

벼의 박층건조방정식에 관한 연구

Thin layer drying equations of short grain rough rice

琴東赫*

朴春雨*

정희원

정희원

D. H. Keum , C. W. Park

1. 서론

벼,보리 등의 곡류는 건조방법에 따라서 품질이 크게 좌우되므로 건조과정을 해석하고 적정 건조조건을 구명하는 것이 무엇보다도 중요하다. 농산물의 건조과정을 해석하고 건조조건을 구명하는 데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조방정식이다.

박층건조속도는 송풍공기의 풍속, 온도 및 상대습도의 영향을 받는다. 풍속은 일정 풍속이상에서는 영향을 무시할 수 있으나, 온도가 높을수록, 상대습도는 낮을수록 건조속도는 증가한다. 이러한 건조속도의 영향인자를 복합적으로 표시한 박층건조방정식의 개발이 필요하다.

국내 생산 벼의 박층건조방정식에 대한 연구는 일부 보고된 바 있으나, 실험장치의 미비로 상대습도의 영향을 고려하지 못한 것들이어서, 대부분 외국의 벼를 대상으로 외국에서 개발된 건조방정식을 이용하고 있는 실정이다. 따라서, 국내 생산 벼에 적합한 건조기를 개발하고 적정한 건조조건을 구명하기 위해서는 우리 나라 벼 품종에 대하여 송풍공기의 온도와 상대습도의 영향을 고려한 박층건조방정식의 개발이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 우리 나라에서 재배된 벼를 대상으로 송풍온도와 상대습도의 영향을 고려한 박층건조실험을 수행하여 적합한 박층건조방정식을 개발하는 데 있다.

2. 실험재료 및 방법

가. 공시재료

본 실험에 사용된 벼는 '95년산 단립종 추청벼이며, 실험기간동안 함수율 변화를 최소화하기 위하여 비닐봉지에 넣어 밀봉하고 저온저장고에 보관하였다. 실험을 시작하기 1일 전에 시료를 저온저장고에서 꺼내어 상온에 노출시켜 곡온이 상온과 평형되게 한후 약 100g의 시료를 건조실험에 사용하였다.

나. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 그림1과 같이 온도와 상대습도를 제어할 수 있는 공기조화장치, 건조실 및 시료의 무게 자동계측·기록 장치로 구성되어 있다.

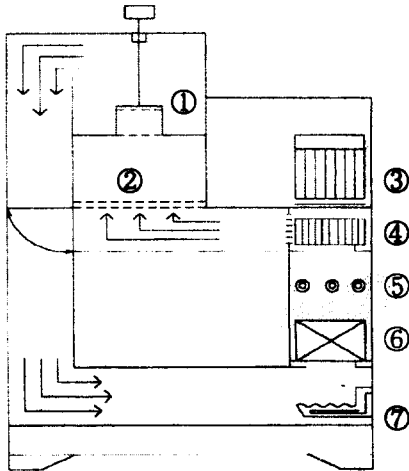
공기조화장치는 가열장치, 가습장치, 냉동기 및 송풍장치로 구성되어 있으며, 건구온도

=====

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

20 ~ 70℃, 상대습도 30 ~ 98 % 범위의 공기를 발생할 수 있도록 설계, 제작하였다. 공기 조화상태의 오차는 온도 $\pm 0.3^\circ\text{C}$, 상대습도 $\pm 3\%$ 정도였다. 공기가 정상상태에 도달한 후에 건조실을 통과할 수 있도록 건조실 하부의 다공판과 공기충만실 좌측에 공기 순환 댐퍼를 설치하였다.

건조실의 하부에는 다공판을 설치하여 공기의 유속분포가 균일하게 되도록 하였다. 건조실에 시료상자를 설치하였으며, 시료의 무게 변화는 시료상자에 연결된 로드셀과 자료수집 장치에 의하여 연속적으로 측정하였다. 그림2와 같이 시료상자는 원통형(직경 17cm)으로 제작하고, 시료층을 통과하는 공기가 시료층 외의 다른 통로로 유출되는 것을 방지하기 위하여 시료상자를 비휘발성 액체가 들어 있는 원통에 잠기게 하였다.



① Sample tray ② Perforated plate ③ Motor
④ Fan ⑤ Heater ⑥ Cooling coil ⑦ Humidifier

Fig.1 Schematic diagram of experimental dryer

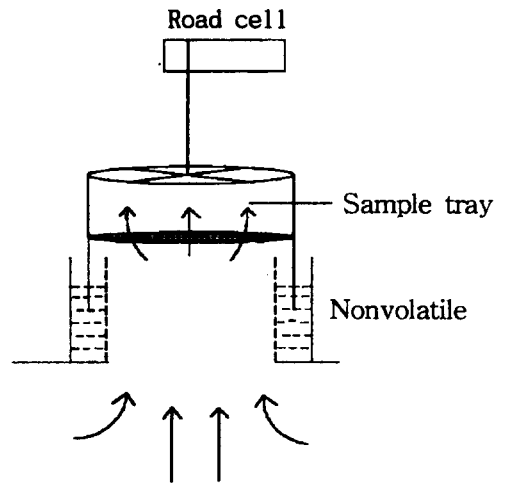


Fig.2 Cross-section of sample tray

다. 실험방법

본 실험은 건조온도 35℃, 45℃ 및 55℃의 3수준, 상대습도 40%, 55% 및 70%의 3수준에서 각각 3 반복 수행되었다. 풍속은 시료상자 하부에서 측정하였으며, 0.7m/sec로 일정하게 유지하였다.

실험 시작 1일 전에 시료를 저온저장고에서 꺼내 시료 온도가 실내 온도와 평형을 유지하게 한후 100g을 취하여 시료상자에 담아 실험장치의 건조실에 설치하였다. 실험장치를 가동하여 공기의 상태가 설정한 온도와 상대습도의 정상상태에 도달한 후 공기가 시료상자를 통과하도록 하였다.

송풍 기류에 의한 시료상자의 미세한 흔들림에 따른 계측치의 변화를 없애기 위해, 건조 기간동안 30분 간격으로 29분 동안은 건조, 1분 동안은 휴지하였으며, 시료의 무게변화는 송풍기 휴지기간동안에 측정하였다. 자료 수집프로그램은 C-언어로 작성하였다.

함수율은 10g입자-135℃-24시간법의 상압정온측정법으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 건조속도

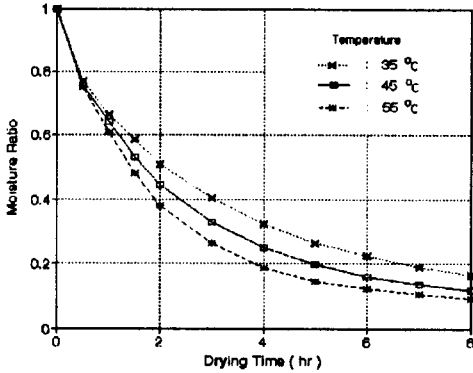


Fig.3 Drying curves for air temperature of 35°C, 45°C and 55°C respectively at relative humidity of 40%

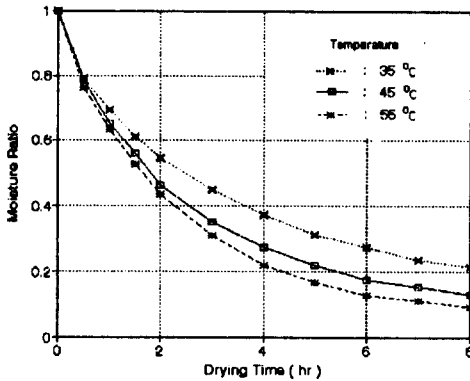


Fig.4 Drying curves for air temperature of 35°C, 45°C and 55°C respectively at relative humidity of 55%

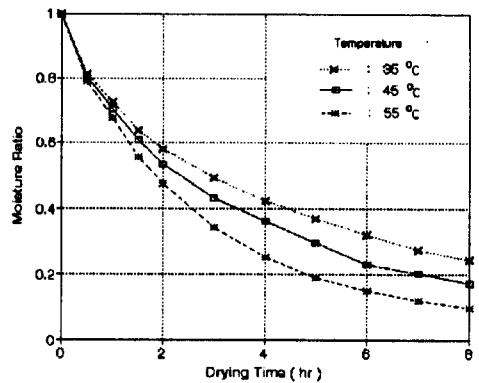


Fig.5 Drying curves for air temperature of 35°C, 45°C and 55°C respectively at relative humidity of 70%

그림3 ~그림5는 열풍의 상대습도가 각각 40%, 55% 및 70%일 때 열풍온도에 따른 함수비의 변화를 비교한 것이다. 함수비가 0.5에 이르는 반건조시간을 비교해 보면, 상대습도가 40%일 때 열풍온도 35°C, 45°C, 55°C의 경우에 각각 2.1시간, 1.6시간 및 1.4시간으로 나타났으며, 상대습도가 55%일 때는 각각 2.4시간, 1.8시간, 및 1.6시간, 상대습도가 70%일 때는 2.9시간, 2.2시간 및 1.8시간으로 나타났다.

나. 박층건조방정식

곡물의 박층건조방정식으로 널리 사용되고 있는 식(3) ~ 식(6)의 4가지 모델을 선택하여 이들 방정식에 포함된 실험상수를 stepwise 다중회귀분석 프로그램을 이용하여 결정하였다. 평형함수율은 다음 식(1)을 사용하였다(Chung-Pfost, 1992).

$$M_e = 0.29394 - 0.046015 \ln [- (T + 35.703) \ln (RH)] \text{ ----- (1)}$$

여기서, M_e : 평형함수율(dec, d.b.), T : 열풍온도(°C)

4가지 박층건조방정식의 실험상수는 모두 열풍의 온도와 상대습도의 함수로 나타났으며, 그 결과는 표1과 같다.

Table 1. Result of regression analysis for four different models

A. Page 모델

$$MR = \exp(-P t^Q)$$

$$P = 1.69453E-2 + 2.69833E-4 T - 1.21333E-2 RH$$

$$Q = 6.99294E-1 + 1.01583E-3 T - 3.71889E-2 RH$$

B. 축소 수분확산모델

$$MR = A \exp(-K_1 t)$$

$$A = 1.10960 - 5.83368E-3 T - 6.48602E-1 RH - 2.51507E-5 T^2 + 2.38455E-1 RH^2 + 1.32583E-2 T RH$$

$$K_1 = 2.04293E-1 + 1.53228E-3 T - 2.85692E-1 RH - 5.49329E-7 T^2 - 1.38663E-1 RH^2 + 6.94665E-3 T RH$$

C. Lewis 모델

$$MR = \exp(-K_2 t)$$

$$K_2 = 1.22111E-1 + 5.49133E-3 T - 1.71811E-1 RH$$

D. Thompson 모델

$$t = C \ln(MR) + D \ln(MR)^2$$

$$C = -7.73274 + 1.31360E-1 T + 1.12245E+1 RH - 2.64477E-4 T^2 - 7.51016 RH^2 - 1.37239E-1 T RH$$

$$D = 1.43172 - 1.44670E-1 T + 1.44240E+1 RH + 2.44195E-3 T^2 - 2.97633 RH^2 - 2.36758E-1 T RH$$

이상의 4개 박충건조방정식의 적합성을 비교하기 위하여 함수비의 실험치와 4개의 방정식에 의한 예측치 간의 RMSE와 결정계수를 표2에 나타내었다.

표에서와 같이 Page 모델과 Thompson 모델이 함수비의 RMSE가 가장 작은 값을 나타내었으며, 또한 결정계수의 값도 0.992이상으로 가장 큰 값을 나타냄으로서 실험치와

Table 2. Comparison of coefficients of determination (r^2) and root mean square errors(RMSE) of moisture ratio for four different models

Models	r^2	RMSE
Page model	0.99278	0.02527
Simplified diffusion model	0.96239	0.05086
Lewis model	0.97786	0.04724
Thompson model	0.99763	0.02393

가장 잘 적합하는 건조모델로 판단할 수 있다. 다음으로 Lewis모델, 축소 수분확산모델

의 순으로 적합도가 나타났다. Page모델을 기준으로 함수비의 RMSE를 비교해보면, Lewis모델은 약 1.9배, 축소수분확산모델은 약 2.0배의 큰 값을 나타내었다.

그림 6은 온도 55℃, 상대습도 55% 조건에서 실험치와 각 모델에 의한 예측 함수비를 비교한 것이다. Page 모델과 Thompson 모델에 의한 예측치는 건조기간 전 구간에 걸쳐서 실험치와 잘 일치하였으며, 축소 수분확산모델과 Lewis모델은 실험치와 상당한 오차를 나타내었다. 이상과 같은 경향은 다른 건조조건에서도 비슷하게 나타났다.

벼의 박층건조방정식에 대한 본 연구의 결과와 다른 연구자들의 결과를 비교하기 위하여, 본 연구에서 실험치와 가장 잘 일치하는 Page 모델과 벼에 대한 中馬豊의 식, Agrawal의 식, Wang의 식, 西山喜雄의 식을 비교하였다. 그림에서와 같이 Wang의 박층건조방정식은 본 연구의 Page모델과 건조 초기에는 아주 잘 일치하였으나, 건조 후기에 조금 낮은 값을 나타내었다. 西山喜雄의 모델은 전반적으로 약간 낮은 값을 나타내었다. Agrawal 모델과 中馬豊의 모델은 전반적으로 본 연구의 결과보다 아주 낮은 값을 나타내었다. 이상과 같은 현상은 다른 건조조건에서도 비슷하게 나타났다.

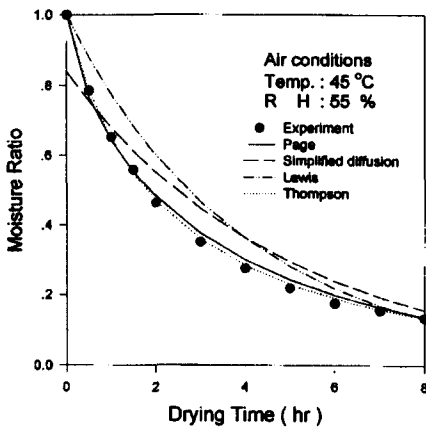


Fig.6 Comparison of experimental and predicted values by four different models.

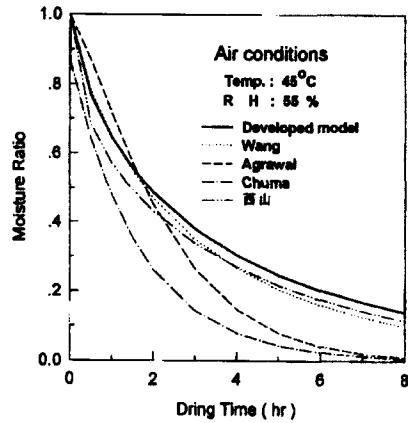


Fig.7 Comparison of the model developed in this study to those and by other researchers.

4. 결론 및 요약

우리나라에서 재배된 단립종 벼의 박층건조방정식을 개발하기 위하여 열풍의 온도와 상대습도를 조절할 수 있는 공기조화장치가 부착된 실험용 건조장치를 제작하여 박층건조 실험을 수행하였다. 건조실험에 사용한 공시재료로는 우리나라에서 주로 재배되고 있는 단립종 벼인 추청을 사용하였다. 박층건조실험은 건조온도 35℃, 45℃, 55℃의 3수준, 상대습도 30%, 45%, 65%의 3수준으로 3반복 수행하였다.

박층모델로는 곡물의 건조모델로 널리 사용되고 있는 Page모델, 축소 수분확산모델, Lewis모델 및 Thompson 모델 등 4개의 모델을 선정하여 실험상수를 결정하고 적합성

을 비교하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 건조속도는 열풍의 온도와 상대습도의 영향을 받았으며, 온도의 영향이 더 크게 나타났다. 온도의 영향은 상대습도가 높을수록 더 크게 나타났으며, 상대습도의 영향은 열풍온도가 낮을수록 더 크게 나타났다.
2. 벼의 박층건조방정식으로 선정한 4개 모델에 포함된 실험상수는 열풍의 온도와 상대습도의 다중회귀식으로 나타났으며, 결과를 표1에 제시하였다.
3. Page 모델과 Thompson 모델에 의한 예측 함수비는 건조기간 전 구간에 걸쳐서 실험치와 잘 적합하였으나, 축소 수분확산모델과 Lewis모델은 실험치와 상당히 큰 오차를 나타내었다.
4. 본 연구에서 개발한 Page모델과 다른 연구자들의 모델을 비교한 결과, Wang 및 西山喜雄의 모델이 본 연구의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.
5. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 단립종 벼의 박층건조방정식으로는 본 연구의 Page 모델과 Thompson모델이 가장 적절한 것으로 판단 되었다.

5. 참고문헌

1. 고헌균, 금동혁의 5인. 1990. 농산가공기계학. 향문사.
2. 금동혁. 1986. 벼 건조과정 분석에 필요한 자료 및 관련식. 한국농업기계학회지 11(2):92~102.
3. 정춘식. 1986. 단립종 벼의 흡습평형함수율 및 흡습방정식. 성균관대학교 석사학위논문.
4. 中馬 豊. 1969. 堆積農産物の非正常熱傳達. 日本農業機械學會誌 31(1):45~51.
5. Agrawal, Y. C. and R. P. Singh. 1977. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. ASAE Paper No. 77-3531.
6. Henderson, S. M. 1974. Progress in developing the thin-layer drying equation. Trans. ASAE 17(6):1167-1168, 1172.
7. Misra, M. K. and D. B. Brooker. 1980. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. Trans. of the ASAE 23(5):1254~1260.
8. Page, G. 1949. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.S. thesis, Purdue University.
9. Thompson, T. L. , Peart, R. M. and G. H. Foster. 1968. Mathematical simulation of corn drying a new model. Trans. of the ASAE 11(4):582~586.
10. Van Rest, D. and G. W. Isaacs. 1966. Exposed-Layer Drying Rate of Small Grains. Trans. of the ASAE 9(5):688~689.
11. Wang, C. Y. 1978. Simulation of thin-layer and deep-bed drying of rough rice. Ph.D thesis. UCD.