

## 벼의 저온 박층건조방정식<sup>†</sup>

# Thin Layer Drying of Rough Rice by Low Temperature

김 훈*	금동혁**	김의웅*	한재웅**
정회원	정회원	정회원	정회원
H. Kim	D. H. Keum	O. W. Kim	J. W. Han

### 1. 서론

고품질 쌀 생산의 주요 요인은 벼의 품종, 재배방법 및 수확 후 처리기술 등이 있는데 최근에 많은 품종육종과 재배방법의 개선으로 산지별 품종별 차이는 점차적으로 감소하는 추세이다. 수확 후 처리기술에는 건조, 저장, 가공, 포장 및 유통기술 등이 있으며, 고품질 쌀 생산의 중요한 기술이다. 특히, 건조기술은 수확 후 처리기술중에서 첫 번째 기술로, 건조기술이 적절치 못하면 저장, 가공 및 포장 등 후속 기술에 악영향을 줌으로 건조기술은 고품질 쌀 생산에 관건이 되는 기술이다. 국내는 화석연료를 이용한 열풍건조 및 상온의 공기를 이용한 상온통풍건조방법이 벼의 건조에 이용되고 있다. 열풍건조는 순환식건조기 또는 연속식건조기를 이용하여 45 ~ 55°C의 고온 열풍을 이용하는 방법으로, 건조속도가 0.6 ~ 1.2%,w.b./hr의 고능력(High-Capacity) 건조방법으로 식미의 중시보다는 처리능력에 우선을 둔 방법이다. 따라서, 열손상에 의한 동할미 증가와 과건조의 위험이 높고 특히 식미 저하의 우려가 높다. 상온통풍건조방법은 사일로 또는 사각빈에 상온의 공기를 통풍하여 건조하는 방법으로 벼의 품질 손상을 최소화 할 수 있지만 건조속도가 0.01 ~ 0.04%,w.b./hr의 저능력(Low-Capacity) 건조방법으로 건조소요시간이 길고 특히, 강우 등 외기조건이 불리할 경우 건조능력 저하, 벼의 품질 손상 등의 단점이 있다. 저온건조는 10 ~ 30°C 범위의 저온에서 곡물을 건조하는 방법으로, 제습된 저온의 공기를 발생시켜 건조에 사용하는 제습 저온건조방법으로 저온에서 건조가 이루어짐으로 건조 중의 열손상을 최소화하여 동할미 발생 방지, 식미 향상 등 고품질의 쌀 생산에 가장 적합한 건조방법으로 보고되고 있다.

국내에서는 일부 농산물에 대한 저온건조방법이 도입되고 있으나, 벼에 대한 연구는 전무한 실정이다. 벼의 저온건조과정을 해석하고 건조 조건을 구명하는데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다. 따라서, 본 연구에서는 저온 건조온도 3수준, 상대습도 2수준에 대하여 건조속도를 측정하고, 곡물 건조방정식으로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검정하여 벼의 저온 박층건조방정식을 개발하는데 목적이 있다.

<sup>†</sup> 본 연구는 농림기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

\* 한국식품개발연구원 특화연구본부 쌀연구단

\*\* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉전공

## 2. 재료 및 방법

### 가. 공시재료

실험에 사용한 벼는 2002년 10월에 충북 음성지역에서 수확한 추청벼이며, 초기함수율은 26.81%(d.b.)이었다. 벼는 이물질 등을 제거한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 밀폐하여 2°C의 저온저장고에 보관하였다.

실험시작 12시간 전에 시료를 저온저장고에서 꺼내 밀폐상태로 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

### 나. 실험방법

실험장치는 공기조화장치, 공기충만실, 송풍기, 온·습도 측정장치, 시료대 및 중량측정장치 등으로 구성하였다. 공기조화장치(MTH4100, SANYO, UK)는 온도 -45 ~ 105°C(±0.3°C), 상대습도 0 ~ 99%(±2.5%) 범위의 공기를 발생할 수 있으며, 상부에 설치된 송풍기(최대풍량 3.7m<sup>3</sup>/min)에 의해 공기충만실로 조성된 공기가 이송되도록 하였다. 건조실은 직경 28cm, 길이 40cm의 원통형으로 구성하였으며, 건조실 중앙에 열전대(T type)와 습도계(TR72, JAP)를 이용하여 건조온도 및 상대습도를 기록하였다. 건조실 내의 풍속은 시료대 하부에서 풍속계(ANO6141, KANOMAX, JAP)를 이용하여 측정하였으며, 0.5m/s로 나타났다. 다공판으로 구성된 직경 28cm의 원통형 시료대에 벼를 박층으로 퇴적하고, 시료대 상부에 설치된 전자저울(LC4200, SARTORIUS, GER)을 이용하여 시료의 무게 변화를 측정하여 PC에 기록하였다. 건조온도는 15.0, 25.0 및 35.0°C의 3수준, 상대습도는 30 및 50%의 2수준에 대하여 3회 반복 실험을 하였다. 실험 시작 후 20분 간격으로 무게를 계측하였으며, 함수율비가 0.2에 도달할 때까지 건조를 수행하였다.

### 다. 분석방법

벼의 저온 박층 건조방정식을 결정하기 위하여 기존의 곡물 건조방정식 중에서 정확도와 이용 편의성이 우수한 4개의 건조모델을 선정하였다(Keum 등, 2002). Lewis(1921)의 Newton냉각법칙을 이용한 건조모델, Page(1949)의 옥수수 박층건조실험에 적용한 모델, Henderson(1952)의 수분확산법칙 해에 기초한 건조 모델, Thompson(1968)의 건조모델을 선정하였으며, 이들 모델들은 다음과 같다. 벼의 평형함수율은 Keum(2000) 등이 개발한 식을 이용하였다.

$$\text{Lewis모델 : } MR = \exp(-k_1 \cdot t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Page모델 : } MR = \exp(-P \cdot t_o^Q) \dots\dots\dots (2)$$

축소수분확산모델 :  $MR = A \exp(-k_2 \cdot t)$  ..... (3)

Thompson모델 :  $t = A \cdot \ln(MR) + B \cdot (\ln MR)^2$  .....(4)

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

$M(t)$  : 함수율(dec, d.b.)

$M_e$  : 평형함수율(dec, d.b.) =  $0.01 \left[ \frac{\ln(1 - RH)}{-0.00007836(T + 13.058)} \right]^{\frac{1}{2.1581}}$

$M_o$  : 초기함수율(dec, d.b.)  $t$  : 건조시간(hr)  $t_o$  : 건조시간(min)

$A, B, k_1, k_2, P, Q$  = 실험상수

함수율비의 실험치를 모델에 적합시켜 SAS의 비선형 회귀분석 프로그램을 이용하여 실험상수를 결정하였다. 건조모델의 실험상수  $A, B, k_1, k_2, P$  및  $Q$ 는 건조온도와 상대습도의 함수로 가정하고 다음의 식으로 설정하였다.

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

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

$T_0$  : 건조온도(°C)  $RH_0$  : 상대습도(dec)

식 (5)의 실험상수는 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 건조온도 및 상대습도에 따른 함수율비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상대습도 30%에서 건조온도 15.0°C, 25.0°C 및 35.0°C 일 때 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 각각 13.3, 6.7 및 3.7시간으로 나타났다. 건조온도가 15.0°C에서 25.0°C로 10°C 증가할 때 반건조시간은 급격히 감소되었으며, 35.0°C에서도 온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 현저히 줄어들었다. 상대습도 50%의 경우, 건조온도 15.0°C, 25.0°C 및 35.0°C일 때 반건조시간은 각각 20.3, 7.0 및 4.0시간으로 나타났다. 건조온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 상대습도 30%에서와 비슷한 경향으로 나타났다. 건조온도 15.0°C에서 상대

습도 30 및 50%에서 반건조시간은 13.3 및 20.3시간으로 상대습도가 증가할수록 반건조시간은 다소 크게 증가하였으나 건조온도가 25.0 및 35.0℃로 증가할수록 상대습도에 따른 반건조시간은 크게 영향을 미치지 않았다. 이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며, 상대습도에 따른 반건조시간은 건조온도가 증가할수록 크게 차이가 나타나지 않았지만 15.0℃에서는 다소 크게 나타났다. 또한, 건조속도는 건조온도에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

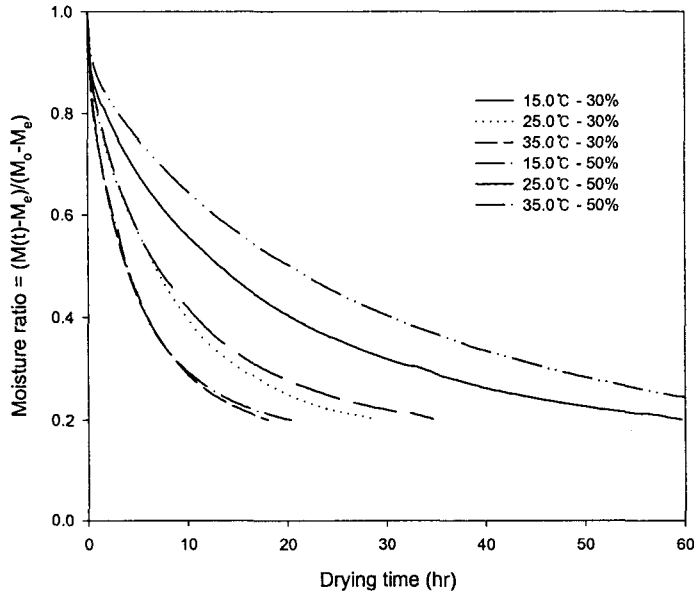


Fig. 1 Drying curves of rough rice at the temperatures and relative humidity.

#### 나. 건조방정식

건조실험 3회 중에서 2회의 반복치를 평균치로 구하여 모델의 실험상수를 결정하는데 이용하였으며, 1회의 건조실험 결과를 모델의 검증에 이용하였다. 4개의 건조방정식 즉, Lewis, Page, 축소수분확산모델 및 Thompson 모델의 실험상수와 결정계수는 다음의 표 1과 같이 나타났다. 표에서와 같이 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 나타났다.

4개 건조방정식의 적합성을 검증하기 위하여 온도별 함수율비의 실험치와 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 Page모델의 경우 결정계수는 0.995 이상, RMSE는 0.018이하로 나타났다. Thompson 모델은 결정계수가 0.992 이상, RMSE는 0.038이하로 나타났으며, Lewis모델과 축소수분확산모델의 결정계수는 0.932 이상, RMSE는 0.084이하로 나타나 Page모델과 Thompson모델에 비해 다소 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서, 함수율비(MR)의 값이 0 ~ 1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page모델이 다른 3개 건조방정식에 비해 적합성이 인정되는 것으로 간주할 수 있다.

Table 1 Estimated experiment coefficients for drying models

Models	Experiment coefficients	R <sup>2</sup>
Page	$P = 0.01932 - 0.0002115(T_0) - 0.0692(RH_0) \pm 0.00000882(T_0)^2 + 0.00283(T_0 \cdot RH_0)$	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
Lewis	$k_1 = 0.00883 + 0.00221(T_0) - 0.04967(RH_0) + 0.0000505(T_0)^2$	0.9989
축소수분확산모델	$A = 0.70516 + 0.00166(T_0) + 0.35596(RH_0) + 0.00007175(T_0)^2 - 0.01432(T_0 \cdot RH_0)$	0.5583
	$k_2 = 0.01043 + 0.00148(T_0) - 0.04217(RH_0) + 0.0000395(T_0)^2$	0.9987

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

Models	R <sup>2</sup>			RMSE		
	15.0℃	25.0℃	35.0℃	15.0℃	25.0℃	35.0℃
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
Lewis	0.9788	0.9721	0.9628	0.07531	0.08216	0.08470
축소수분확산모델	0.9581	0.9451	0.9326	0.03472	0.04365	0.04941

그림 2는 상대습도 30% 및 50%에서 건조온도 별 함수율비의 실험치와 Page모델의 한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 전체 건조온도에서 함수율비(MR)가 0.5이하일 때 다소 오차가 나타났지만 다른 영역에서는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

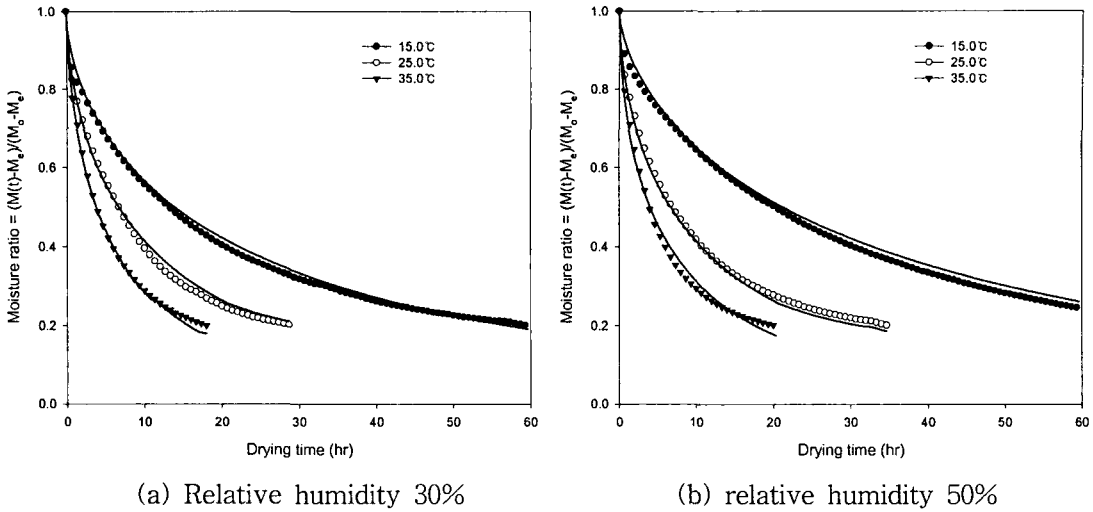


Fig. 2 Comparison of measured and predicted moisture ratio by Page model.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 건조온도 15.0, 25.0 및 35.0°C 3수준, 상대습도 30% 및 50% 2수준에 대하여 벼의 건조속도를 측정하고, 곡물 건조모델로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검정하여 건조방정식을 개발하기 위하여 수행되었다. 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며, 상대습도의 영향보다는 건조온도의 영향이 더 크게 나타났다. 저온영역 15.0°C에서는 상대습도에 따른 영향이 큰 것으로 나타났다. 벼의 저온 건조모델로는 Page모델이 결정계수 0.995 이상, RMSE는 0.0184 이하로 다른 3개 방정식에 비해 적합성이 인정되었다.

#### 5. 참고문헌

1. Henderson, S. M. 1952. A Basic Concept of Equilibrium Moisture. Agriculture Engineering. 2:29-32.
2. 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).
3. Keum, D. H and H. Kim. 2002. Far-Infrared Ray Drying Characteristics of Rough Rice(I). J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 27(1):45-50(In Korea).