 많은 차이가 나타났다. 또한, 청립 벼의 건조모델이 일반 벼의 건조모델에 비해 건조가 느리게 진행되어 건조특성이 다소 다른 것으로 나타났다.

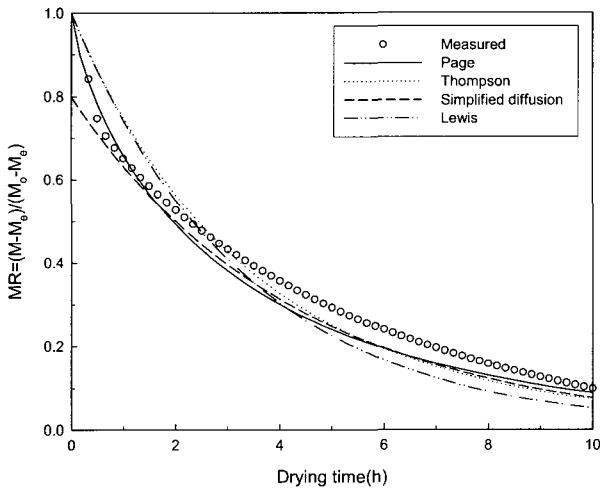


Fig. 6 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at drying condition 50℃ and 30%.

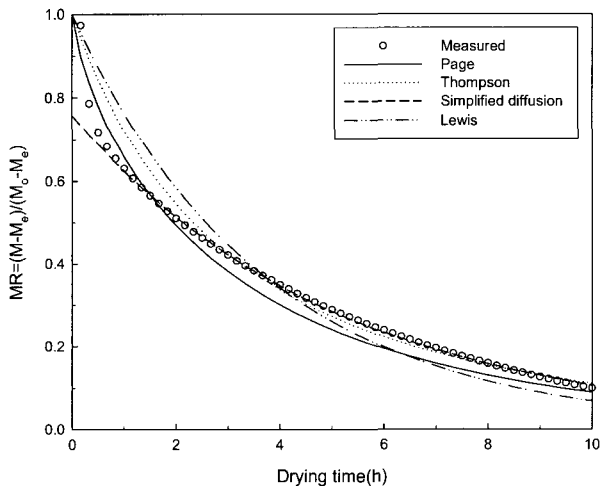


Fig. 7 Comparison of measured and predicted moisture ratio by four different drying models at drying condition 50℃ and 50%.

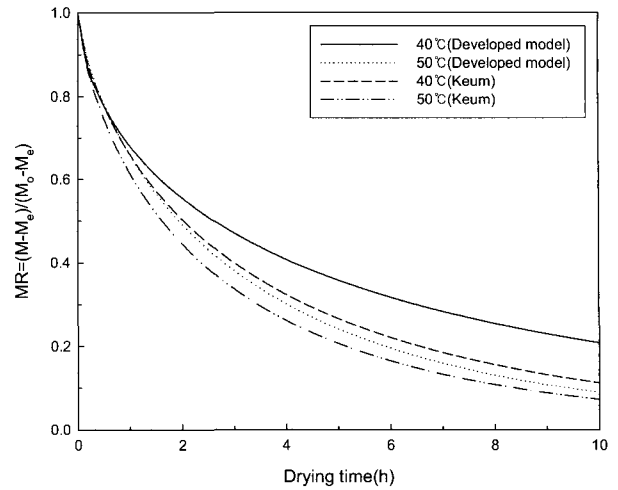


Fig. 8 Comparison of the drying model developed in this study and the cereal grains drying model(Keum et al.(1997)) by drying air temperatures at the relative humidity of 50%.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 청립 벼를 이용하여 건조온도 30, 40 및 50℃ 3 수준, 상대습도 30 및 50% 2수준에 대하여 건조속도를 측정하였으며, Page, Thompson, 축소수분확산 및 Lewis 모델 등 4개의 모델을 선정하여 실험상수를 결정하고 적합성을 비교하였다.

건조속도의 지표가 되는 반건조시간(MR=0.5)은 건조온도와 상대습도의 영향을 받았으며, 온도의 영향이 지배적이었다. 상대습도에 따른 반건조시간은 건조온도가 높을수록 차이가 크게 나타났으며 특히 건조온도가 50℃에서 상대습도가 건조속도에 미치는 영향이 크게 나타났다.

Page 모델의 결정계수는 0.97 이상, RMSE는 0.04 이하로 다른 모델에 비해 높은 수준이었으며, 반건조시간에 도달할 때까지 함수율비의 실험값과 각 모델에 의한 예측값이 잘 일치하여 청립 벼의 박층건조모델로 적절한 것으로 판단되었다.

#### 참고 문헌

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. Chae, J. C. and D. K. Jun. 2002. Effect of harvest time on yield and quality of rice. *Korean Journal of Crop Science* 47(3):254-258. (In Korean)
3. Champagne, E. T., K. L. Bett-Garber., J. Thompson., R. Muters., C. C. Grimm and M. McClung. 2005. Effects of

- drain and harvest dates on rice sensory and physicochemical properties. *Cereal Chemistry* 82(4):369-374.
4. Henderson, S. M. 1952. A basic concept of equilibrium moisture. *Agr. Eng.* 33:29-31.
  5. Kameoka, T. 1988. Thin layer drying characteristics rough rice(1). *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery* 50(3):69-76. (In Japanese)
  6. Keum, D. H and C. W. Park. 1997. Equilibrium moisture contents and thin layer drying equation of cereal grains and mushrooms(1). *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery* 22(1):11-20. (In Korean)
  7. Keum, D. H., H. Kim and S. J. Hong. 2002. Far-Infrared ray drying characteristics of rough rice(1). *Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery* 27(1):45-50. (In Korean)
  8. Kim H., D. H. Keum and O. W. Kim. 2004. Low temperature thin layer drying model of rough rice. *Journal of Biosystems Engineering* 29(6):495-500. (In Korean)
  9. Kwon, Y. W and J. C. Shin. 1980. A study on the changes in grain weight, moisture content, shattering force, milling ratio and apparent physical of rice with harvesting time. *Korean Journal of Crop Science* 25(4):1-9. (In Korean)
  10. Lee, S. E., J. T. Kim, H. Kim, O. W. Kim, S. S. Kim, D. C. Kim and D. H. Keum. 2006. Physicochemical properties of green rice. *Proceeding of the KSAM Conference* 11(1): 189-195.
  11. Lee, S. E., T. Y. Ha, J. H. Kim, H. Kim, D. C. Kim and D. H. Keum. 2006. Analysis of polyphenols and nutritional components of green rice. *Proceeding of the KSAM Conference* 11(1):196-201.
  12. Lewis, W. K. 1921. The rate of drying of solid materials. *Ind. Engng. Chem.* 13:427-432.
  13. Page, C. 1949. Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers. M. S. Thesis, Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
  14. Thompson, T. L. 1967. Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers. Ph. D. thesis, Purdue Univ., W. Lafayette, IN.
  15. Wang, C. Y and R. P. Singh. 1978. A single-layer drying equation for rough rice. *ASAE Paper No.* 78-3001.
  16. 김기중, 김선림, 송진, 손종록, 황흥구, 신진철, 최해춘, 최영근, 민용규. 2001. 수확시기별 벼의 도정 및 이화학적특성. *한국농화학회지* 44(3):179-184.
  17. 박중대, 최봉규, 금준석, 이현유. 2005. 전통 올벼쌀의 소비자 인지도 조사 및 품질특성. *한국식품과학회 학술발표회* P9-018.