

벼의 저온건조 시뮬레이션

김 훈 한재웅

Low Temperature Drying Simulation of Rough Rice

H. Kim J. W. Han

Abstract

This study was conducted to verify the simulation model through the drying test, and investigate effect of factors, such as temperature of drying air, airflow rate, and velocity of the airflow, on the drying. The low temperature drying simulation model was developed based on the circulation dry simulation model presented by Keum et al. (1987), and by modifying low temperature thin layer drying model, equilibrium moisture content model, latent heat of vaporization model, and crack ratio prediction model. The heat pump and experimental dryer with a capacity of 150kg were used for the test. The RMSE between the predicted and measured value was 0.27% (drying temperature), 0.15% (crack ratio), and 2.08% (relative humidity), so the relevance of the model was verified. In addition, the effect of drying temperature, airflow rate, and velocity of the airflow on the drying was examined. The experimental results showed that the crack ratio at drying temperature of 25~40°C was allowable. Moreover, at below 30°C, variation of the crack ratio was slight, but drying time was delayed. Given these results, the drying temperature of over 30°C was effective. As the airflow rate increased, required energy dramatically increased. Whereas drying rate slowly increased, so loss of drying efficiency was caused. Considering these results, the dryer needed to be designed and adjusted to lower than 30 m³/min·ton. As velocity of the airflow increased, required drying energy increased when the velocity of the airflow was over 5 m³/hr, while crack ratio and drying rate showed little variation.

Keywords : Low temperature drying, Simulation, Rough rice, Heat pump

1. 서론

저온건조는 건조공기를 주변 온도보다 약간 가열하고, 곡물의 평형함수율 보다 낮게 채속하여 건조속도를 일정 이하로 유지하는 방법이다(Kim 등, 2004; Strommen와 Kramer, 1994; Wang와 Chang, 2001; Wei 등, 1994). 벼에서 저온건조온도는 열풍건조의 45~55°C에 비해 30°C 내외로 설정하여 건조하고 있으며, 건조속도는 열풍건조가 0.8%/hr 이상이며, 저온건조는 0.3%/hr 내외이다(Regalado와 Bekki, 2000; Zhang 와 Bekki, 1993). 화석연료를 이용하는 열풍건조에 비해 저온건조는 전기에너지를 사용하며, heat pump 등 열교환기를 기존의 건조시스템에 부착하여 주로 사용하고 있다.

국내에 가장 널리 보급되고 있는 벼 건조기는 순환식 곡물 건조기이다. 순환식 곡물건조기는 건조실과 템퍼링실로 구성되어 있으며, 곡물이 건조실을 수직으로 하강하는 동안 열풍이 곡물층을 수평방향으로 통과하면서 건조가 진행되는 횡류형 건조기로서, 건조와 템퍼링이 반복하면서 건조가 이루어진다(Keum 등, 1987). 순환식 곡물건조기의 성능은 건조속도, 소요에너지 및 곡물의 품질로 평가할 수 있으며 성능에 영향을 주는 인자로는 건조시간, 템퍼링시간, 곡물층의 두께, 곡물순환속도, 송풍량, 건조온도, 함수율 및 외기조건 등이 있다. 순환식 곡물건조기의 적정 설계, 운영조건 등을 결정하기 위해서는 다양한 성능인자가 건조기의 성능에 미치는 영향을 구명하여야 한다(Brooker 등, 1992; Keum 등, 1987). 성능인

This study was supported by the agricultural R&D Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication on 2009-09-23, reviewed on 2009-10-06, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-10-15. The authors are Hoon Kim, Researcher, KSAM member, Korea Food Research Institute, Korea, and Jae Woong Han, Researcher, KSAM member, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University, Korea. Corresponding author: J. W. Han, Researcher, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea; Tel: +82-31 -290-7832; Fax: +82-31-290-7901; E-mail: <hanwoongempal.com>.

자를 구명하기 위해서 실험에 의한 방법은 많은 시간과 경비에 소요되어 일반적으로 수확모델을 이용한 시뮬레이션 방법을 사용한다.

Bakker-Arkema등(1974)은 건조공기와 곡물에 대한 에너지 및 질량보존의 법칙에 기초한 횡류형 건조모델을 Kato(1983)는 건조과정에서의 에너지 분석모델을 제시하였다. Keum등(1998)은 곡물의 상온통풍건조 시뮬레이션 모델을 제시하였고, Keum와 Singh(1986)은 연속식 건조 시뮬레이션, Keum등(1987)은 순환식 건조 시뮬레이션 모델을 개발하고 검증하였다.

본 연구는 Keum등(1987)이 제시한 순환식 건조 시뮬레이션 모델을 기초로 하여 저온박층건조모델, 평형함수율모델, 증발잠열모델 및 동할율예측모델을 수정하여 저온건조 시뮬레이션 모델을 재구성하고, 벼의 저온건조실험을 통해 모델을 검증하여 건조성능인자가 건조에 미치는 영향을 구명하는데 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

가. 시뮬레이션 모델

1) 건조모델

벼가 건조실을 통과할 때 저온의 건조공기가 벼층을 횡류 방향으로 통과하면서 건조가 이루어지며, 건조실을 통과한 벼는 스크류콘베이어와 버킷엘리베이터에 의하여 템퍼링실로 이송되어 일정시간 템퍼링 과정을 거치게 된다. 이와 같이 저온 곡물건조기는 건조-순환-템퍼링의 과정이 반복되면서 최종 함수율에 도달하게 된다. 저온 곡물건조기에서의 건조 과정은 건조실 내에서의 건조과정과 템퍼링실에서의 템퍼링이 일어나는 과정으로 나누어 해석할 수 있다(Bakker-Arkema 등., 1974; Keum등., 1987). 건조공기는 곡물층을 통과하는 동안 곡물로부터 수분을 흡수하여 습도는 높아지고 온도는 하강하는 반면, 곡물은 수분을 잃고 곡온은 상승하게 된다. 따라서 후층에서의 함수율, 곡온 및 건조공기 조건들의 변화를 예측할 수 있어야 한다. 저온 곡물건조기의 시뮬레이션은 Keum등(1987)이 횡류형 건조과정을 해석한 건조모델을 이용하였는데 열풍이 벼층을 통과하면 함수율, 곡온, 건조공기의 온도 및 절대습도가 변하게 되며, 이들 4개의 미지수를 산출하기 위해 식 (1)~(4)을 이용하였다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{h_c a}{G_a(G_a + C_v H)}(T - \theta) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{h_c a}{G_g(C_g + C_w M)}(T - \theta) + \frac{h_{fg} + C_v(T - \theta)}{G_g(C_g + C_w M)} G_a \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{G_g}{C_a} \cdot \frac{\partial M}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \text{thin layer drying equation} \quad (4)$$

where, T : air temperature (°C)
 h_c : convection heat transfer coefficient (kJ/m²·K·h)
 a : specific surface area of grain (m²/m³)
 G_a : air flow rate (kg/h·m²)
 C_a : specific heat of dry air (kJ/kg·K)
 C_v : specific heat of water vapor (kJ/kg·K)
 H : enthalpy of dry air (kg/kg)
 θ : grain temperature (°C)
 G_g : grain flow rate (kg/h·m²)
 C_g : specific heat of dry grain (kJ/kg·K)
 M : grain moisture content (dec., d.b.)
 C_w : specific heat of water in grain (kJ/kg·K)
 h_{fg} : vaporization latent heat of water within grain (kJ/kg-H₂O)
 V_p : grain velocity (m/h)
 x : axle of air flow (m)
 y : axle of grain flow (m)

또한, 후층 건조과정을 해석하기 위해서 곡물의 평형함수율, 수분 증발잠열, 박층 건조모델, 열 및 물리적 성질 및 공기의 상태에 따른 습공기 성질 등의 자료를 이용하였다(Keum, 1986; Murata, 1983).

2) 저온 박층건조, 평형함수율 및 증발잠열모델

곡물의 건조속도를 나타내는 건조모델은 박층 건조모델과 후층 건조모델로 구분할 수 있다. 얇은 두께의 곡물층의 건조속도를 나타내는 모델을 박층건조모델이라 하고, 많은 박층으로 이루어진 후층에서의 건조과정을 해석할 수 있는 모델이 후층건조모델이다. 곡물의 건조과정을 해석하고 건조조건을 구명하는데 있어서 가장 중요한 기초 요소가 박층건조모델로서 후층건조모델에 기본이 되는 요소이다(Basunia와 Abe, 1998). 본 연구에 사용한 저온 박층건조모델은 다음 식 (5) (Kim등, 2004)을 이용하였다. 또한, 벼의 평형함수율모델은 Keum등.(2000)의 식 (6)을 이용하였다.

$$MR = \exp(-P \cdot t_o^Q) \quad (5)$$

$$M_e = 0.01 \left[\frac{\ln(1 - RH)}{-0.00007836(T + 13.058)} \right]^{2.1581} \quad (6)$$

where, $MR(t)$: moisture ratio (dimensionless)

$$(M(t) - M_e) / (M_o - M_e)$$

M_e : equilibrium moisture content (dec,d.b.)

$M(t)$: moisture content (dec,d.b.)

RH : relative humidity (dec)

T : temperature (°C)

M_o : initial moisture content (dec,d.b.)

t_o : drying time (min)

$$P : 0.01932 - 0.0002115(T_o) - 0.0692(RH_o), \\ - 0.00000882(T_o)^2 + 0.00283(T_o \cdot RH_o)$$

$$Q : 0.47652 + 0.0218(T_o) + 0.54742(RH_o) \\ + 0.0001065(T_o)^2 - 0.02225(T_o \cdot RH_o)$$

T_o : drying air temperature (°C)

벼의 수분증발잠열(h_{fg})은 평형함수열식을 이용하여 Othmer (1940) 방법으로 유도한 다음 식 (7)을 이용하였다.

$$h_{fg} = (2502.5 - 2.386\theta)(1 + 2.4263 \exp(-18.3816 \cdot M)) \quad (7)$$

3) 동할율예측모델

건조과정에서 건조온도가 높거나, 건조온도에 노출되는 시간이 길수록 동할율은 증가하게 된다. 따라서 건조온도에 노출되는 시간이 경과함에 따라 동할의 발생형태는 S자형으로 나타나는 것을 고려하여 Kim(2003)이 제시한 동할율예측모델을 사용하였다(식 (8)).

$$CR = \frac{A}{1 + \exp\left(-\frac{(t - t_o)}{B}\right)} \quad (8)$$

where, CR : crack ratio (%)

t : drying time (min)

$$A : -1699.55 + 15947.7(M_o) - 1.28524(T_o) \\ - 37529.3(M_o)^2 + 0.05792(T_o)^2 \\ - 3.19993(M_o \cdot T_o)$$

$$B : -1047.04 + 11201.0(M_o) - 3.79331(T_o) \\ - 30744.8(M_o)^2 - 0.03895(T_o)^2 \\ + 34.33586(M_o \cdot T_o)$$

$$t_o : -3087.95 + 31193.3(M_o) - 4.54745(T_o) \\ - 74834.1(M_o)^2 - 0.03861(T_o)^2 \\ + 23.63469(M_o \cdot T_o)$$

4) 기타 모델

벼의 산물밀도는 Kim와 Koh(1981), 비열은 Morita와 Singh

(1979), 대류열전달계수는 Wang등(1979)의 식을 이용하였으며, 건조소요에너지는 건조공기의 유동열로 산출하였다.

나. 시뮬레이션 모델 검증방법

후층 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 용량 150 kg의 실험용 순환식건조기와 송풍량 10 cmm에서 5~40°C 범위의 저온공기를 발생할 수 있는 heat pump를 이용하여 표 1과 같은 조건으로 건조실험을 수행하고, 건조실험에 의한 실측치와 모델에 의한 예측치를 비교하였다. 실험에 사용한 벼는 경기도 화성지역에서 2003년도에 수확한 추정벼로 40 kg 포대에 담아 2°C 저온저장고에 보관하였으며, 쪽정미, 이물 등을 제거한 후 실험에 사용하였다.

곡물 및 외기 온도를 측정하기 위하여 건조실과 텀퍼링실에 각각 2지점, 외기 1지점에 thermocouple(T type, OMEGA, USA)를 설치하고, 자료수집장치(7327, Datascan, UK)를 이용하여 2분 간격으로 측정하여 PC에 저장하였다. 외기 및 건조공기 유입부 및 배기부에 상대습도 센서(TR72, TandD, Japan)를 설치하여 같은 방법으로 PC에 저장하였다. 풍속측정은 풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 heat pump 출구 및 건조기 출구의 송풍량을 측정하였으며, 소요에너지는 적산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였다.

건조시작 후 2시간 간격으로 버킷엘리베이터에서 일정량의 시료를 채취하여 함수율 및 동할율을 측정하였다. 함수율은 10립-135°C-24시간 상압정온건조법으로 측정한 후 105°C 법으로 환산하였다. 동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관한 후 수작업으로 왕겨를 제거하여, 현미 250립에 대하여 동할립 판별기(DC-50, S.SEIKI, Japan)를 이용하여 육안으로 측정하였다(Yamashita, 1993; Sharma와 Kunze, 1982).

Table 1 Drying conditions used for the validation test of simulation program

| | |
|--------------------------------------|------|
| Input grain weight (kg) | 150 |
| Initial moisture content (%w.b.) | 24.7 |
| Initial grain temperature (°C) | 19.6 |
| Ambient temperature (°C) | 19.6 |
| Ambient relative humidity (%) | 50.2 |
| Drying air temperature (°C) | 30.3 |
| Drying air relative humidity (%) | 42.3 |
| Grain flow rate (m ³ /hr) | 0.25 |
| Airflow rate (m ³ /min) | 6.4 |

다. 건조 성능영향 인자구명

벼의 저온 곡물건조기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 건

조공기의 온도, 송풍량 및 유하속도가 벼의 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 분석하였다.

분석을 위한 건조조건은 표 2와 같다. 건조기의 용량은 상업용 규모인 3800 kg, 초기곡온 및 외기온도는 수확기를 고려하여 19.0℃로 설정하였고, 초기 및 최종함수율은 26.0% 및 16.5%로 설정하였다. 건조온도는 25~40℃ 범위의 4수준, 곡물 유하속도는 3~8 m³/hr 범위의 6수준, 송풍량은 14~34 m³/min 범위의 6수준으로 하였다.

Table 2 Drying conditions for low temperature drying simulation

| | |
|--|-------------------------|
| Capacity of grain dryer (kg) | 3800 |
| Size of drying chamber (m) | 0.877×2.0×0.125 (H×L×W) |
| Initial moisture content (%w.b.) | 26.0 |
| Final moisture content (%w.b.) | 16.5 |
| Initial grain temperature (℃) | 19.0 |
| Ambient temperature (℃) | 19.0 |
| Drying air temperature (℃) | 25, 30, 35, 40 |
| Drying air relative humidity (%) | 50.0 |
| Grain flow rate (m ³ /hr) | 3, 4, 5, 6, 7, 8 |
| Airflow rate (m ³ /min-ton) | 14, 18, 22, 26, 30, 34 |

3. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션 모델 검증

그림 1은 건조시간에 따른 함수율의 변화를 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 실측치와 예측치는 전체 건조시간에서 잘 일치하였다. 또한, RMSE(root mean square error)는 0.27%로 나타나 시뮬레이션 모델로 건조 중 함수율의 변화를 잘 예측할 수 있을 것으

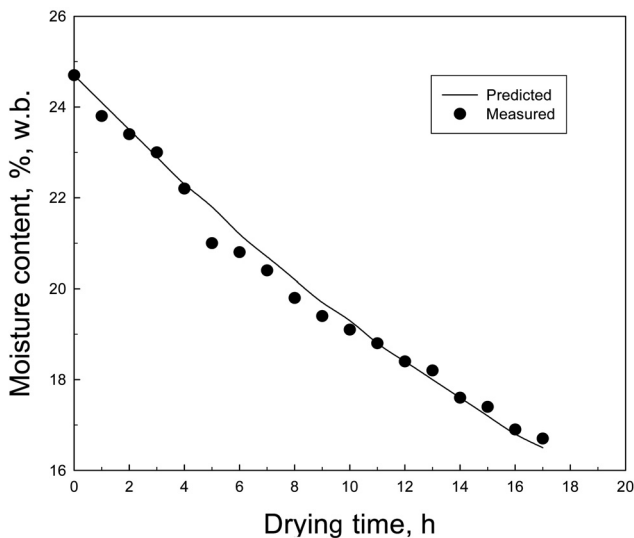


Fig. 1 Comparison of measured and predicted moisture content.

로 판단되었다.

그림 2는 건조시간에 따른 동할율의 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 것이다. 건조중반에는 실측치에 비해 예측치의 동할율이 다소 높게 나타났으나 건조종료 후 동할율은 실측치에서 0.8%, 예측치에서 0.4%로 실측치에서 다소 높게 나타났다. 전체 건조시간에서의 동할율 실측치와 예측치간의 RMSE는 0.15%로 나타났다. 순환식건조기에서 벼가 건조하는 동안에는 미립내부의 온도 및 함수율의 차이에 의해 응력이 발생하게 되고, 이 응력이 과대하게 되면 동할이 발생하게 된다(Yamaguchi 등, 1980). 동할은 주로 건조온도가 높거나 노출시간이 길수록 증가하게 된다. 또한, 건조-템퍼링-건조가 반복해서 이루어지는 순환식건조기에서 순환과정에서 이송장치들에 의한 충격으로 동할이 발생할 가능성도 있다. 특히, 함수율이 높은 벼의 경우 강도가 낮기 때문에 충격으로 인한 동할의 발생은 더욱 클 가능성이 있다. 그러나, 이러한 다양한 동할의 발생에 대한 수확모델을 개발한 연구가 전무하여 건조과정에서 동할 발생의 예측은 매우 어려운 것으로 판단된다. 본 연구에서는 동할 발생을 건조공기의 온도와 노출시간만을 고려하여 예측하였으며, 동할율 0~0.8% 범위에서 RMSE는 0.15%로 다양한 동할 발생의 원인들을 고려한다면 비교적 만족한 수준으로 판단된다.

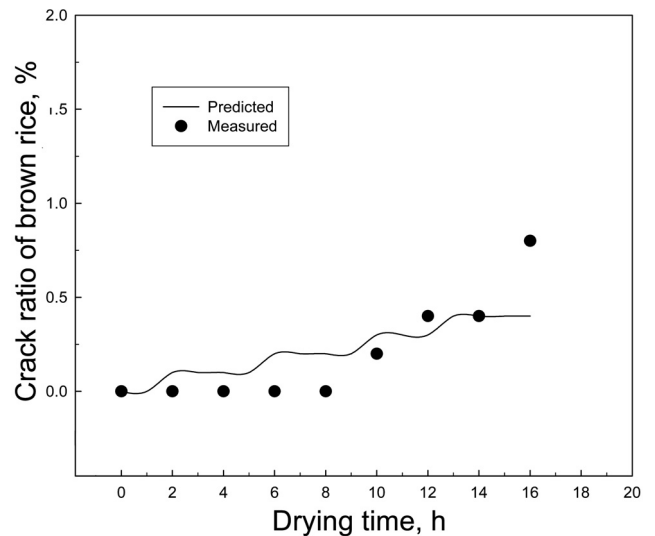


Fig. 2 Comparison of measured and predicted crack ratio of brown rice.

그림 3은 건조시간에 따른 템퍼링실의 곡온 실측치와 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조초기에 다소 오차가 나타났으나, 건조 5시간 이후로는 실측치와 예측치가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 실측치와 예측치의 RMSE는 0.71℃로 허용가능한 수준이었다.

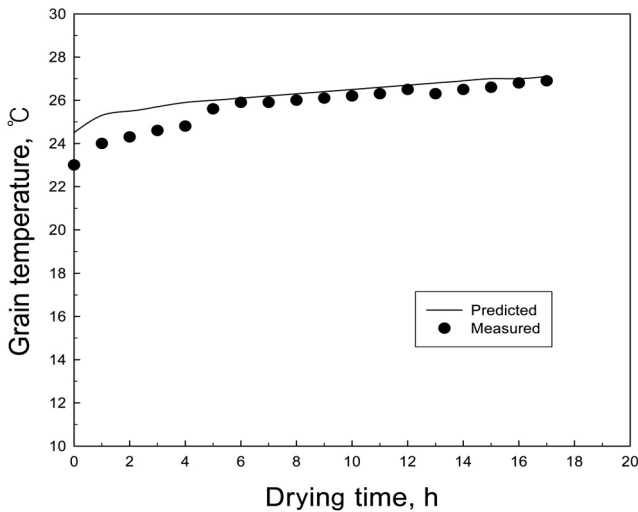


Fig. 3 Comparison of measured and predicted grain temperature of in tempering chamber.

그림 4는 배기공기 상대습도의 실측치와 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 상대습도는 건조초기에 66%에서 건조가 진행될수록 서서히 감소하여 건조종료 시점에는 48%까지 감소하였다. 실측치와 예측치간의 RMSE는 2.08%이었으며, 배기공기의 습도는 함수율 감소와 밀접한 관계가 있어 본 연구에서 함수율 변화를 잘 예측하는 것으로 나타나 배기공기의 습도도 잘 예측하였다.

시뮬레이션에 의한 건조소요에너지의 예측치는 1456.9 kJ/kg, 실측치는 1521.6 kJ/kg으로 나타나 오차는 4.3% 정도로 매우 만족한 수준이었다. 시뮬레이션에 의한 함수율, 동할율, 곡물 온도, 배기 상대습도 및 건조소요에너지의 예측치와 검증실험에서의 실측치를 종합적으로 비교해볼 때 시뮬레이션 모델의 적합성이 검증되었다.

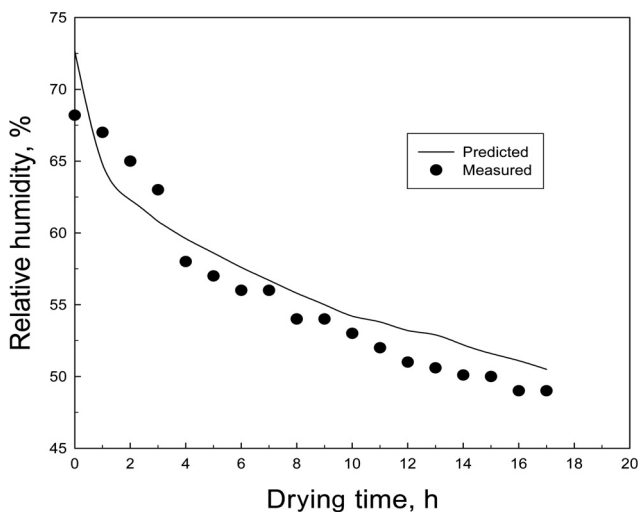


Fig. 4 Comparison of measured and predicted relative humidity of exhaust air.

나. 건조온도가 건조에 미치는 영향

건조온도는 벼의 동할율에 영향을 주는 가장 중요한 요인으로서 건조온도가 증가할수록 동할율도 증가하게 된다. 또한, 건조온도가 높을수록 건조속도도 증가하게 된다. Bautista(1997) 및 Toshima등(1996)은 연구보고와 유사한 결과를 나타내었다.

그림 5는 건조온도에 따른 동할율과 건조속도를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 건조온도가 증가할수록 동할율도 증가하였는데 30°C 이하에서는 0.3%를 유지하였으며, 건조온도가 30°C를 초과할 때 동할율은 증가하여 35°C 및 40°C에서 각각 0.5% 및 0.8%이었다.

국내의 건조과정에서 동할율 허용범위는 2%로서, 건조온도 25~40°C 범위에서 동할율은 모두 허용가능한 범위로 나타났다. 건조온도 30°C 이하로는 동할율의 변화가 미비하였으나, 건조속도는 지연되어 이를 고려할 경우 건조온도는 30°C 이상이 효과적이었다.

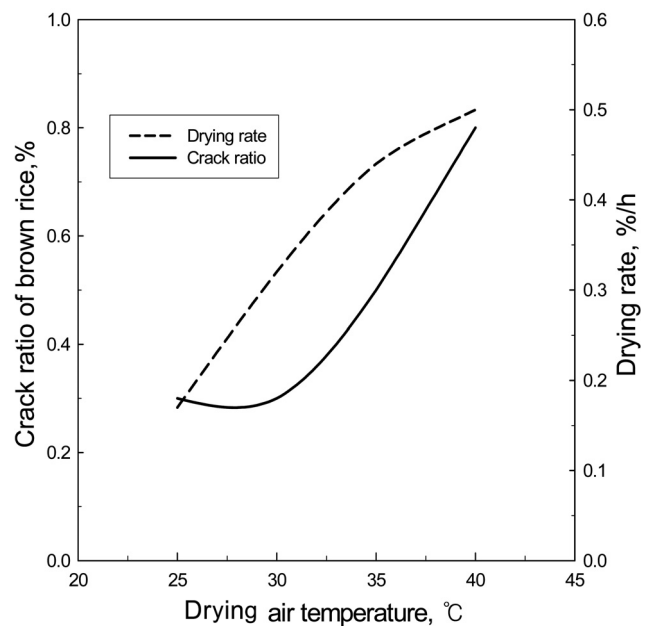


Fig. 5 Effect of drying air temperature on crack ratio and drying rate.

다. 송풍량이 건조에 미치는 영향

송풍량은 건조소요에너지와 밀접한 관계가 있는 인자로서, 송풍량이 클수록 건조속도는 증가하지만 일정 송풍량 이상에서는 건조속도의 변화가 없으며 소요에너지는 급격히 증가한다. Itoh등(1973)은 연구결과와 같은 경향을 나타내었다.

그림 6은 송풍량이 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 송풍량이 높을수록 건조속도는 완만하게 증가하였지만 소요에너지는 급격히 증가하였으며, 동할율은 0.3% 정도의 일정값을 유지하다

가 송풍량이 24 m³/min·ton에서 건조 순환회수의 감소로 건조시간이 감소하므로 동할율이 다소 감소하였으며, 송풍량이 30 m³/min·ton을 초과할 때 동할율은 증가하였다.

송풍량이 증가하면 소요에너지는 급격히 증가하는 반면, 건조속도는 완만하게 증대되어 건조 효율의 저하가 우려되므로 송풍량을 30 m³/min·ton 이하로 건조기를 설계하거나 건조기의 운영이 필요하였다.

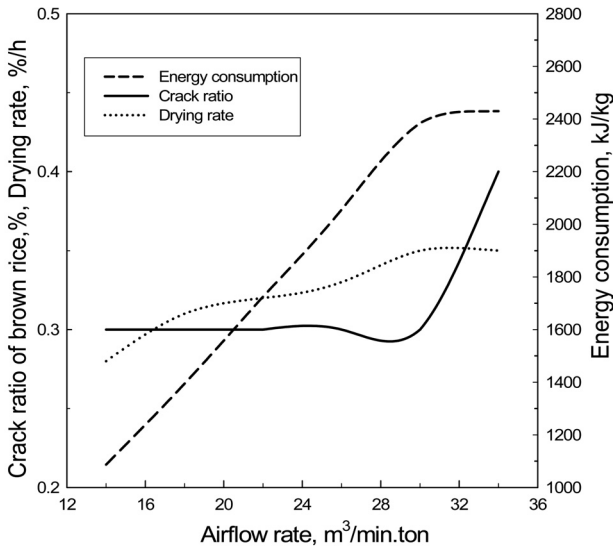


Fig. 6 Effect of airflow rate on crack ratio, drying rate and energy consumption.

라. 곡물 유하속도가 건조에 미치는 영향

곡물 유하속도가 동할율, 건조속도 및 소요에너지에 미치는 영향을 그림 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 유하속도

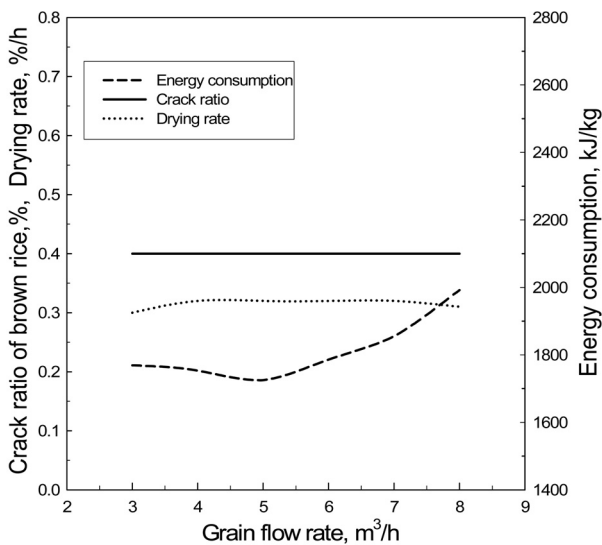


Fig. 7 Effect of grain flow rate on crack ratio, drying rate and energy consumption.

가 증가하여도 동할율과 건조속도는 거의 일정하게 유지하였으며, 소요에너지는 유하속도가 5 m³/hr 초과할 때 증가하는 것으로 나타났다. 열풍건조기의 경우 유하속도가 증가할수록 건조속도가 증대되어 소요에너지의 절감효과를 가져오지만, 건조온도 30°C 정도의 저온건조에서는 이러한 경향이 나타나지 않았다.

4. 결론 및 요약

본 연구는 벼의 저온 시뮬레이션 모델에 대하여 건조실험을 통해 검증하고, 시뮬레이션 방법을 통해 건조공기의 온도, 송풍량 및 유하속도 등 건조성능인자가 건조에 미치는 영향을 구명하기 위해 본 연구를 수행하였다.

- (1) Keum등(1987)이 제시한 순환식 건조 시뮬레이션 모델을 기초로 하여 저온박층건조모델, 평형함수율모델, 증발잠열모델 및 동할율예측모델을 수정하여 저온건조 시뮬레이션 모델로 재구성하였다.
- (2) 저온건조 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 용량 150 kg의 실험용 순환식건조기와 heat pump를 이용하여 건조실험을 수행하였으며, 건조실험을 통한 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치간의 RMSE는 건조온도 0.27%, 동할율 0.15% 및 배기공기의 상대습도 2.08%로 나타났다. 건조소요에너지의 오차는 4.3%로 잘 일치하여 시뮬레이션 모델의 적합성이 검증되었다.
- (3) 시뮬레이션 방법을 통해 건조온도, 송풍량 및 유하속도가 건조에 미치는 영향을 구명하였으며, 건조온도 25~40°C 범위에서 동할율은 모두 허용가능한 범위로 나타났다. 건조온도 30°C 이하로는 동할율의 변화가 미비하였으나, 건조속도는 지연되어 이를 고려할 경우 건조온도는 30°C 이상이 효과적이었다.
- (4) 송풍량이 증가하면 소요에너지는 급격히 증가하는 반면, 건조속도는 완만하게 증대되어 건조 효율의 저하가 우려되므로 송풍량을 30 m³/min·ton 이하로 건조기를 설계하거나 건조기의 운영이 필요하였다. 유하속도가 증가하여도 동할율과 건조속도는 거의 일정하게 유지하였으나 건조소요에너지는 유하속도가 5 m³/hr 초과할 때 증가하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. Bakker-Arkema, F.W., L. E. Lerew, S. F. Deboer and M. G. Roth. 1974. Grain Dryer Simulation. Michigan State Univ. Agriculture Experiment Station Research Report No. 224.
2. Basunia, M. A. and T. Abe. 1998. Thin-layer drying charac-

- teristics of rough rice at low and high temperature. *Drying Technology* 16:579-595.
3. Bautista, R. C. and E. Bekki. 1997. Grain Fissures in rough rice drying. *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 59:97-108.
 4. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. pp. 269-271. An Avi Book, NW, USA.
 5. Itoh, k., H. Terao, Y. Ikeuchi and T. Yoshida. 1973. Drying of rough rice. *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 35:385-392. (In Japanese)
 6. Kato, K. 1983. Energy evaluation method of grain drier(3). *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 45: 85-93. (In Japanese)
 7. Keum, D. H. 1986. Data and equations for the analysis of rough rice drying. *Journal Korea Society Agriculture Machinery* 11:92-102. (In Korea)
 8. Keum, D. H. and R. P. Singh. 1986. Continuous flow rice drying using simulation. *Journal Korea Society Agriculture Machinery* 11:41-54. (In Korea)
 9. Keum, D. H., C. S. Han and C. W. Park. 1998. Fan and heater management schemes for layer filling and mixing drying of rough rice with natural air by simulation. *Journal Korea Society Agriculture Machinery* 23:229-244. (In Korea)
 10. Keum, D. H., H. Kim and Y. G. Cho. 2000. Desorption equilibrium moisture content of rough rice, brown rice, white rice and rice hull. *Journal Korea Society Agriculture Machinery* 25:47-54. (In Korea)
 11. Keum, D. H., Y. K. Lee, K. S. Lee and J. K. Hwang. 1987. Study on the optimum operating conditions of rice circulating dryer using simulation. *Research Reports, Rural Development Administration (Agricultural Institutional Cooperation)* 337-390. (In Korea)
 12. Kim, H. 2003. Optimization of Low Temperature Drying System for Rough Rice Using Heat Pump. pp. 100-102. Sungkyunkwan Univ. Ph.D. Thesis. (In Korea)
 13. Kim, H., D. H. Keum and O. W. Kim. 2004. Low temperature thin layer drying model of rough rice. *Journal Korea Society Agriculture Machinery* 29:495-500. (In Korea)
 14. Kim, M. S. and H. K. Koh. 1981. Physical Properties of Grain. *Journal Korea Society Agriculture Machinery* 6:73-82. (In Korea)
 15. Morita, R. V. and R. P. Singh. 1979. Physical and thermal properties of short grain rough rice. *Transaction of the ASAE* 21:562-567.
 16. Murata, S. 1983. Prediction of drying characteristic and rate for grain *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 44:517-523. (In Japanese)
 17. Othmer, D. F. 1940. Correlating vapour pressure and latent heat data. *Journal Industrial Engineering Chemistry* 32:841-856.
 18. Regalado, M. J. C. and E. Bekki. 2000. Varietal differences in drying rate and fissure occurrence in heated air drying of rough rice. *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 62:81-91.
 19. Sharma, A. D. and O. R. Kunze. 1982. Post-drying fissure developments in rough rice. *Transaction of the ASAE* 25: 465-474.
 20. Strommen, I. and K. Kramer. 1994. New applications of heat pumps on drying processes. *Drying Technology* 12:889-901.
 21. Toshima, M., R. C. Bautista and E. Bekki. 1996. Fissure produced in dryin process of rough rice. *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery Tohoku branch* 43:61-64. (In Japanese)
 22. Wang, C. Y., T. R. Rumsey and R. P. Singh. 1979. Convective heat transfer coefficient in packed bed of rice. *ASAE Paper No. 77-3531*. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
 23. Wei, C. L., S. Tawarazako and K. Morita. 1994. Dependence of the drying rate of rough rice on drying air humidity for dehumidifying drying. *Japan Society of Agriculture Structure* 24:223-229. (In Japanese)
 24. Yamaguchi, S., S. Yamazawa, S. Wakabayashi and T. Shibata. 1980. Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel(part 1). *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 42:91-96.
 25. Yamashita, R. 1993. *New Technology in Grain Postharvesting*. pp. 21-29. Farm Machinery Industrial Research Cooperation.
 26. Zhang, L. H. and E. Bekki. 1994. Rough rice drying by heat pump dehumidification - Drying characteristics and thermal efficiency on recirculating type dryer. *Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery* 56:13-20.