

벼의 횡류 연속식 건조 모델 개발

Development of Continuous Cross-Flow Rice Drying Model

송 대 빈* 고 학 균*

정화원 정화원

D. B. Song H. K. Koh

ABSTRACT

This study was worked out to obtain fundamental data needed for developing a continuous type dryer. The drying process in a cross-flow type continuous dryer was expressed as partial differential equations, and a drying simulation model for predicting rice moisture content, rice temperature, drying air absolute humidity, drying air temperature was developed by using the finite difference method. To validate the performance of the drying simulation model, a prototype continuous dryer was constructed in this study. The size of the test dryer was one-tenth to that of a commercial continuous dryer. The difference in the outlet rice moisture content between the predicted values and the measured values was within 0.5%, that of outlet rice temperature was below 3°C, that of drying air temperature in drying bed was within 8°C and that of relative humidity of outlet drying air was big because of the different measuring point. In addition, a drying simulation model for a actual size continuous dryer with double flow was developed in this study. This drying simulation model included the rice mixing effect in the middle of drying length. The difference of outlet moisture content between the predicted and the measured values showed below 0.5% in this study.

주요용어(Key Words): 벼 건조(rice drying), 건조모델(drying model), 시뮬레이션(simulation), 연속식 건조기(continuous dryer)

1. 서 론

우리나라에서 수행되고 있는 벼의 건조방법은 천 일건조 방법과 개량곳간, 순환식 곡물건조기 및 연속식 건조기를 이용하는 기계건조 방법으로 나누어 진다. 천일건조 방법은 노동력이 많이 소요되며 과 건조와 재흡습으로 벼의 품질이 저하되거나 이물질의 혼입과 오염이 우려되며, 개량곳간은 원료의 투입과 배출에 어려움이 있고, 시설규모면에서 대량처

리가 불가능한 데다 시설의 내구성이 약한 문제점이 있다. 순환식 곡물건조기는 대규모의 시설에는 건조 비용이 많이 소요되므로 중소형 시설에 적합하다. 연속식 건조기는 대형시설에 가장 적합하여 우리나라 미곡종합처리장에서도 일부 설치되고는 있으나 아직 국산화되지 못한 실정이다. 미곡종합처리장에서 상온 통풍과 열풍 건조방식을 채택하여 벼를 건조한다. 상온 통풍방식은 열풍에 의한 미질의 손상을 방지할 수 있는 장점이 있으나 건조 소요시간

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

이 길어서 시설규모를 늘려야 하는 단점이 있다. 반면에 순환식 건조기를 사용하는 열풍 건조방식은 공정의 단속과 건축면적 그리고 반송시설 등에 따른 시설비용 투자가 크고 또한 가동효율이 떨어지는 문제점이 있다. 연속식 건조기는 순환식 건조기에 비해 건조용량이 크고, 곡물이 열풍에 노출되는 시간이 짧아서 미질의 손상을 최소화 할 수 있다. 그리고 건조속도를 임의로 조절할 수 있기 때문에 시설의 가동효율을 높일 수 있으며 건축 면적과 반송 시설을 최소화 할 수 있어 투자 비용이 절감되는 장점이 있다. 따라서 이 연구는 벼의 대량 건조에 적합한 연속식 건조기의 개발에 필요한 설계 기초자료를 얻기 위해, 연속식 건조기의 건조현상을 예측할 수 있는 건조모델을 개발하고, 실험을 통하여 그 성능을 검증하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 수학 모델의 개발

회류 연속식 건조기에서의 건조는 그림 1과 같이 곡물과 열풍이 서로 교차하면서 이루어진다. 이때 곡물층내 임의의 위치(x, y)에서 미소 면적에 대한 곡물온도 · 함수율 · 공기온도 · 절대습도를 나타내는 수식을 곡물과 건조공기의 수분과 에너지 평형에 기초하여 유도하였다.

미소체적내 곡물의 수분 평형식은 다음과 같다.

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \text{수분[유입률 - 유출률]} \cdot dt = \text{곡물 함수율} |_{t_i+\Delta t} - \text{곡물 함수율} |_{t_i}$$

미소체적내 열풍의 절대습도 평형식은 다음과 같다.

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta y} \text{수증기[유입량 - 배출량]} dy = [\text{절대습도} |_{t_i+\Delta t} - \text{절대습도} |_{t_i}]$$

미소체적내 열풍의 에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta y} \text{에너지[유입량 - 유출량]} dt = \text{공극내 공기} [\text{엔탈피} |_{t_i+\Delta t} - \text{엔탈피} |_{t_i}]$$

미소체적내 곡물의 에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta t} \text{에너지[유입량 - 유출량]} dt = \text{곡물 함유[에너지} |_{t_i+\Delta t} - \text{에너지} |_{t_i}]$$

이상 미소체적내 곡물과 열풍의 수분 · 에너지 평형식을 정리하면 연속식 건조기의 건조층에서의 건조 시뮬레이션 모델식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial M}{\partial y} = - \frac{\rho(1-\varepsilon)\gamma_{sw}}{G_p}$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{G_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial y}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{ha(T-\theta)}{G_a C_a + G_a C_v W}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{ha(T-\theta)}{G_p(C_p + MC_w)} - \frac{h_{fg} + C_v(T-\theta)}{G_p(C_p + MC_w)} G_a \frac{\partial W}{\partial x}$$

여기서,

- M = 곡물 함수율(decimal, d.b.)
- T = 공기온도(°C)
- ρ = 곡물 진밀도(kg-곡물/m³)
- γ_{sw} = 수분 전달률(kg-수분/hr · kg-곡물)
- h = 대류 열전달 계수(kJ/m² · °C · hr)
- G_p = 곡물질량유량(kg-곡물/hr · m²)
- C_p = 건곡물 비열(kJ/kg · °C)
- C_a = 건공기 비열(kJ/kg · °C)
- W = 절대습도(kg-수분/kg-건공기)
- θ = 곡물온도(°C)
- ε = 공극률(decimal)
- a = 곡물 표면적비(m²/m³)
- h_{fg} = 수분증발잠열(kJ/kg)
- G_a = 송풍량(kg-공기/hr · m²)
- C_w = 물의 비열(kJ/kg · °C)
- C_v = 수증기 비열(kJ/kg · °C)

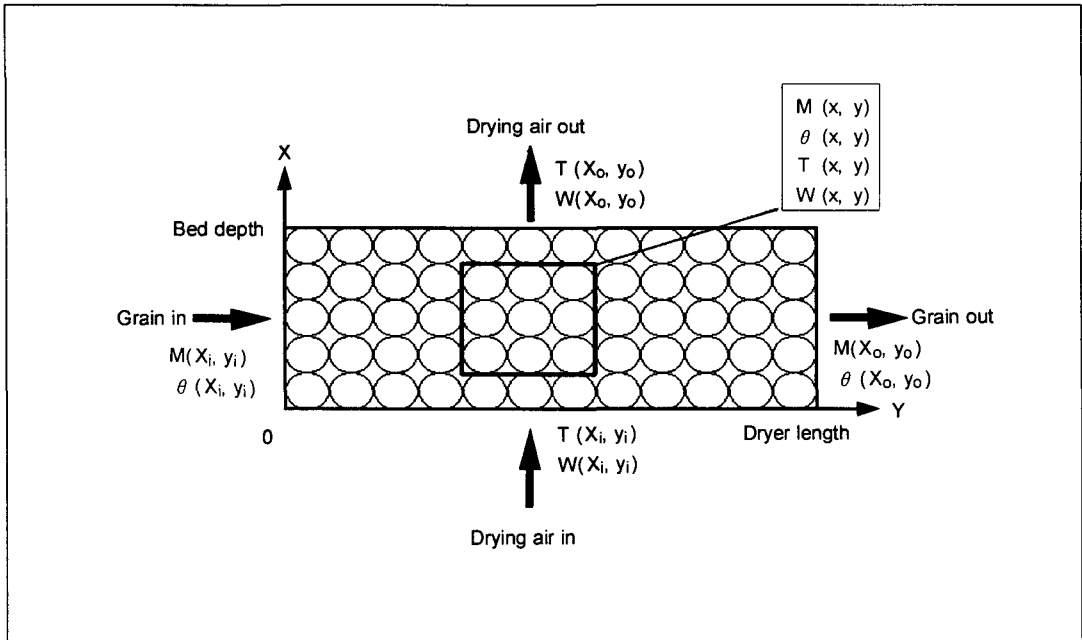


Fig. 1 Schematic diagram of continuous drying bed.

Table 1 Comparison of continuous drying models

Description	Model 1	Model 2	Model 3
Thin layer equation	Wang	Wang	Agrawal and Singh
Equilibrium moisture content equation	Chung-Pfost	Zuritz	Henderson and Thompson
Latent heat of vaporization equation	Chung-Pfost	Chung-Pfost	Chung-Pfost

나. 수치해

앞서 정리된 시뮬레이션 모델식의 해를 Rosenberg(1977)가 제시한 유한 차분법으로 구하였다. 해를 구하기 위해 사용된 박층 건조방정식·평균 함수율식·수분 증발 잠열식을 각 모델별로 표 1과 같이 구분하여 적용하였다. 수치해를 계산하기 위한 컴퓨터 프로그램은 C언어를 사용하여 작성 하였으며, 그 흐름도는 그림 2와 같다.

다. 실험장치

실험을 위해 설계, 제작된 연속식 건조기는 다공

철판 위로 곡물이 이송되면서 건조가 이루어지는 방식으로, 건조층의 길이는 0.7m, 퇴적고는 0.235m, 폭은 0.45m 이다. 벼의 이송장치는 체인컨베이어 형식을 기본 구조로 하여 이송중에 퇴적고가 일정하게 유지되도록 흐름판을 설치하였고, 이송속도를 조절할 수 있는 인버터를 사용하였다. 외부공기 가열을 위해 송풍팬 흡입구에 석유 히터를 설치하였으며, 미세 온도 조절을 위해 송풍팬 출구측에 2쌍의 전기 저항식 카트리지 히터를 사용하였다. 외기온도·열풍온도·배출 열풍온도·배출 벼 온도의 측정은 축온저항식(Pt-100Ω) 열전대를 사용하였으며, 전기저항식 습도계로 외부공기와 배출열풍의 상대습도를 측정하였다. 실험중에 온도·이송속도·상대습도의

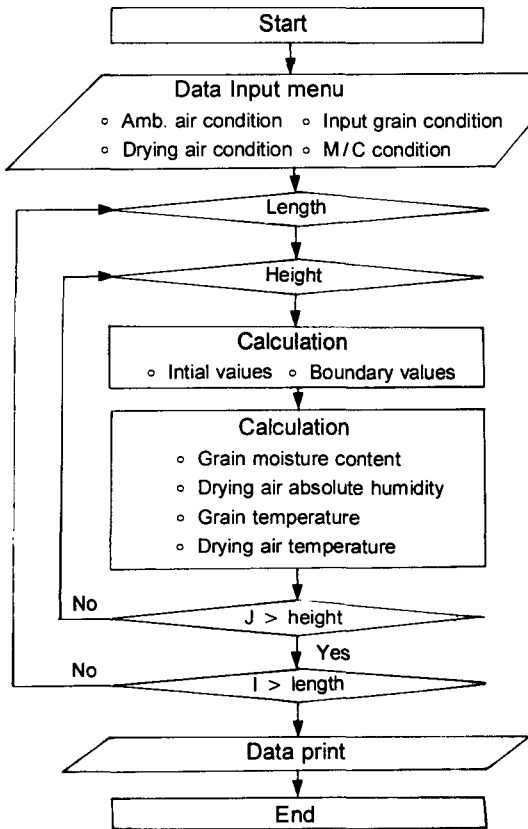
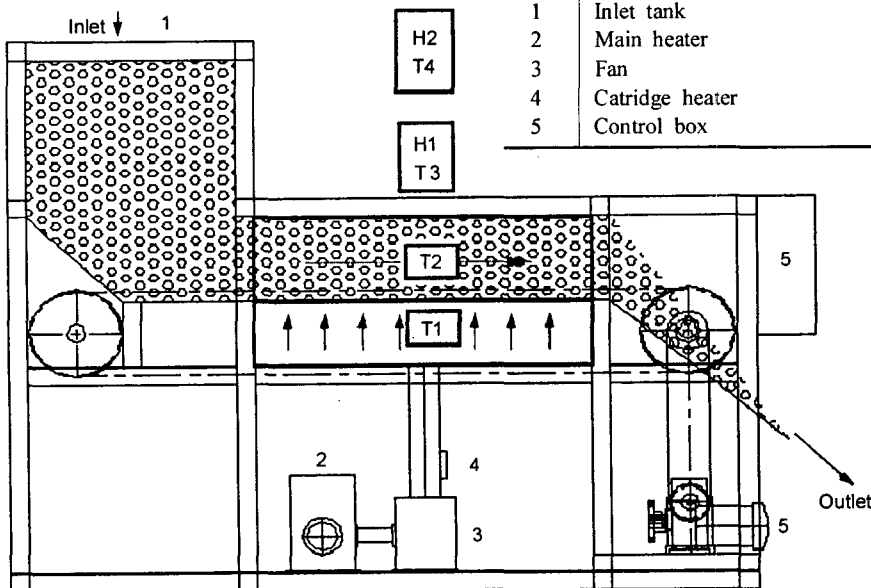


Fig. 2 Flow chart of computer program for the continuous drying model.

Table 2 Specification of experimental apparatus

Holding capacity (kg)	45
Air flow rate (m ³ /s · ton)	2.5
Conveying speed (hr/pass)	0.5 (variable)
Drying air temperature	45 (variable)
Drying length (m)	0.7
Drying width (m)	0.45
Drying depth (m)	0.235



T1	Temp. sensor for inlet drying air
T2	Temp. sensor for drying air in drying bed
T3	Temp. sensor for outlet drying air
T4	Temp. sensor for ambient air
H1	R. H. sensor for outlet drying air
H2	R. H. sensor for ambient air
1	Inlet tank
2	Main heater
3	Fan
4	Catridge heater
5	Control box

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

측정결과는 매 30초 마다 컴퓨터로 자동 수집되도록 구성하였다. 표 2는 실험장치의 상세한 제원이며, 구성도는 그림 3과 같다.

라. 실험재료 및 방법

1) 실험재료

충북 진천군 이월면에서 1996년 9월 15일에 수확한 조생종 벼 2톤을 구입하여 사용하였으며, 실험기간중에 자연 건조를 방지하기 위해 저온 저장고에 8℃로 보관하면서 사용하였다.

2) 실험방법

가) 함수율 측정

벼의 함수율은 전기오븐으로 건조온도 135 ± 3℃에서 24시간 건조하여 시료의 무게를 측정한 후 이를 함수율로 환산하였다.

나) 온도 측정

건조전과 건조후의 벼 온도는 플라스틱 용기에 원료를 채우고 여기에 Pt-100Ω 열전대를 삽입한 후 측정되는 온도 중 최고치를 원료의 온도로 하였다. 공기 온도는 Pt-100Ω 열전대를 사용하여 측정하였으며, 외부 공기온도(T4)는 실험장치 외부에 노출된 상태로, 건조층내의 열풍온도(T2)는 건조 시점에서 0.35m, 건조층 바닥면에서 0.12m 위치에서 측정하였다.

다) 상대습도 측정

외부공기(H2)와 배출 열풍의 상대습도(H1)는 전기저항식 상대습도계를 사용하여 측정하였으며, 선펽장식 온습도계와 습구온도계를 사용하여 보정하였다. 외부공기의 상대습도는 실험장치의 외부에 노출된 상태로 설치하여 측정하였고, 배출공기의 상대습도는 건조 시작점에서 0.35m, 건조층 상부 약 5cm 위치에서 측정하였다.

라) 건조 소요 에너지 측정

건조실험 전후에 석유히터의 연료탱크 중량을 측

정하여 연료 소비량을 측정하였으며, 적산 전력계를 사용하여 송풍기와 이송장치의 소비 전력량을 측정하였다.

마) 건조 실험

건조 모델의 검증과 연속식 건조기에서의 건조 특성을 파악하기 위하여 건조 조건을 이송속도 3수준, 열풍온도 3수준으로 하여 건조 실험을 실시하였다. 상세한 실험조건은 표 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

가. 벼의 건조후 함수율

각 실험조건에 대한 건조 함수율의 실측치와 건조 모델에 의한 예측치를 그림 4에 나타냈다. 그림 4에서 건조 모델 1과 2의 잔차는 실험구 5-2를 제외하고는 0.5%(w.b.)이하로 나타났으며, 건조 모델 3의 경우는 5개의 실험구에서 1%(w.b.)이상의 비교적 큰 잔차를 나타냈다. 건조 모델 1과 2는 잔차가 전 실험구에 걸쳐서 비교적 균일하게 분포하였고, 그 최대값은 각각 0.84, 0.78%(w.b.)로 나타났다. 이와같은 결과는 실험장치의 작동 오차(입력값과 실제 작동값과의 차이) 및 시료 채취시 위치에 대한 오차 그리고 동일 건조 길이에서 퇴적고에 따른 함수율 분포가 1%(w.b.)이상 차이를 보이는 점을 감안할 때, 실측치와 거의 일치하는 것으로 볼 수 있으며, 함수율 예측 모델로 매우 적합하다고 판단되었다. 건조 모델 3의 경우는 잔차 최대값이 1.45%(w.b.)이고 5개의 실험구에서 1%(w.b.)이상으로 비교적 크게 나타났다. 따라서 건조 모델 3의 경우는 잔차도에서 함수율 예측 모델로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

나. 건조후 벼의 온도

각 실험조건에 대한 벼의 건조후 온도 실측치와 건조모델에 의한 예측치 그리고 실측치를 그림 5에 나타냈다. 그림 5에서 실측치에 대한 예측치의 잔차는 건조 모델 1과 2의 경우 3℃이하로 나타났으며,

Table 3 Experimental condition of continuous rice drying

Exp. No.	Airflow rate (m ³ /s · ton)	Mov. speed (hr/pass)	Drying air temp. (°C)	Amb. air temp. (°C)	Amb. air RH. (%)	Input grain temp. (°C)	Input MC (%)
1-1	2.5	0.554	45.49	22.94	66	24.1	22.44
1-2	2.5	0.554	45.28	23.88	78	33.1	19.30
1-3	2.5	0.554	45.17	21.17	71.6	34.7	17.03
1-4	2.5	0.554	44.77	20.84	73	35.7	14.84
2-1	2.5	0.554	54.98	22.22	49	24.2	23.70
2-2	2.5	0.554	54.28	22.93	48	38.2	18.62
12-1	2.5	0.554	39.90	22.05	49	20.0	22.06
12-2	2.5	0.554	40.30	21.31	49	30.3	18.82
12-3	2.5	0.554	40.15	19.45	51	32.8	16.21
5-1	2.5	0.675	44.85	24.21	66	15.5	22.49
5-2	2.5	0.675	45.02	23.73	62	33.8	18.48
6-1	2.5	0.335	45.17	23.64	70	14.5	22.42
6-2	2.5	0.335	44.97	24.21	67	32.5	19.98
6-3	2.5	0.335	45.00	23.40	75	34.3	17.92
7-1	2.5	0.554	44.81	21.98	74	18.8	25.16
7-2	2.5	0.554	44.93	23.20	77	23.1	21.16
7-3	2.5	0.554	44.93	23.00	75	23.2	17.86

* MC: moisture content on wet basis

* RH: relative humidity

건조 모델 3의 경우는 5°C이하로 건조 모델 1과 2보다는 약간 높게 나타났다. 이상의 잔차분석의 결과 건조 모델 1과 2는 실측치와 거의 일치하는 것으로 볼 수 있어, 배출 곡물의 온도예측 모델로 매우 적합한 것으로 판단되었다.

특히 벼의 건조후 온도는 미질과 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 일본에서는 열풍 건조시 벼의 건조후 온도가 35°C 이상이 되지 않도록 규정하고 있다(외기 온도가 높은 경우에는 40°C). 벼의 품질을 고려하여 온도 35~40°C를 기준으로 실측치를 비교하면, 열풍 온도가 40°C일 때는 약 36°C, 45°C일 때는 약 39°C, 그리고 55°C일 때는 약 46°C로 비교적 높게 나타났다. 벼의 온도를 측정하는 방법과 조건이 명확하지 않아서 직접적인 비교가 어렵지만, 건

조기로 건조할 때 열풍의 온도를 55°C 이하로 유지하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

다. 건조층내 열풍의 온도

건조 시작점에서의 중간 위치와 바닥면에서의 중간 위치에서 열풍 온도의 실측치와 각 건조 모델별 예측치를 비교한 결과는 그림 6과 같다. 잔차의 최대값은 건조 모델 1의 경우 7.32°C, 건조모델 2의 경우 7.18°C, 건조 모델 3의 경우는 8.18°C로 대부분 양의 방향으로 비교적 크게 나타났다. 잔차분석의 결과 각 건조 모델 모두 실측치와 비교적 큰 차이를 보였다.

앞서 살펴본 벼의 함수율과 건조 후 온도에 비해

열풍 온도에서 예측치와 실측치와 차이가 비교적 크게 나타난 이유는 공기의 비열이 벼와 수분에 비해 상대적으로 적어서 주위 환경변화의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 판단된다.

라. 배출 열풍의 상대습도

건조 시작점에서 중간 그리고 건조층 상부에서 약 5cm 위치에 습도계를 설치하여 측정한 실측치와 각 건조모델의 예측치를 그림 7에 나타냈다. 잔차는 각 모델 모두 실측치와 상당한 차이를 보여주고 있다. 특히 건조 모델 3의 경우는 잔차의 최대값이 45.97로 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 이러한 이유는 건조 모델의 예측치 위치와 습도계의 부착위치, 즉 측정위치가 서로 다르기 때문에 실측치 값이 주위공기와 혼합되어 생긴 것으로 판단되었다. 특히 각 실험구 별로 처음 건조가 진행되는 경우는 건조층 상부의 외기 온도가 배출 공기와 접촉하여 수분이 응축

되어 측정값이 99% 이상으로 나타났다.

마. 건조 소요 에너지

표 4에 건조 소요 에너지의 실측치·예측치·수분 증발량당 소요 에너지를 비교하여 나타냈다. 평균 건조 소요 에너지의 실측치는 96,094 kJ로 예측치 59,162 kJ보다 약 1.6배 높게 나타났다. 그리고 수분 증발량에 대한 평균 건조 소요 에너지의 실측치는 9,419 kJ/kg-water 이었고, 예측치는 5,808 kJ/kg-water로 나타났다. 이처럼 실측치와 예측치의 차이가 크게 나타난 이유는 건조실험에 사용된 실험장치의 보온이 불완전하여 외부로의 열 손실이 많았기 때문인 것으로 판단되었다. 실측된 수분 증발량당 평균 소요 에너지 9,419 kJ/kg-water는 일본에서 사용중인 건조기의 평균치인 7,568 kJ/kg-water보다 약 1.2배가 높았다.

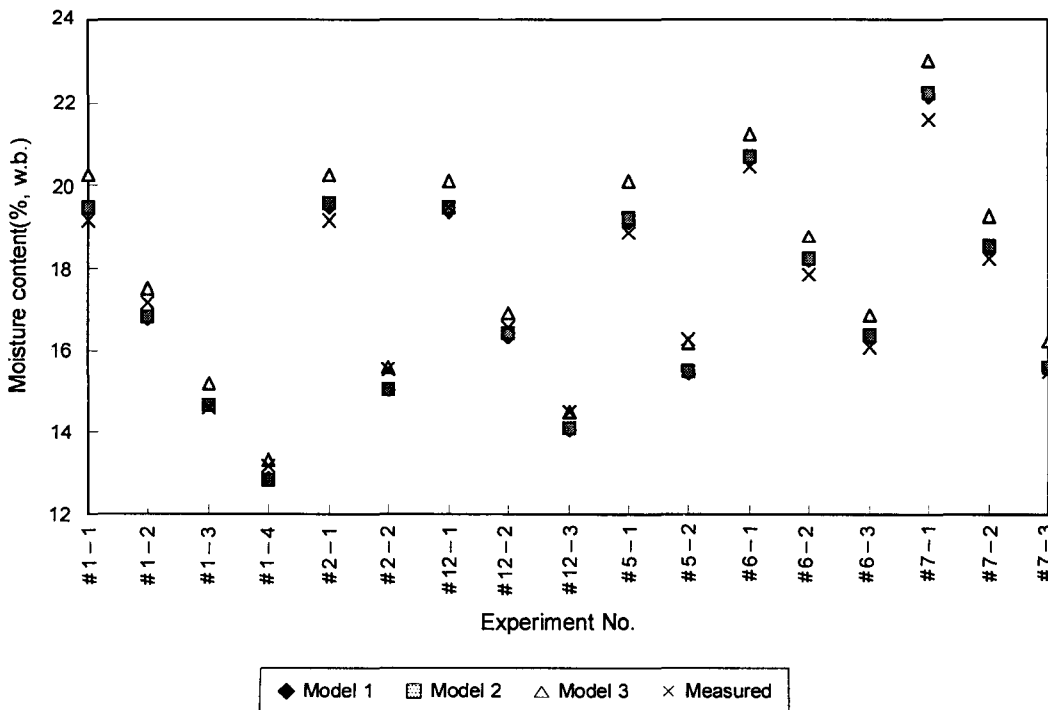


Fig. 4 Comparison of the predicted and measured outlet moisture content of rice.

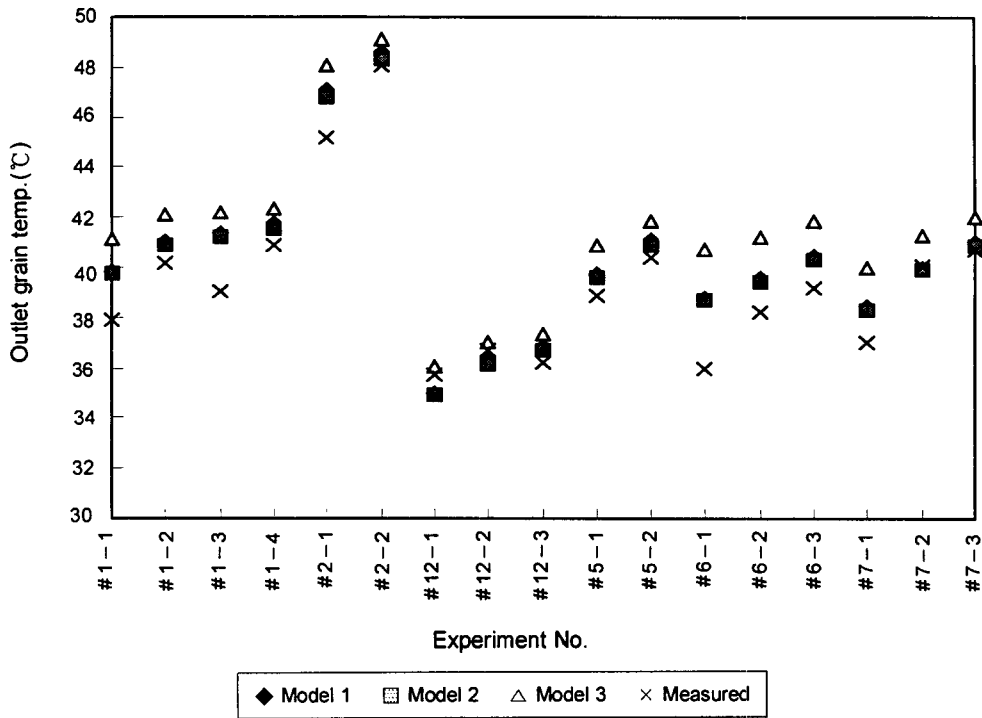


Fig. 5 Comparison of the predicted and measured outlet rice temperature of rice.

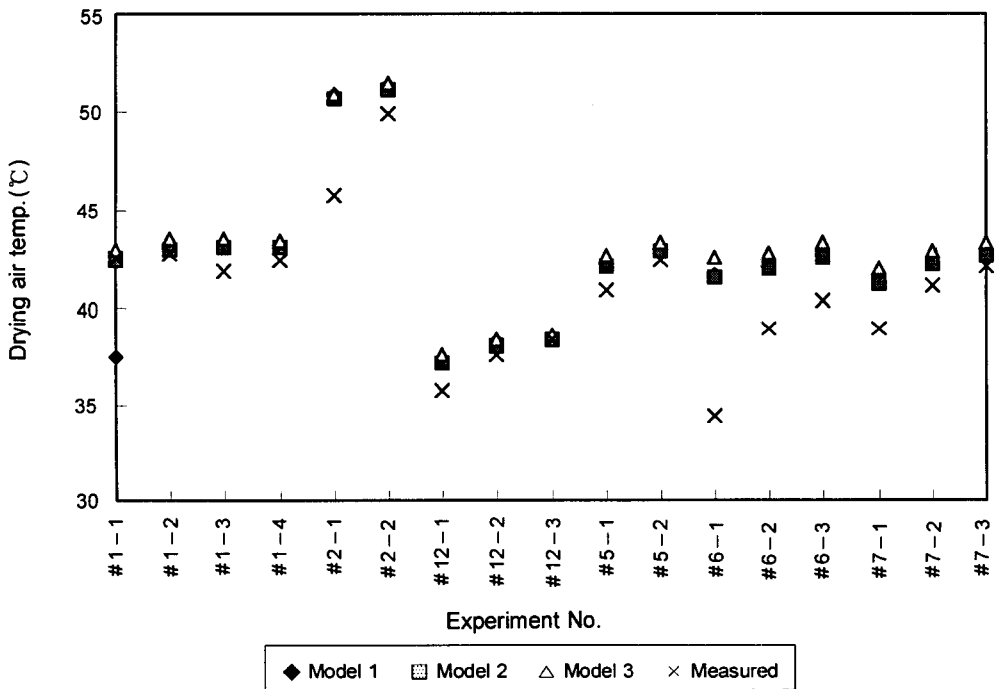


Fig. 6 Comparison of the predicted and measured drying air temperature of rice.

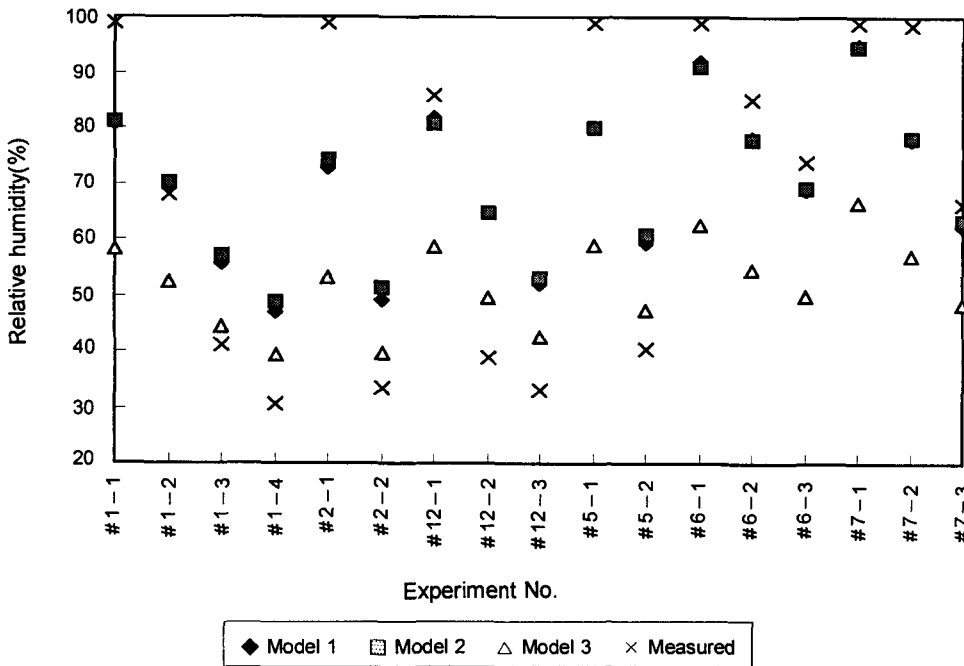


Fig. 7 Comparison of the predicted and measured outlet drying air relative humidity of rice.

Table 4 Comparison of energy consumption for the measured vs. predicted values.

Exp. No.	Measured energy consumption (kJ)	Predicted energy consumption (kJ)	Weight of water removed (kg)	Energy consumption (kJ/kg-water)	
				Measured	Predicted
# 1	148,748	89,450	17.70	8,403	5,053
# 2	95,110	58,032	9.61	9,896	6,038
# 12	83,917	54,422	8.77	9,568	6,205
# 5	83,486	50,889	7.39	11,297	6,886
# 6	63,372	37,893	7.54	8,404	5,025
# 7	101,934	64,290	11.39	8,949	5,644

4. 요약 및 결론

이 연구는 벼 건조에 적합한 연속식 건조기 개발에 필요한 기초자료를 얻기 위해 건조현상을 예측하는 건조 시뮬레이션 모델을 개발하고자 수행되었다. 개발된 연속식 건조 시뮬레이션 모델의 성능을 실험을 통해 검증하였고, 실제 사용중인 건조기의 건조

성능을 기초로 건조부 크기에 따른 성능을 검증하였다. 이상 연구결과를 항목별로 요약하면 다음과 같다.

1) 벼의 건조후 함수율을 비교한 결과, 중립종 벼의 박층건조 방정식과 Chung-Pfost의 평형 함수율식을 사용한 모델 1과 중립종 벼의 박층건조 방정식과 Zuritz의 평형 함수율식을 사용한 모델 2는 실측치와

의 차이가 대부분 0.5%(w.b.) 이내로 나타났다. 단립 중 벼의 박층건조 방정식을 사용한 건조 모델 3의 경우는 실측치와 1%(w.b.) 이상의 비교적 큰 차이를 나타내었다.

2) 벼의 배출 온도는 모델 1과 2의 경우 실측치와의 차이가 3℃ 이하로 나타났고, 모델 3의 경우는 실측치와 5℃ 정도의 차이를 보였다.

3) 건조층내 열풍의 온도는 모델 1, 2, 3 모두 실측치와 8℃ 정도의 비교적 큰 차이를 나타냈다. 이러한 이유는 공기의 비열이 벼와 수분에 비해 상대적으로 작기 때문에 주위환경에 쉽게 영향을 받았기 때문인 것으로 판단되었다.

4) 배출 열풍의 상대습도는 건조층 표면에서 5cm 정도 위에서 측정하였기 때문에 배출공기가 주위 공기와 혼합되어 예측치와 매우 큰 차이를 보였다.

5) 건조 소요 에너지의 실측치는 96,094 kJ로 예측치 59,162 kJ 보다 약 1.6배 높게 나타났으며, 수분 증발량당 건조 소요 에너지는 실측치 9,419 kJ/kg-water, 예측치 5,808 kJ/kg-water로 나타났다. 일본에서 사용중인 건조기의 수분 증발량당 평균 건조 소요 에너지 7,568 kJ/kg-water과 비교할 때 실측치 9,419 kJ/kg-water는 일본의 경우보다 약 1.2배 높게 나타났다.

5. 참고 문헌

1. 고헌균 등. 1995. 미곡종합처리시설. 문운당.
2. 고헌균, 김용현, 송대빈, 박재복. 1991. 태양열 건조 시스템에 관한 실험적연구 (II) - 벼의 태양열 건조특성. 태양에너지 11(3):21-30.
3. 금동혁. 1986. 벼 건조과정 분석에 필요한 자료 및 관련식. 한국농업기계학회지. 11(2):92-102.
4. 김만수, 박종인. 1988. 함수율이 곡물의 크기, 표면적 및 체적에 미치는 영향. 한국농업기계학회지 13(1):1-10.

5. 조용진. 1991. 고추의 건조과정 모형화 및 최적화에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
6. 全農施設・資材部. 1992. 共乾施設の展開に關する研究.
7. 全農施設・資材部. 1986. 共乾施設のてびき(I, II, III).
8. 山下律也. 1985. 穀物乾燥施設診斷. 農業機械學會選書 1.
9. Agrawal, T. C. and R. P. Singh. 1977. Thin-layer drying studies on short-grain rough rice. ASAE paper No. 77-3531. ASAE, St. Joseph, MI.
10. ASAE. 1996. Yearbook. 43th ed. Am. Soc. Agr. Eng., St. Joseph, MI.
11. Bakker-Arkema, F. W., D. B. Brooker and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. The AVI Publ. Co., Inc.
12. Laws, N. and J. L. Parry. 1983. Mathematical modeling of heat and mass transfer in agricultural grain drying. Proc. R. Soc. Lond. A, 385:169-187.
13. Luikov, A. V. 1966. Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies. New York. Pergamen.
14. Morita, T. and R. P. Singh. 1979. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. Trans. ASAE 22(3):630-636.
15. Othmer, D. F. 1940. Correlating vapor pressure and latent heat data. Ind. Eng. Chem. 32(6):841-856.
16. Steffe, J. F. and R. P. Singh. 1980. Liquid diffusivity of rough rice components. Trans. ASAE 23(3):767-782.
17. Von Rosenberg, D. U., R. P. Chamgers, and G. A. Swan. 1977. Numerical solution of surface controlled fixed-bed adsorption. Ind. Eng. Chem., Fundam., 16(1).