

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

2002년 가을에 강원도에서 채취한 능이버섯을 구입하여 밀봉한 후 동결 저장하였다. 실험 전 상온에서 해동한 후 24시간 상온에 방치하여 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다. 함수율은 10g-105℃-24시간 건조법을 이용하여 측정하였으며, 초기함수율은 66.9%(w.b.)이었다.

나. 실험방법

실험장치는 공기조화장치, 공기충만실, 송풍기, 온·습도 측정장치, 시료대 및 중량측정장치 등으로 구성하였다. 공기조화장치(MTH4100, SANYO, UK)는 온도 -45 ~ 105℃(±0.3℃), 상대습도 0 ~ 99%(±2.5%) 범위의 공기를 발생할 수 있으며, 상부에 설치된 송풍기에 의해 공기충만실로 조성된 공기가 이송되도록 하였다. 건조실은 직경 28cm, 길이 40cm의 원통형으로 구성하였다. 건조실 내의 풍속은 시료대 하부에서 풍속계(ANO6141, KANOMAX, JAP)를 이용하여 측정하였으며, 1.2m/s로 나타났다. 다공판으로 구성된 직경 28cm의 원통형 시료대에 능이버섯을 박층으로 퇴적하였다. 시료대 상부에 설치된 전자저울(LC4200, SARTORIUS, GER)을 이용하여 시료의 무게를 변화를 측정하여 PC에 기록하였다. 열풍온도는 30.0, 40.0 및 50.0℃ 3수준, 상대습도는 30 및 50% 2수준으로 하였다. 실험 시작 후 10분 간격으로 무게를 측정하였으며, 시료의 무게 변화가 없을 때까지 건조를 수행하였다.

다. 분석방법

능이버섯의 건조방정식을 결정하기 위하여 기존의 농산물 건조방정식 중에서 정확도와 이용 편의성이 우수한 4개의 건조모델을 선정하였다. 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.

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

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

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

$$\text{Thompson모델 : } t = A \cdot \ln(MR) + B \cdot (\ln MR)^2 \dots\dots\dots (4)$$

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

$M(t)$: 함수율(dec, d.b.)

$$M_e : \text{평형함수율(dec, d.b.)} = \frac{M_0 M_f - M_m^2}{M_0 + M_f - 2M_m}$$

M_f : 실험 최종함수율(dec, d.b.) M_m : 실험 중간함수율(dec, d.b.)

M_0 : 초기함수율(dec, d.b.) t : 건조시간(hr) t_0 : 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.

$$\text{실험상수} = a_0 + a_1(T_0) + a_2(RH_0) + a_3(T_0)^2 + a_4(RH_0)^2 + a_5(T_0 \cdot RH_0) \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$: 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 상대습도 30% 및 50%에서 건조온도에 따른 함수율비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 상대습도 30%의 경우, 건조온도가 30°C, 40°C 및 50°C 일 때 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 각각 80, 60 및 57분으로 나타났다. 건조온도가 30°C에서 40°C로 10°C 증가할 때 반건조시간은 급격히 감소되었으나 50°C에서는 온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 현저히 줄어들었다. 상대습도 50%의 경우, 건조온도가 30°C, 40°C 및 50°C일 때 반건조시간(MR=0.5에 이르는 시간)은 각각 100, 70, 및 60분으로 나타났다. 건조온도가 30°C에서 40°C로 10°C 증가할 때 반건조시간은 급격히 감소되었으나 50°C에서는 온도의 증가에 따른 건조시간의 단축 정도는 현저히 줄어들었다. 이와 같이 건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도에 따라 영향을 받는 것으로 나타났으며, 상대습도에 따른 반건조시간은 크게 차이가 나타나지 않았다. 따라서, 반건조시간 즉, 건조속도는 상대습도의 영향보다는 건조온도의 영향이 더 크게 나타났다.

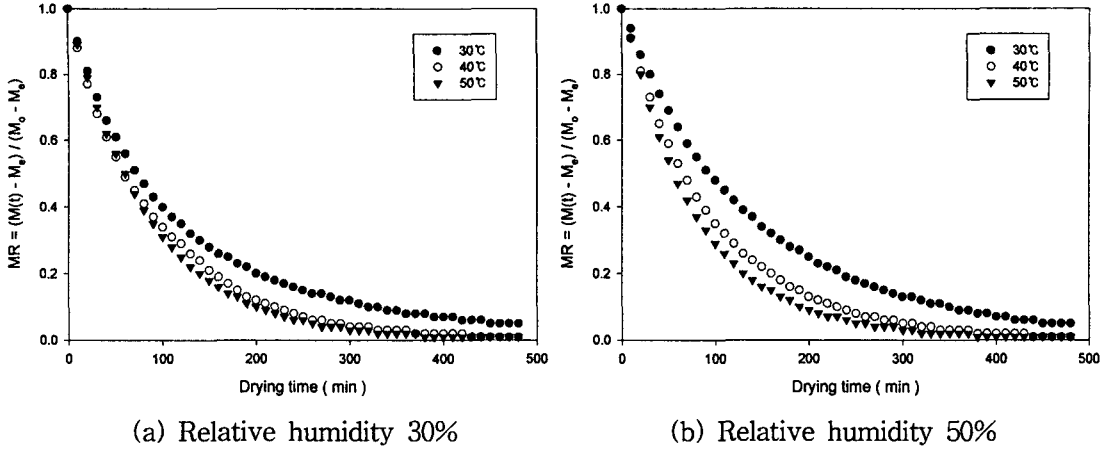


Fig. 1 Drying curves of *Sarcodon aspratus* for drying air temperatures.

나. 건조방정식

4개의 건조방정식 즉, Lewis, Page, 축소수분확산모델 및 Thompson 모델의 실험상수와 결정계수는 다음의 표 1과 같이 나타났다. 표에서와 같이 실험상수는 건조온도와 상대습도의 함수로 나타났으며, 결정계수는 0.96이상으로 모두 높은 값을 나타내었다.

Table 1 Estimated experiment coefficients for drying models

Models	Experiment coefficients	R ²
Page	$P = 0.07238 - 0.0121(T_0) - 0.13382(RH_0) + 0.00272(T_0 \cdot RH_0)$	0.9982
	$Q = -0.04837 + 0.02747(T_0) + 1.37717(RH_0) - 0.00014(T_0)^2 - 0.02698(T_0 \cdot RH_0)$	0.9998
Thompson	$A = 0.07631 - 9.74344(RH_0) - 0.00067(T_0)^2 + 0.21147(T_0 \cdot RH_0)$	0.9691
	$B = 3.31695 - 0.11813(T_0) - 3.239(RH_0) + 0.00102(T_0)^2 + 0.07013(T_0 \cdot RH_0)$	0.9845
Lewis	$k_1 = -0.16067 + 0.04092(T_0) - 1.24783(RH_0) - 0.00049(T_0)^2 + 0.02788(T_0 \cdot RH_0)$	0.9991
축소수분확산모델	$A = 0.61568 + 0.00855(T_0) + 10.55817(RH_0) - 0.0000265(T_0)^2 - 0.01(T_0 \cdot RH_0)$	0.9999
	$k_2 = -0.68402 + 0.05194(T_0) - 0.03233(RH_0) - 0.00047525(T_0)^2$	0.9752

4개 건조방정식의 적합성을 검정하기 위하여 온도별 함수율비의 실험치와 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 Page모델과 Thompson모델의 경우 전체 온도에서 결정계수는 0.999 이상, RMSE는 0.00782이하로 적합성이 인정되었으며, 두 모델 사이의 적합도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. Lewis모델과 축소수분확산모델은

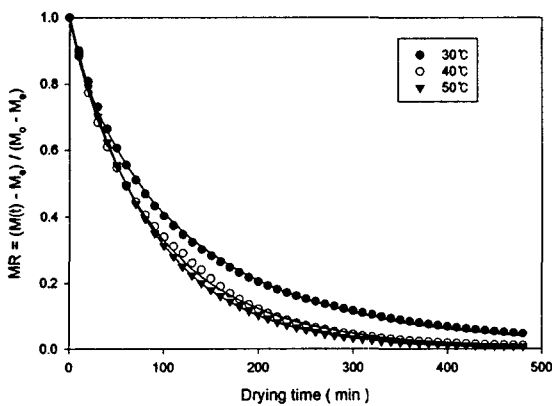
30℃에서 RMSE가 0.02163 이하로 나타나 Page모델과 Thompson모델에 비해 다소 적합성이 떨어지는 것으로 나타났다.

따라서, 함수율비(MR)의 값이 0 ~ 1사이의 값을 고려할 때 RMSE를 기준으로 Page 모델과 Thompson모델은 고도의 적합성이 인정되는 것으로 간주할 수 있다.

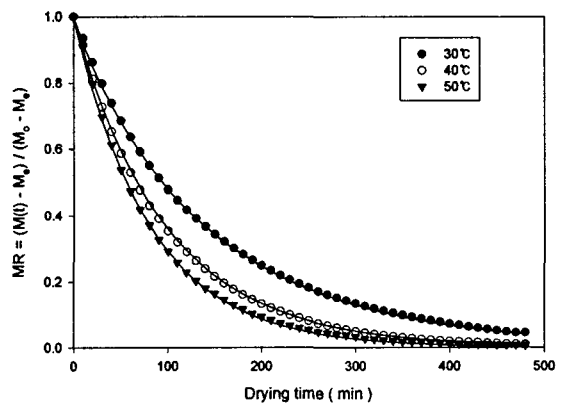
Table 2 Estimated coefficients of determination and root mean square error for drying models

Models	R ²			RMSE		
	30℃	40℃	50℃	30℃	40℃	50℃
Page	0.9995	0.9995	0.9998	0.00621	0.00555	0.00393
Thompson	0.9999	0.9991	0.9996	0.00393	0.00777	0.00782
Lewis	0.9975	0.9991	0.9997	0.02163	0.00957	0.00454
축소수분확산모델	0.9943	0.9990	0.9994	0.02122	0.00773	0.00845

그림 2와 그림 3은 상대습도 30% 및 50%에서 건조온도 별 함수율비의 실험치와 Page 모델 및 Thompson모델에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 전체 건조온도와 상대습도 영역에서 두 모델이 실험치와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

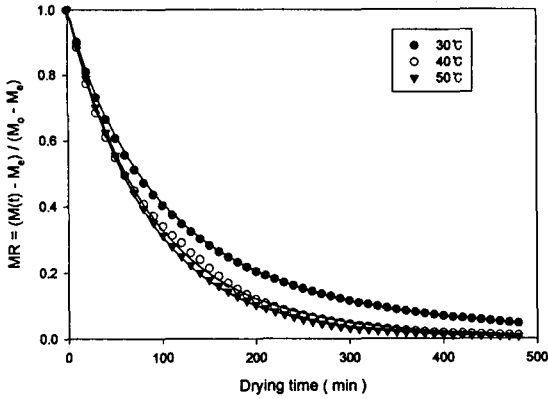


(a) Relative humidity 30%

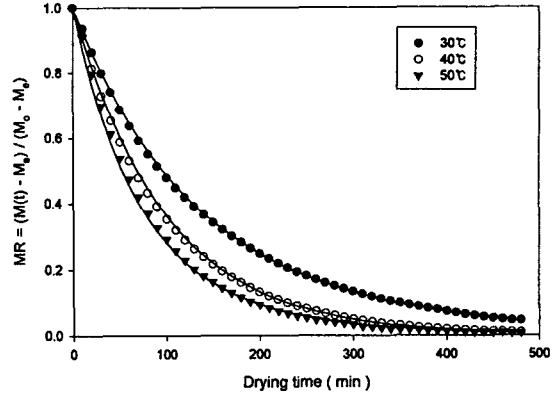


(b) Relative humidity 50%

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



(a) Relative humidity 30%



(b) Relative humidity 50%

Fig. 3 Comparison of measured and predicted moisture ratio by Thompson model.

4. 요약 및 결론

본 연구는 건조온도 30, 40 및 50°C 3수준, 상대습도 30% 및 50% 2수준에 대하여 능이버섯의 건조속도를 측정하고, 농산물 건조모델로 많이 이용되고 있는 4개의 건조방정식에 대하여 적합성을 검정하여 건조방정식을 개발하기 위하여 수행되었다.

건조속도의 지표가 되는 반건조시간은 온도와 상대습도에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다으며, 상대습도의 영향보다는 건조온도의 영향이 더 크게 나타났다.

능이버섯의 건조모델로는 Page모델과 Thompson모델의 경우 전체 건조온도에서 결정계수는 0.999 이상, RMSE는 0.00782 이하로 고도의 적합성이 인정되었으며, 두 모델 사이의 적합도의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

1. Henderson, S. M. 1952. A Basic Concept of Equilibrium Moisture. *Agriculture Engineering*. 2:29-32.
2. Lewis, W. K. 1921. The Rate of Drying of Solid Materials. *Int. Eng. Chem.* 13(5):427~432.
3. Page, C. 1949. Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers. M. S. Thesis, Purdue University.
4. 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.