

벼의 횡류 연속식 건조 모델 개발과 퍼지논리를  
이용한 건조 속도 제어  
Development of Continuous Cross-Flow Rice Drying  
Model and Drying Speed Control System  
Using Fuzzy Logic

송 대 빈*	고 학 균*	조 성 인*
정회원	정회원	정회원
D. B. Song	H. K. Koh	S. I. Cho

## 1. 서론

우리나라에서 수행되고 있는 벼의 건조방법은 천일건조 방법과 개량곳간, 순환식 곡물건조기와 연속식 건조기를 이용하는 기계건조 방법으로 나누어 진다. 천일건조방법은 과건조로 벼의 품질이 저하되거나 이물질의 혼입과 오염이 우려되며, 개량곳간은 원료의 투입과 배출에 어려움이 있고, 시설규모면에서 대량처리가 불가능한데다 시설의 내구성이 약한 문제점이 있다. 순환식 곡물건조기는 대규모의 시설에는 건조비용이 많이 소요되므로 중소형 시설에 적합하다. 연속식 건조기는 대형시설에 가장 적합하여 우리나라 미곡종합처리장에서도 일부 설치되고는 있으나 아직 국산화되지 못한 실정이다. 미곡종합처리장에서는 상온통풍과 열풍건조방식을 혼합하여 벼를 건조한다. 상온통풍방식은 열풍에 의한 미질의 손상을 방지할 수 있는 장점이 있으나 건조소요시간이 길어서 시설규모를 늘려야하는 단점이 있다. 반면에 순환식 건조기를 사용하는 열풍건조방식은 공정의 단속과 건축면적 그리고 반송시설 등에 따른 시설비용 투자가 크고 또한 가동효율이 떨어지는 문제점이 있다. 연속식건조기는 순환식건조기에 비해 건조용량이 크고, 곡물이 열풍에 노출되는 시간이 짧아서 미질의 손상을 최소화할 수 있다. 그리고 건조속도를 임의로 조절할 수 있기 때문에 시설의 가동효율을 높일 수 있으며 건축면적과 반송시설을 최소화할 수 있어 투자비용이 절감되는 장점이 있다. 따라서 이 연구는 벼의 대량 건조에 적합한 연속식건조기의 개발에 필요한 설계기초자료를 얻기 위해 수행되었으며, 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

① 연속식건조기의 건조현상을 예측할 수 있는 건조모델을 개발하고, 실험을 통하여 그 성능을 검증한다.

② 검증된 건조모델과 퍼지논리를 이용하여 건조기의 건조속도 제어장치를 개발하고, 실험을 통하여 그 성능을 검증한다.

---

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

## 2. 재료 및 방법

### 가. 건조 시뮬레이션 모델 및 수치해

곡물층내 임의의 미소면적에 대한 곡물온도 · 함수율 · 공기온도 · 절대습도를 나타내는 수식을 곡물과 건조공기의 수분과 에너지 평형에 기초하여 유도하였으며, 유한차분법을 적용하여 수식의 해를 구하였다. 계산에 사용된 수식에 따라 건조 모델을 표 1과 같이 3가지로 분류하여 그 성능을 비교하고자 하였다. 건조 모델 수식은 다음과 같고 수치해를 구하는 컴퓨터 프로그램의 흐름도는 그림 1과 같다.

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

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

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

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

여기서, M=곡물 함수율(decimal, d.b.)

T=공기온도(°C)

$\rho$ =곡물 진밀도(kg-곡물/m<sup>3</sup>)

$\gamma_{sw}$ =수분 전달률(kg-수분/hr · kg-곡물)

h=대류 열전달 계수(kJ/m<sup>2</sup> · °C · hr)

$G_p$ =곡물질량유량(kg-곡물/hr · m<sup>2</sup>)

$C_p$ =건곡물 비열(kJ/kg · °C)

$C_a$ =건공기 비열(kJ/kg · °C)

W=절대습도(kg-수분/kg-건공기)

$\theta$ =곡물온도(°C)

$\varepsilon$ =공극률(decimal)

a=곡물 표면적비(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)

$h_{fg}$ =수분증발잠열(kJ/kg)

$G_a$ =송풍량(kg-공기/hr · m<sup>2</sup>)

$C_w$ =물의 비열(kJ/kg · °C)

$C_v$ =수증기 비열(kJ/kg · °C)

### 나. 건조 속도 제어

건조후 함수율을 일정하게 유지하기 위해 입력변수를 투입 함수율 · 함수율차, 출력변수를 열풍온도 · 이송속도로 하는 건조기 자동 제어 알고리즘을 퍼지 규칙을 사용하여 구성하였다. 각 입력변수와 출력변수의 귀속도 함수는 그림 2, 3, 4, 5와 같고 제어장치의 알고리즘은 그림 6과 같다.

### 다. 실험장치

실험을 위해 설계, 제작된 연속식 건조기는 다공철판 위로 곡물이 이송되면서 건조가 이루어지는 방식으로, 건조층의 길이는 0.7m, 퇴적고는 0.235m, 폭은 0.45m 이다. 벼의 이송 장치는 체인콘베이어 형식을 기본구조로 하여 이송중에 퇴적고가 일정하게 유지되도록 흐름 판을 설치하였고, 이송속도를 조절할 수 있는 인버터를 사용하였다. 외부공기 가열을 위해 송풍팬 흡입구에 석유 히터를 설치하였으며, 미세 온도 조절을 위해 송풍팬 출구측에 2쌍의 전기저항식 카트리지 히터를 사용하였다. 외기온도 · 열풍온도 · 배출 열풍온도 · 배출 벼 온

도의 측정은 축온저항식(Pt-100 $\Omega$ ) 열전대를 사용하였으며, 전기저항식 습도계로 외부공기와 배출열풍의 상대습도를 측정하였다. 실험중에 온도·이송속도·상대습도의 측정결과는 매 30초 마다 컴퓨터로 자동 수집 되도록 구성하였다. 구성도는 그림 7과 같다.

#### 라. 실험재료 및 방법

##### 1. 실험재료

충북 진천군 이월면에서 1996년 9월 15일에 수확한 조생종 벼 2톤을 구입하여 사용하였으며, 실험기간중에 자연건조를 방지하기 위해 저온저장고에 8 $^{\circ}\text{C}$ 로 보관하면서 사용하였다.

##### 2. 실험방법

1) 함수율 측정 : 벼의 수분함량은 전기오븐으로 건조온도 135 $\pm$ 3 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 건조하여 시료의 무게를 측정된 후 이를 함수율로 환산하였다. 건조속도제어를 위한 실험에서는 투입 함수율이 프로그램 구동을 위한 초기자료이기 때문에 단립수분 측정장치를 사용하여 함수율을 측정하였다.

2) 온도 측정 : 건조전과 건조후의 벼 온도는 플라스틱 용기에 원료를 채우고 여기에 Pt-100 $\Omega$  열전대를 삽입한 후 측정되는 온도중 최고치를 원료의 온도로 하였다. 공기 온도는 Pt-100 $\Omega$  열전대를 사용하여 측정하였으며, 외부 공기온도(T4)는 실험장치 외부에 노출된 상태로, 건조층내의 열풍온도(T2)는 건조시점에서 0.35m, 건조층 바닥면에서 0.12m 위치에서 측정하였다.

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

4) 건조 소요 에너지 측정 : 건조실험전후에 석유히터의 연료탱크 중량을 측정하여 연료 소비량을 측정하였으며, 적산전력계를 사용하여 송풍기와 이송장치의 전력소비량을 측정하였다.

5) 건조 및 건조 속도 제어 실험 : 건조 모델의 검증과 연속식 건조기에서의 건조특성을 파악하기 위하여 건조조건을 이송속도 3수준, 열풍온도 3수준으로 하여 건조실험을 실시하였다. 건조속도제어 실험은 투입 함수율이 높은 경우, 낮은 경우, 동일한 경우의 3수준으로 실험을 실시하였다. 상세한 실험조건은 표 2, 3과 같다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1) 벼의 건조후 함수율

각 실험조건에 대한 건조함수율의 실측치와 건조 모델에 의한 예측치 그리고 실측치에 대한 잔차는 표 4와 같다. 표 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 분

포하였고, 그 최대값은 각각 0.84, 0.78%(w.b.)로 나타났다. 이와같은 결과는 실험장치의 작동 오차 및 시료의 샘플링 오차 그리고 건조층의 퇴적고에 따른 함수율 분포가 1%(w.b.)이상 차이를 보이는 점을 감안할 때, 실측치와 거의 일치 하는 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 않는 것으로 판단되었다.

## 2) 건조후 벼의 온도

각 실험조건에 대한 벼의 건조후 온도 실측치와 건조모델에 의한 예측치 그리고 실측치에 대한 잔차는 표 5과 같다. 표 5에서 실측치에 대한 예측치의 잔차는 건조 모델 1과 2의 경우 3℃이하로 나타났으며, 건조 모델 3의 경우는 5℃이하로 건조 모델 1과 2보다는 약간 높게 나타났다. 이상의 잔차분석의 결과 건조 모델 1과 2는 실측치와 거의 일치하는 것으로 볼 수 있어, 배출곡물의 온도예측 모델로 매우 적합한 것으로 판단되었다.

특히 벼의 건조후 온도는 미질과 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 일본에서는 열풍건조시 벼의 건조후 온도가 35℃ 이상이 되지 않도록 규정하고 있다(외기온도가 높은 경우에는 40℃). 벼의 품질을 고려하여 온도 35 ~ 40℃를 기준으로 실측치를 비교하면, 열풍온도가 40℃일 때는 약 36℃, 45℃일 때는 약 39℃, 그리고 55℃일 때는 약 46℃로 비교적 높게 나타났다. 벼의 온도를 측정하는 방법과 조건이 명확하지 않아서 직접적인 비교가 어렵지만, 건조기로 건조할 때 열풍의 온도를 55℃ 이하로 유지하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

## 3) 건조층내 열풍의 온도

건조 시작점에서 중간위치와 바닥면에서 중간위치에서 열풍온도의 실측치와 각 건조 모델별 예측치를 비교한 결과는 표 6과 같다. 잔차의 최대값은 건조 모델 1의 경우 7.32℃, 건조 모델 2의 경우 7.18℃, 건조 모델 3의 경우는 8.18℃로 대부분 양의 방향으로 비교적 크게 나타났다. 잔차분석의 결과 각 건조 모델 모두 실측치와 비교적 큰 차이를 보였다.

앞서 살펴본 벼의 함수율과 건조후 온도에 비해 열풍온도에서 예측치와 실측치와 차이가 비교적 크게 나타난 이유는 공기의 비열이 벼와 수분에 비해 상대적으로 적어서 주위 환경 변화의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 판단된다.

## 4) 배출 열풍의 상대습도

건조시작점에서 중간 그리고 건조층 상부에서 약 5cm 위치에 습도계를 설치하여 측정된 실측치와 각 건조모델의 예측치, 그리고 실측치에 대한 잔차를 각 실험조건별로 표 7에 나타났다. 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 실험구별로 처음 건조가 진행되는 경우는 건조층 상부의 외기온도가 배출공기와 접촉하여 수분이 응축되어 측정값이 99% 이상으로 나타났다.

#### 5) 건조 소요 에너지

표 8에 건조 소요 에너지의 실측치·예측치·수분 증발량당 소요 에너지를 비교하여 나타냈다. 평균 건조 소요 에너지의 실측치는 96094kJ로 예측치 59162kJ보다 약 1.6배 높게 나타났다. 그리고 수분 증발량에 대한 평균 건조 소요 에너지의 실측치는 9419kJ/kg-water이었고, 예측치는 5808kJ/kg-water로 나타났다. 이처럼 실측치와 예측치의 차이가 크게 나타난 이유는 건조실험에 사용된 실험장치의 보온이 불완전하여 외부로의 열손실이 많았기 때문인 것으로 판단되었다. 실측된 수분 증발량당 평균 소요 에너지 9419kJ/kg-water는 일본에서 사용중인 건조기의 평균치인 7568kJ/kg-water보다 약 1.2배가 높았다.

#### 6) 건조 속도 제어

그림 8은 함수율이 낮을 때의 실험구 F-1, F-2, F-3의 결과를 동시에 나타낸 것이다. 실험구 F-1의 경우 건조후 함수율이 목적함수율과 0.99%(w.b.)의 비교적 큰 차이를 보였는데, 이는 시료 채취과정에서 건조층 상부의 고함수율 부분이 주로 수집되었기 때문이었다. 그러나 F-2과 F-3의 경우에는 건조후 함수율과 목적함수율이 거의 일치 하는 것을 알 수 있다. 그림 9는 함수율이 높은 경우 실험구 F-4, F-5, F-6, F-7의 결과를 동시에 나타낸 것이다. 전 실험구에서 건조후 함수율이 목적함수율과 거의 일치 하였으며, 특히 실험구 F-6과 F-7은 동일 함수율 수준에서 제어장치를 반복 실험한 것으로, 역시 목적함수율과 일치하는 결과를 나타냈다.

### 4. 요약 및 결론

이 연구는 벼에 적합한 연속식 건조기 개발에 필요한 기초자료를 얻기 위해 건조현상을 예측하는 건조 시뮬레이션 모델을 개발하고, 미질손상을 최소화 하기 위해 건조속도를 제어할 수 있는 퍼지제어장치를 개발할 목적으로 수행하였다. 개발된 연속식 건조 시뮬레이션 모델은 실증실험을 통해 성능을 검증하였고, 실제 사용중인 건조기의 건조성능을 기초로 건조부크기에 따른 성능을 검증하였다. 건조속도를 일정하게 유지하기 위해 개발된 연속식 건조 시뮬레이션 모델과 퍼지 논리를 이용하여 퍼지 제어장치를 개발하였고, 실험을 통해 제어장치의 성능을 검증하였다. 이상 연구결과를 항목별로 요약하면 다음과 같다.

- 1) 벼의 건조후 함수율을 비교한 결과, 모델 1과 모델 2는 실측치와 차이가 대부분 0.5%(w.b.) 이내로 나타났다. 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 배출공기

가 주위 공기와 혼합되어 예측치와 매우 큰 차이를 보였다.

5) 모델 1에 혼합현상을 가정한 2단 흐름형 건조 시뮬레이션 모델과 실제 크기 건조기의 건조성능을 비교한 결과, 실측치와의 차이가 대부분 0.5%(w.b.) 이하로 나타났다. 따라서 개발된 건조 시뮬레이션 모델이 실제 건조기 개발과 운전에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

6) 건조 소요 에너지의 실측치는 96094kJ로 예측치 59162kJ 보다 약 1.6배 높게 나타났으며, 수분 증발량당 건조 소요 에너지는 실측치 9419kJ/kg-water, 예측치 5808kJ/kg-water로 나타났다. 일본에서 사용중인 건조기의 수분 증발량당 평균 건조 소요 에너지 7568kJ/kg-water과 비교할 때 실측치 9419kJ/kg-water는 일본의 경우보다 약 1.2배 높게 나타났다.

7) 투입 함수율이 20.46, 20.96, 18.98%(w.b.) 일 때, 목적 함수율을 17%(w.b.)로 하여 실험을 수행한 결과 건조후 함수율이 각각 17.99, 17.60, 17.23%(w.b.)로 나타났으며, 투입 함수율이 28.85, 26.95, 28.11, 27.8%(w.b.) 일 때, 목적 함수율을 25%(w.b.)로 하여 실험을 수행한 결과 건조후 함수율이 각각 25.24, 24.90, 25.23, 25.09%(w.b.)로 나타났다. 잔차의 최대치는 실험구 F-1에서 0.99%(w.b.)로 나타났으나, 나머지 실험구에서는 0.5%(w.b.) 이하로 나타났다. 따라서 개발된 제어장치가 실제 건조작업에 매우 유용하게 사용될 수 있는 것으로 판단되었다.

8) 제어장치의 반복성 실험을 위한 실험구 F-6과 F-7의 경우 실험구간 건조함수율의 차이는 0.14%(w.b.)로 나타났으며, 건조후 함수율 역시 목적함수율과 거의 일치하였다.

9) 제어장치의 성능을 R.M.S.값으로 나타낸 결과 F-1과 F-2를 제외한 모든 실험구에서 0.5%(w.b.) 이하의 값을 나타내었다.

## 5. 참고문헌

1. 고학균외. 1995. 미곡종합처리시설. 문운당.
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 박사학위 논문.
7. 全農施設・資材部. 1986. 共乾施設のてびき (I, II, III)
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.

14. Luikov, A. V. 1966. Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies. New York. Pergamen.
15. Morita, T. and R. P. Singh. 1979. Physical and thermal properties of short-grain rough rice. Trans. ASAE. 22(3):630-636
17. Othmer, D. F. 1940. Correlating vapor pressure and latent heat data. Ind. Eng. Chem. 32(6):841-856

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

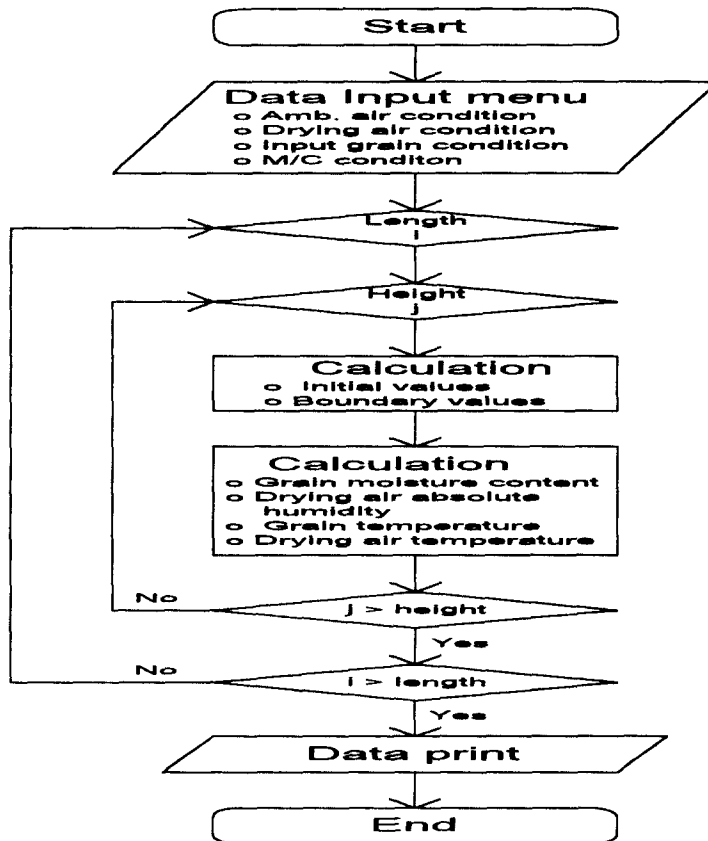


Fig. 1. Flow chart of computer program for the continuous drying model.

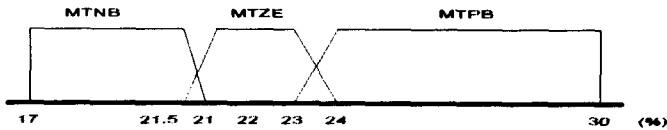


Fig. 2. Membership function of "Initial moisture content".

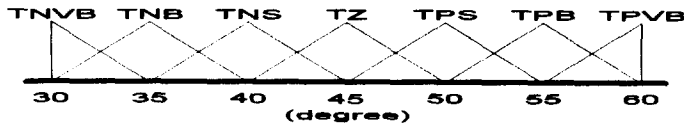


Fig. 3. Membership function of "Drying air temperature".

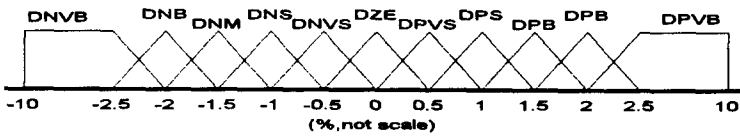


Fig. 4. Membership function of "Moisture content difference".

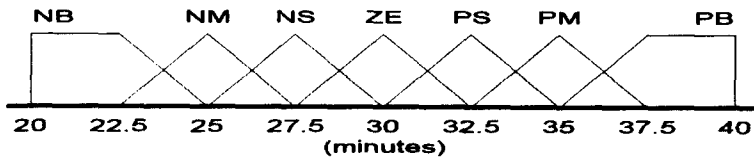


Fig. 5. Membership function of "Grain Moving Speed"

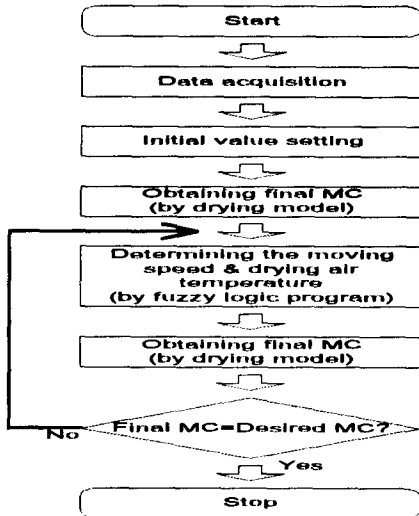


Fig. 6. Flow chart of the drying control.

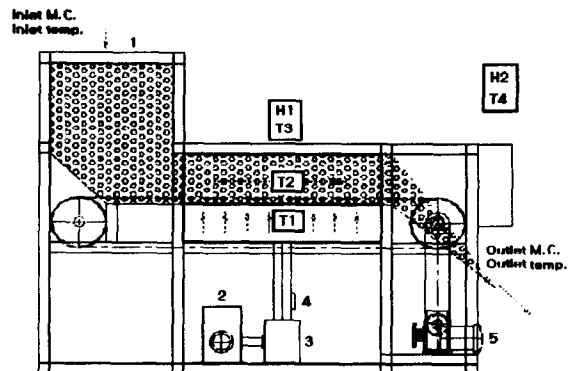


Fig. 7. Schematic diagram of experimental apparatus.



Table 2. Experimental condition of the continuous rice drying.

Exp. No.	Airflow rate (m <sup>3</sup> /s · ton)	Mov. speed (hr/pass)	Drying air temp. (°C)	Amb. air temp. (°C)	Amb. air RH. (%)	Input grain temp. (°C)	Input M.C. (% w.b.)
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

Table 3. Experimental conditions for rice drying.

Exp. No.	Inlet M.C. (% wb)	Obj. M.C. (% wb)	Drying condition					
			Program output			M/C. operation		
			Drying temp. (°C)	Moving speed (min.)	Outlet M.C. (% wb)	Drying temp. (°C)	Moving speed (min.)	Outlet M.C. (% wb)
F-1	20.46	17.00	50.00	32.70	17.00	50.12	33.25	17.05
F-2	20.96	17.00	50.00	38.75	17.00	49.80	38.53	17.01
F-3	18.98	17.00	40.00	27.50	17.00	39.56	26.22	17.00
F-4	28.85	25.00	51.20	31.44	25.00	47.61	33.25	25.16
F-5	26.95	25.00	38.40	23.73	25.00	38.50	23.41	25.02
F-6	28.11	25.00	45.70	29.83	25.00	43.99	33.25	24.88
F-7	27.80	25.00	43.60	29.20	25.00	43.00	26.22	25.30

Table 4. Results of the predicted and measured values of the outlet moisture content.

Exp. No.	Inlet M.C. (% w.b.)	Model 1 (% w.b.)		Model 2 (% w.b.)		Model 3 (% w.b.)		Measured M.C. (% w.b.)
		Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	
#1-1	22.44	19.42	0.22	19.50	0.30	20.25	1.05	19.20
#1-2	19.30	16.75	-0.42	16.82	-0.35	17.52	0.35	17.17
#1-3	17.03	14.64	0.05	14.66	0.07	15.21	0.62	14.59
#1-4	14.84	12.87	-0.31	12.86	-0.32	13.32	0.14	13.18
#2-1	23.70	19.49	0.32	19.55	0.38	20.28	1.11	19.17
#2-2	18.62	15.05	-0.51	15.07	-0.49	15.60	0.04	15.56
#12-1	22.06	19.39	-0.11	19.49	-0.01	20.13	0.63	19.50
#12-2	18.82	16.34	-0.25	16.44	-0.15	16.93	0.34	16.59
#12-3	16.21	14.07	-0.46	14.13	-0.40	14.50	-0.03	14.53
#5-1	22.49	19.13	0.26	19.21	0.34	20.10	1.23	18.87
#5-2	18.48	15.44	-0.84	15.50	-0.78	16.16	-0.12	16.28
#6-1	22.42	20.66	0.20	20.71	0.25	21.24	0.78	20.46
#6-2	19.98	18.21	0.36	18.27	0.42	18.77	0.92	17.85
#6-3	17.92	16.34	0.27	16.38	0.31	16.86	0.79	16.07
#7-1	25.16	22.15	0.58	22.23	0.66	23.02	1.45	21.57
#7-2	21.16	18.47	0.20	18.53	0.26	19.29	1.02	18.27
#7-3	17.86	15.55	0.05	15.58	0.08	16.22	0.72	15.50

Table 5. Results of the predicted and measured values of the outlet rice temperature.

Exp. No.	Model 1 (°C)		Model 2 (°C)		Model 3 (°C)		Measured M.C. (°C)
	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	
#1-1	39.87	1.97	39.72	1.82	41.14	3.24	37.90
#1-2	41.01	0.81	40.86	0.66	42.13	1.93	40.20
#1-3	41.40	2.40	41.19	2.19	42.14	3.14	39.00
#1-4	41.75	0.85	41.51	0.61	42.31	1.41	40.90
#2-1	47.08	1.88	46.81	1.61	48.05	2.85	45.20
#2-2	48.59	0.49	48.27	0.17	49.12	1.02	48.10
#12-1	34.96	-0.74	34.89	-0.81	36.06	0.36	35.70
#12-2	36.28	-0.42	36.15	-0.55	37.03	0.33	36.70
#12-3	36.87	0.67	36.70	0.5	37.36	1.16	36.20
#5-1	39.75	0.85	39.61	0.71	40.87	1.97	38.90
#5-2	41.12	0.72	40.92	0.52	41.84	1.44	40.40
#6-1	38.81	2.81	38.73	2.73	40.75	4.75	36.00
#6-2	38.59	1.39	39.46	1.26	41.20	3.00	38.20
#6-3	40.46	1.26	40.30	1.10	41.86	2.66	39.20
#7-1	38.43	1.43	38.34	1.34	40.04	3.04	37.00
#7-2	40.01	-0.09	39.88	-0.22	41.29	1.19	40.10
#7-3	41.05	0.35	40.87	0.17	41.99	1.29	40.70

Table 6. Results of the predicted and measured values of the drying air temperature.

Exp. No.	Model 1 (°C)		Model 2 (°C)		Model 3 (°C)		Measured M.C. (°C)
	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	
#1-1	37.48	-5.07	42.40	-0.15	43.01	0.46	42.55
#1-2	43.10	0.34	42.97	0.21	43.60	0.84	42.76
#1-3	43.27	1.43	43.12	1.28	43.54	1.70	41.84
#1-4	43.26	0.80	43.11	0.65	43.48	1.02	42.26
#2-1	50.92	5.20	50.70	4.98	50.95	5.23	45.72
#2-2	51.41	1.53	51.20	1.32	51.44	1.56	49.88
#12-1	37.28	1.53	37.14	1.39	37.61	1.86	35.75
#12-2	38.22	0.63	38.07	0.48	38.42	0.83	37.59
#12-3	38.48	0.16	38.32	0.00	38.59	0.27	38.32
#5-1	42.21	1.33	42.07	1.19	42.63	1.75	40.88
#5-2	43.05	0.60	42.90	0.45	43.31	0.86	42.25
#6-1	41.72	7.32	41.58	7.18	42.58	8.18	34.40
#6-2	42.13	3.18	41.98	3.03	42.82	3.87	38.95
#6-3	42.65	2.31	42.51	2.17	43.28	2.94	40.34
#7-1	41.26	2.33	41.22	2.29	42.01	3.08	38.93
#7-2	42.38	1.30	42.25	1.17	42.93	1.85	41.08
#7-3	42.97	0.84	42.70	0.57	43.36	1.23	42.13

Table 7. Results of the predicted and measured values of the outlet drying air relative humidity.

Exp. No.	Model 1 (°C)		Model 2 (°C)		Model 3 (°C)		Measured M.C. (°C)
	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	Pre.	Diff.	
#1-1	80.84	-18.16	80.98	-18.02	58.28	-40.72	99.00
#1-2	69.26	1.15	70.06	1.95	52.34	-15.77	68.11
#1-3	55.51	14.54	57.06	16.09	44.20	3.23	40.97
#1-4	46.93	16.42	48.82	18.31	39.13	8.62	30.51
#2-1	72.64	-26.36	74.30	-24.70	53.03	-45.97	99.00
#2-2	49.19	15.81	51.41	18.03	39.70	6.32	33.38
#12-1	81.83	-3.94	80.75	-5.02	58.63	-27.14	85.77
#12-2	64.78	25.72	64.89	25.83	49.58	10.52	39.06
#12-3	52.08	19.16	52.96	20.04	42.43	9.51	32.92
#5-1	79.85	-19.15	79.98	-19.02	59.02	-39.98	99.00
#5-2	59.45	19.25	60.88	20.68	47.29	7.09	40.20
#6-1	91.86	-7.14	90.99	-8.01	62.57	-36.43	99.00
#6-2	78.05	-7.15	77.82	-7.38	54.66	-30.54	85.20
#6-3	68.55	-5.25	68.99	-4.81	49.81	-23.99	73.80
#7-1	94.90	-4.10	94.44	-4.56	66.56	-32.44	99.00
#7-2	77.90	-20.60	78.05	-20.45	57.01	-41.49	98.50
#7-3	62.25	-3.95	63.31	-2.89	48.30	-17.90	66.20

Table 8. Comparison of energy consumption for the measured vs. the 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	148748	89450	17.70	8403	5053
#2	95110	58032	9.61	9896	6038
#12	83917	54422	8.77	9568	6205
#5	83486	50889	7.39	11297	6886
#6	63372	37893	7.54	8404	5025
#7	101934	64290	11.39	8949	5644

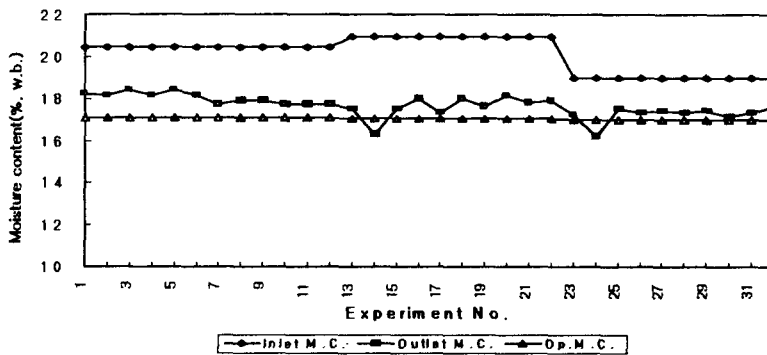


Fig. 8. Comparison of the moisture content change for F-1, F-2, F-3.

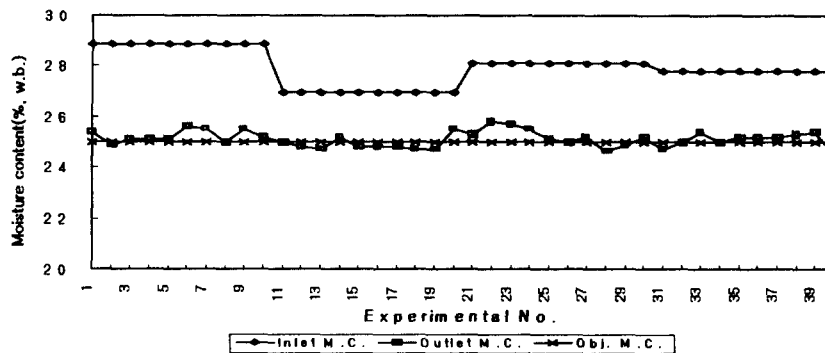


Fig. 9. Comparison of the moisture content change for F-4, F-5, F-6, F-7.