

순환식 병류형 곡물건조기 개발(II) - 시뮬레이션모델의 검증 -

한재웅 금동혁 김 훈 홍상진

Development of a Rice Circulating Concurrent-flow Dryer (II) - Validation of Drying Simulation Model -

J. W. Han D. H. Keum H. Kim S. J. Hong

Abstract

This study was performed to develop a simulation model of circulating concurrent-flow rice dryer. The simulation model consists of drying model, tempering model and crack prediction model. The drying and tempering models were developed based on mathematical analysis, and the crack prediction model was developed by thin layer drying tests. Rice drying tests were done with three replications by use of a pilot scale dryer of holding capacity of 700 kg. Experimental values for moisture content, rice temperature, rice crack, and drying energy were compared with predicted values by simulation model. The RMSEs of predicted moisture contents were ranged from 0.5807% (d.b.) to 1.1951% (d.b.) and the coefficients of determination were 0.9688 to 0.9812. The RMSEs of predicted rice temperatures at the exit of the drying chamber were 1.83 to 3.81 °C and the coefficients of determination were 0.8834 to 0.9482. The results for moisture contents and rice temperatures showed very good relationships between predicted values and experimental values. The RMSEs of predicted value of crack ratio were 0.4082 to 0.7967% and the coefficients of determination were 0.8742 to 0.9547.

Keywords : Concurrent-flow dryer, Simulation, Circulating type, Rough rice drying

1. 서론

건조기를 개발하기 위해서는 건조기의 성능을 예측할 수 있는 시뮬레이션 모델의 개발이 필요한 경우가 많다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 주요 설계인자를 결정할 수 있다. 또한 시뮬레이션 프로그램은 건조 요인이 건조기의 성능에 미치는 영향을 분석하는데 효과적으로 이용된다.

Öholm(1955)은 병류건조의 원리를 처음으로 제시하였다. Farmer(1972)는 병류형 냉각장치가 부착된 1단 병류형 건조기의 개발 위하여 동적 계획법에 의한 최적설계 프로그램을

개발한 바 있으며, 여기에서 목적 함수로는 건조에너지 비용을 사용하고 제한요소로는 곡물의 품질을 사용하였다. 그 결과 송풍공기의 온도를 높이고 송풍량을 작게 하는 것이 유리하다고 보고하였다. Baughman 등(1973)은 옥수수립을 구로 가정하고 수분확산이론에 근거하여 병류 건조과정을 시뮬레이션한 바 있다. Bakker-Arkema 등(1977)은 병류형 곡물건조기에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 이 모델이 다단 병류형 곡물건조기의 설계에 이용할 수 있는 것으로 보고하였다. Keum과 Han(1986)은 순환식 병류형 건조기에서 벼의 건조과정을 해석하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고

This study was supported by the agricultural R&D Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication in September 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in October 2007. The authors are Jea Woong Han, Researcher, KSAM member, Dong Hyuk Keum, Professor, KSAM member, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Hoon Kim, Researcher, KSAM member, Korea Food Research Institute, and Sang Jin Hong, Researcher, KSAM member, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University. Corresponding author: D. H. Keum, Professor, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea; E-mail: <dhkeum@skku.edu>.

이를 실험적 방법으로 검증한 결과 함수율 변화를 적절하게 예측할 수 있다고 보고하였다. Keum과 Lee(1988)는 1단 슈트 순환식 병류형 건조기를 개발하고 성능분석을 위한 시물레이션 모델을 개발하였으며, 벼의 건조실험을 통하여 건조 온도가 높을수록 건조속도는 증가하고 완전미수율의 큰 감소를 보였다고 보고하였다. 또한 송풍량이 증가할수록 건조속도와 소요에너지는 증가하며, 완전미수율은 감소한다고 보고하였다. Keum 과 Hwang(1991)은 벼를 이용하여 1단 슈트 순환식 병류형 건조기의 설계 및 성능평가를 수행하였으며, 시물레이션에 의한 예측 함수율의 표준오차는 0.4~0.9% (w.b), 예측 곡온의 표준오차는 0.46~2.70℃로 나타났다고 보고하였다. 순환식 병류형 건조기를 개발하기 위해서는 병류 건조과정을 해석할 수 있는 건조모델과 템퍼링 과정을 해석하기 위한 템퍼링 모델이 필요하며, 또한 건조 중 발생하는 벼의 동할을 예측할 수 있는 동할을 예측 모델이 필요하다.

본 연구는 건조 및 템퍼링 과정을 해석하기 위한 수학모델과 건조 중 벼의 동할율을 예측하기 위한 동할율 예측 모델을 개발하고, 용량 700 kg의 개발된 순환식 병류형 건조기를 이용하여 시물레이션 모델의 예측 정확도를 검증한다.

2. 시물레이션 모델링

순환식 병류형 곡물건조기의 건조과정은 그림 1과 같이 곡물이 열풍과 함께 건조실을 하강하는 동안 건조가 이루어지며, 건조실을 통과한 곡물은 버킷엘리베이터에 의하여 건조기 상부의 템퍼링실로 이송된다. 템퍼링실에서 건조과정 동안에 발생한 곡물 내부의 수분 및 온도구배가 완화되는 템퍼링 과정을 거치게 된다. 템퍼링 과정을 거친 곡물은 다시 건조실로 들어가 건조가 이루어지게 되며, 건조-순환-템퍼링 과정을 반복하면서 목표로 하는 함수율에 도달하게 된다.

따라서, 순환 병류형 건조기의 시물레이션을 위해서는 건조과정과 템퍼링 과정을 해석할 수 있는 수학모델이 필요하다.

가. 건조모델

건조실에서 곡물이 건조되는 동안 함수율, 곡물온도, 건조공기의 온도 및 습도가 변한다. 즉, 곡물층의 위치와 시간의 함수인 4개의 미지변수가 존재한다. 이 4개의 미지변수를 결정하기 위해서는 4개의 방정식이 필요한데, 이를 후층건조모델이라 한다. 곡물의 병류건조과정에 대한 후층건조모델은 Keum과 Lee(1988)가 식(1)~(4)와 같이 제시하였으며, 이 방정식은 곡물 및 곡물층을 통과하는 공기에 대한 열과 물질 평형을 고려하여 유도되었다. 식(5)는 곡물을 구로 간주하고, 곡

립내부의 수분분포를 나타내는 수분확산모델이다.

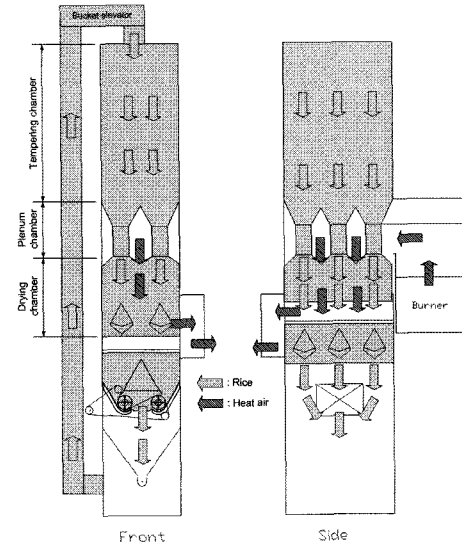


Fig. 1 Schematic diagram of rice circulating concurrent-flow dryer.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{-h_c a}{G_a c_a + G_a c_v H} (T - \theta) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{h_c a}{G_p (c_p + \bar{M} c_w)} (T - \theta) - \frac{h_{fg} + c_v (T - \theta)}{G_p (c_p + c_w M)} G_a \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

$$\frac{dH}{dx} = -\frac{G_p}{G_a} \frac{d\bar{M}}{dx} \quad (3)$$

$$\frac{d\bar{M}}{dx} = \frac{3}{R^3} \int_0^R \frac{\partial M}{\partial x} r^2 dr \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} = \frac{D}{V_p} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (5)$$

여기서,

T : 공기온도(℃)

h_c : 대류열전달계수(kJ/m²·K·h)

a : 벼의 비표면적(m²/m³), (단립중: 1,844 m²/m³)

G_a : 건공기의 질량유동율(kg/h·m²)

c_a : 건공기의 비열(kJ/kg·K), (1.0069 kJ/kg·K)

c_v : 수증기의 비열(kJ/kg·K), (1.87568 kJ/kg·K)

H : 공기의 절대습도(kg/kg)

θ : 곡물온도(℃)

G_p : 곡물순환율(kg/h·m²)

c_p : 곡물건물의 비열(kJ/kg·K), (1.2692 kJ/kg·K)

$\bar{M}(x)$: 곡립의 평균 함수율(dec., d.b.)

$M(r,x)$: 곡립의 내부 함수율(dec., d.b.)

c_w : 물의 비열(kJ/kg·K), (3.49 kJ/kg·K)

h_{fg} : 곡물수분의 증발잠열(kJ/kg)
 D : 곡물의 수분확산계수(m²/h)
 V_p : 곡물유하속도(m/h)
 r : 곡립의 반경방향 좌표(m)
 R : 곡립의 반경(m), (0.00177 m)

식(1)~(4)는 1계 상미분방정식이며, 식(5)는 2계 편미분방정식이다. 식(5)를 연립 1계 상미분방정식으로 변환하여, 식(1)~(5)가 연립 1계 상미분방정식이 되도록 구성하였다. 이의 해를 Runge-Kutter 방법으로 구하였다. 식(1)~(5)의 초기 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(0,0) &= T_{\infty} \\ \theta(0,0) &= \theta_0 \\ H(0,0) &= H_{\infty} \\ \bar{M}(0,0) &= M_0 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서, T_{∞} : 열풍온도(°C)
 θ_0 : 초기곡온(°C)
 H_{∞} : 열풍의 절대습도(kg/kg)
 M_0 : 초기 함수율(dec., d.b.)

나. 템퍼링모델

건조 중에 발생한 곡립내부의 수분구배는 템퍼링 과정동안 균등화된다. 템퍼링 과정 동안에는 곡립 외부로 수분증발이 없다고 가정하면, 곡립의 평균함수율의 변화는 없으며, 다만 내부의 수분이 외부로 확산된다.

곡립의 템퍼링은 건조와 마찬가지로 내부 수분확산현상이다. 다만, 건조와 달리 외부로 수분증발이 일어나지 않으므로 곡립표면을 불투과성으로 간주할 수 있다. 따라서, 템퍼링은 건조와 동일한 수분확산방정식으로 해석할 수 있으며, 곡립 표면의 경계조건이 건조과정과 다르게 된다.

템퍼링과정 동안 곡립표면은 불투과성이므로 곡립표면에서의 경계조건은 다음 식(7)로 표시된다.

$$\frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0 \tag{7}$$

따라서, 템퍼링 과정의 지배방정식과 초기 및 경계조건은 다음의 식(8)~(11)과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \tag{8}$$

초기조건 : $M = M(r, 0)$;
 건조후의 내부 수분분포 (9)

경계조건 : $\frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$,
 $r=0$ (곡립 중심) (10)

$\frac{\partial M}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0$ (곡립표면) (11)

여기서, a : 곡물의 비표면적(m²/m³)
 M : 곡물의 함수율(dec., d.b.)
 D : 곡물의 수분확산계수(m²/h)
 t : 건조시간(h)
 r : 곡립의 반경방향 좌표(m)

템퍼링 과정의 수치해는 건조과정의 해석과 동일하며, 다만 곡립표면의 경계조건만이 변경된다.

다. 동할율예측모델

동할율 예측모델은 Han(2006)이 식(12)와 같이 제시하였으며, 열풍 노출에 발생하는 벼의 동할율을 측정하여, 초기함수율, 열풍온도 및 열풍노출시간의 함수로 표시되는 동할율 예측모델을 사용하였다.

$$CR = \frac{A}{1 + \exp\left(1 - \frac{(t - t_o)}{B}\right)} \tag{12}$$

여기서, CR : 동할율(%)
 t : 건조시간(h)

$$A = -1.60872 + 22.24773(M_o) - 0.03752(T_o) - 116.549(M_o)^2 + 0.39734(M_o \cdot T_o)$$

$$B = 60.29926 - 40.7154(M_o) - 1.42268(T_o) - 511.598(M_o)^2 + 4.91974(M_o \cdot T_o)$$

$$t_o = -7.1224 + 2805.967(M_o) - 7.67391(T_o) - 9644.19(M_o)^2 + 26.62121(M_o \cdot T_o)$$

M_o : 초기 함수율(% w.b.)

T_o : 건조온도(°C)

3. 시뮬레이션 프로그래밍

본 시뮬레이션 프로그램은 Visual Fortran을 이용하여 작성하였다. 이 프로그램은 주프로그램, 곡물의 평형함수율을 계산하기 위한 Function EMC, 동할율을 계산하기 위한 Subroutine Head 및 13개의 Psychometric function으로 구성하였다.

프로그램의 자세한 Flow chart는 그림 2와 같다. 표 1은 개발한 시뮬레이션 프로그램의 입력 및 출력 데이터를 나타낸 것이다.

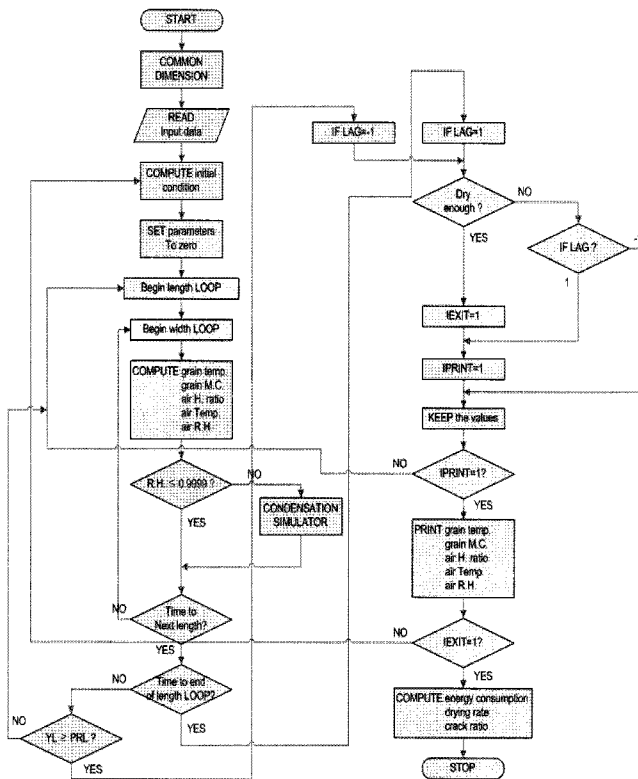


Fig. 2 Flow chart of the simulation program.

Table 1 Input and output data in the simulation program

Input data	Output data
<ul style="list-style-type: none"> • Initial moisture content • Initial grain temperature • Initial head rice yield • Grain bulk density • Final moisture content • Ambient air temperature and relative humidity • Drying air temperature • Air flow rate • Length of drying section • Length of tempering section • Grain flow rate 	<ul style="list-style-type: none"> • Number of pass • Final moisture content (% , w.b.) • Drying rate (% , w.b./h) • Fan power (kW) • Water removal rate (kg/kg) • Total energy consumption (kJ/kg-water) • Final head rice yield (%)

4. 시뮬레이션 모델의 검증

가. 건조실험

벼의 건조실험에 사용된 건조기는 제1보인 “순환식 병류형 곡물건조기 개발(I)”(Han 등, 2006)에서 사용한 것과 동일한 조건을 사용하였다.

건조조건은 표 2와 같다. 표에서와 같이 3회 건조실험을 수행하였으며, 열풍온도는 3수준(98.2~126.4℃), 송풍량은 2수준(15~30 cmm/m²)으로 하였다. 곡물유하속도는 3.0 m/h, 템퍼링 시간은 50 min/pass로 일정하게 하였다.

건조 시작 후 매 30분 간격으로 약 500 g 시료를 채취하여 함수율과 동할율을 측정하였다. 함수율이 15.3%(d.b)에 도달할 때 실험을 종료하였다. 함수율은 10g-135℃-24h 상압건조법으로 측정한 후 105℃ 건조법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하였다. 동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관 후 수작업으로 왕겨를 제거하고, 현미 250립에 대하여 동할립 판별기(DC-50, S.S EIKI, JAPAN)를 이용하여 육안으로 측정하였다.

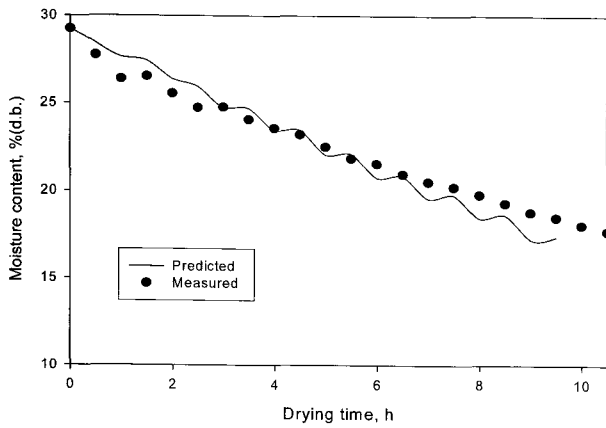
Table 2 Drying conditions for the drying tests

Test No.	Drying air temp. (℃)	Air flow rate (cmm/m ²)	Ambient air temp.(℃)	Ambient relative humidity(%)
Test-1	98.2	15.0	7.1 (5.5~8.3)	46.0 (39.0~56.0)
Test-2	113.6	15.0	4.5 (3.2~5.8)	35.0 (28.0~43.0)
Test-3	126.4	30.0	13.4 (12.6~14.2)	28.5 (23.0~33.0)

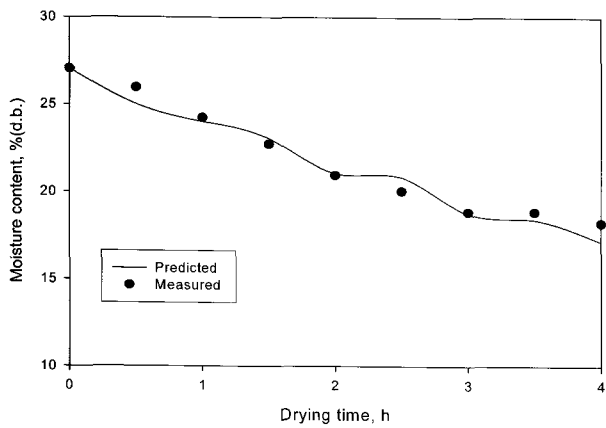
나. 실험치와 예측치의 비교

그림 3은 건조 중 함수율의 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Test-1의 경우는 건조초기에는 예측함수율이 실측함수율보다 약간 높게 나타나며, 건조후반에는 예측함수율이 약간 낮게 나타나고 있으나, 예측함수율의 RMSE는 0.82%(d.b.)로 비교적 높은 정확도를 나타내었다.

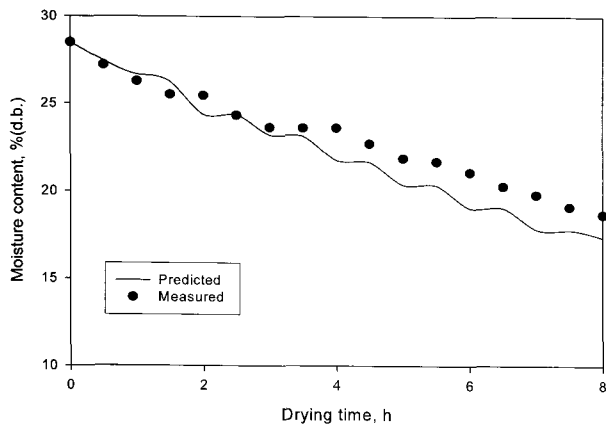
Test-2의 경우는 건조 시작 후 4시간까지는 예측치와 실험치가 잘 일치하였으며, 건조 후기에는 예측치가 실험치보다 약간 낮게 나타났으나, 예측함수율의 RMSE는 1.20%(d.b.)로 낮게 나타났었다. Test-3은 전체적으로 예측치 함수율이 실험치와 잘 일치하였으며, RMSE는 0.58%(d.b.)로 비교적 높은 정확도를 나타내었다.



(Test-1)



(Test-2)

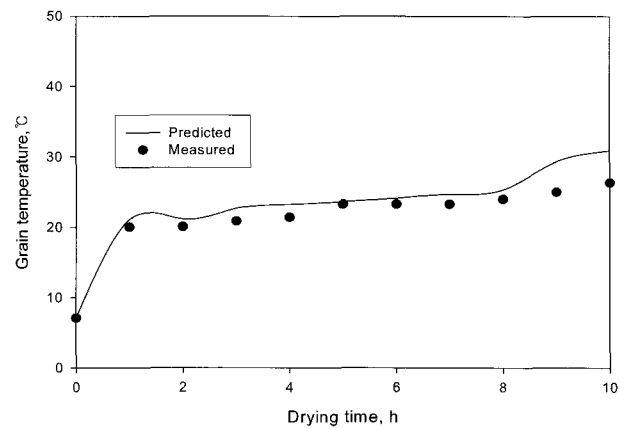


(Test-3)

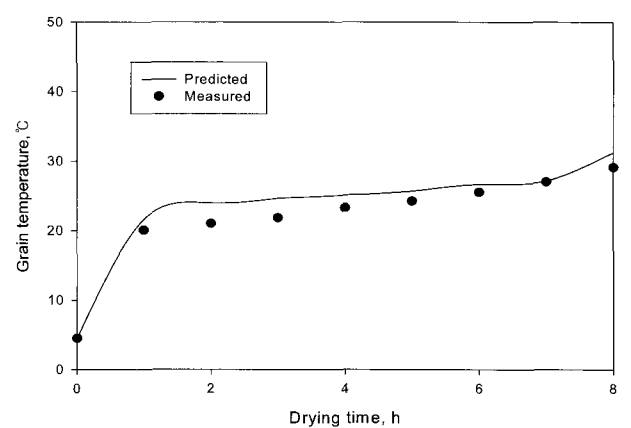
Fig. 3 Comparison of the experimental and simulated moisture contents.

표 3은 최종함수율과 건감율에 대한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하고, 예측 함수율에 대한 결정계수를 나타내었다. 실험치와 예측치간의 결정계수는 0.96~0.98로 높게 나타났다. 건감율도 예측치가 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

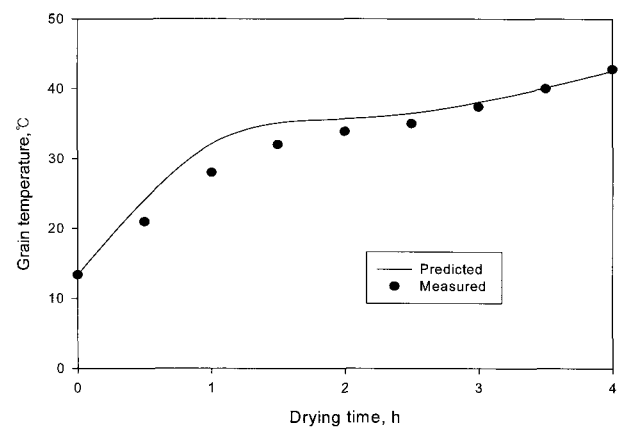
그림 4는 건조실에서 배출되는 곡물의 온도에 대한 예측치



(Test-1)



(Test-2)



(Test-3)

Fig. 4 Comparison of the experimental and simulated grain temperature at the exit of drying section.

와 실험치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 3회의 실험에서 모두 예측 곡온이 실측 곡온보다 건조실험 전체를 통하여 약간 높게 나타났다. 그러나 RMSE는 Test-1에서 2.2°C, Test-2에서 1.8°C 및 Test-3에서 3.8°C로 나타났으며, 실험치와 예측치간의 결정계수가 각각 0.8834, 0.9136 및 0.9482로 나타남으로써 예측 곡온이 실험치와 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

Table 3 Comparison of the experimental and simulated drying results

Test No.		Initial moisture content (%d.b.)	Final moisture content (%d.b.)	Drying rate (%d.b./h)	RMSE (%d.b.)	Determination coefficients (R ²)
Test-1	Measured	29.2	17.7	0.79	0.82	0.9812
	Predicted		17.4	0.82		
Test-2	Measured	28.5	18.1	0.90	1.20	0.9738
	Predicted		17.4	0.96		
Test-3	Measured	27.0	18.2	1.46	0.58	0.9688
	Predicted		17.2	1.68		

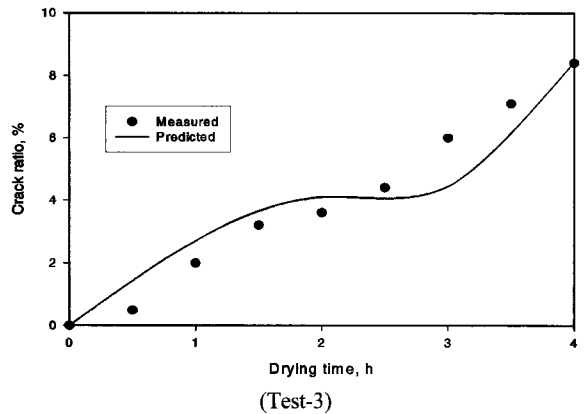
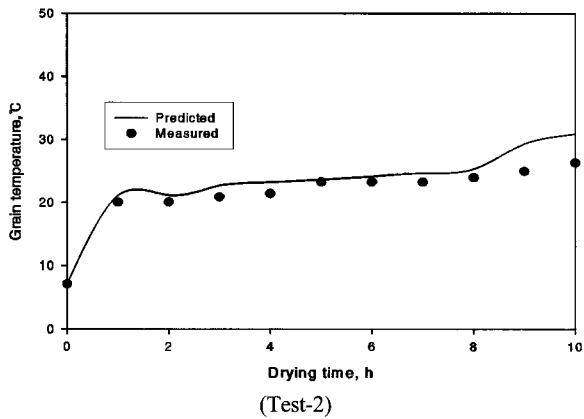
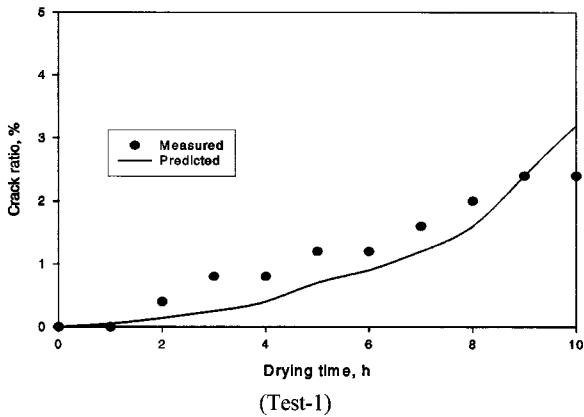


Fig. 5 Comparison of the experimental and simulated crack generation rate of rice kernels.

그림 5는 건조중의 벼의 동할율 증가에 대한 예측치와 실험치를 비교한 것이다. 예측치동할율의 RMSE는 Test-1에서 0.41%, Test-2에서 0.41% 및 Test-3에서 0.80%로 나타났다. 또한 실험치와 예측치간의 결정계수는 각각 0.8742, 0.9547, 0.9289로 나타났다. 따라서 동할율 예측모델의 정확도는 매우 높은 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론 및 요약

본 연구는 순환식 병류형 건조기에 대한 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위하여 수행되었다. 사용된 건조기는 용량 700 kg의 실험용 순환식 병류형 건조기를 사용하였다. 3회의 벼 건조실험을 수행하고, 함수율, 곡온 및 동할율에 대한 실험치와 예측치를 비교하였다.

결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 순환식 병류형 건조기의 시뮬레이션 모델에 의한 예측함수율의 RMSE는 0.58~1.2% (d.b), 결정계수는 0.9688~0.9812로 높게 나타났다.
- (2) 시뮬레이션 모델에 의한 건조실 배출부에서의 곡온에 대한 예측치의 RMSE는 1.8~3.8°C, 결정계수는 0.8834~0.9482로 예측치와 실험치가 잘 일치하였다.
- (3) 동할율에 대한 예측치의 RMSE는 0.41~0.80%, 결정계수는 0.8742~0.9547로 나타남으로서 동할율 예측모델은 건조기의 개발과 성능개선 연구에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. Baughman, G. R., H. J. Barre, and M. B. Hamdy. 1973. Experimental study and simulation of concurrent flow dryers. Trans. of the ASAE 16:890-894.

2. Baker-Arkema, F. W., Brooker, R. C. Walker, L. P. Kalchik, S. J, and A. Adnadia. 1977. concurrent flow grain drying grain quality aspects. Com quality Res. Conf. Proc., Univ. of ILL., Urbana, IL.
3. Famer, D. M. 1972. Optimization techiques for grain dryer design and analysis. Ph. D. thesis. Mich. State Univ., E Lansing, MI.
4. Han, J. W., D. H. Keum., J. G. Han., H. Kim and S. J. Hong. 2006. Development of a rice circulating concurrent-flow dryer (I)-Performance test of pilot scale dryer-. J. of the KSAM 31(4):349-354. (In Korean)
5. Han, J. W. 2006. Development and optimization of circulating concurrent-flow rice dryer. Ph.D. thesis. Sungkyunkwan University. (In Korean)
6. Keum, D. H. and J. H. Han 1986. Analysis of performance for rice circulating dryer using simulation. Sungkyunkwan Univ. 37(1):294-301. (In Korean)
7. Keum, D. H. and J. W. Hwang. 1991. A study on grain circulating concurrent flow dryer-simulation of concurrent-flow rice drying-. Sungkyunkwan Univ. 42(1): 426-449. (In Korean)
8. Keum, D. H and W. S. LEE. 1988. Simulation of rice circulating concurrent-flow dryer. J. of the KSAM 13(3):59-70. (In Korean)
9. Öholm, G. V. 1955. Method and arrangement for drying grain and the like in drying silo provided with direct heat supply. US patent No: 2, 706, 343.