

시뮬레이션에 의한 벼의 누적혼합 상온통풍건조의 송풍기 및 가열기의 운영방법에 관한 연구⁺

Fan and Heater Management Schemes for Layer Filling and Mixing Drying of Rough Rice with Natural Air by Simulation

금 동 혁*	한 총 수**	박 춘 우*
정회원	정회원	정회원
D. H. Keum	C. S. Han	C. W. Park

ABSTRACT

This study was performed to determine proper fan and heater management schemes for natural air drying of rough rice in round steel bin with stirring device under Korean weather conditions. A computer simulation model was developed to predict moisture content changes, energy requirements, and drymatter losses during drying of rough rice by natural air. Drying test was conducted to validate the simulation model using round steel bin of holding capacity of 300ton at Rice Processing Complex in Jincheon. The bin was filled with rough rice every day and mixing by stirring device. Moisture contents, ambient air temperatures, relative humidities, static pressures in plenum chamber in the bin, airflow rates, and electrical and fuel energy were measured.

Relative errors of moisture content changes predicted by the simulation model were below 5%, and relative errors of final moisture content, final grain weight, required energy ranged from 0.9% to 6%. These error levels indicated that the simulation model can satisfactorily predict the performance factors of natural air drying system such as drying rates and energy consumptions comparing error level of 10% to 15% in other drying simulation models generally used in dryer designs.

Twelve different fan and heater management schemes were evaluated using the computer simulation model based on three hourly weather data from Suweon for the period of 1982-1994. The best management schemes were selected comparing the drymatter losses, required drying times, required energy consumptions. Operating fan without heating only when ambient relative humidity was below 85% or 90% appeared to be the most effective method of fan operation in favorable drying weather. Under adverse drying climates or to reduce required drying time, operating fan continuously, and heating air with 1.5°C temperature rise only when ambient relative humidity was over 85% appeared to be the most suitable method.

주요용어(Key Words): 상온통풍건조(natural air drying), 누적혼합건조(layer filling and mixing drying)

⁺ 본 연구는 신흥기업사의 연구비 지원에 의해 수행되었음

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

** 충북대학교 농과대학 농업기계공학과

1. 서 론

우리나라 미곡종합처리장에 설치되어 있는 원형 철제빈의 용량은 200~300톤 규모이다. 건조용 빈에는 대부분 곡물 교반장치가 설치되어 있으며, 빈에 투입되는 곡물을 교반하면서 상온의 공기 또는 이를 약간 가열한 공기를 통풍하여 건조작업을 수행한다.

수확기간 동안 개별 농가에서 수확된 벼는 미곡종합처리장의 원형철제 빈에 투입되어 교반장치에 의해 상하층이 혼합되면서 건조가 이루어진다. 투입된 벼가 어느 정도 건조가 이루어진 후에 새로운 물벼를 누적하여 투입한다. 이와 같이 벼를 누적하여 투입하고 혼합하면서 이루어지는 상온통풍 건조를 누적혼합 상온통풍 건조라 한다.

벼 상온통풍건조 시설의 성능은 건조속도, 건조벼의 품질 및 건조 소요에너지로 평가하며, 이들을 성능인자라 한다. 성능인자에 영향을 미치는 요소는 초기함수율, 수확시기, 기상조건, 송풍량, 송풍방법 및 가온방법을 들 수 있다. 벼의 수확시기, 초기함수율 및 기상조건에 따라서 송풍 및 가온방법 등의 운영방법을 다르게 해야 하며, 운영방법에 따라서 성능이 크게 좌우된다. 따라서, 적절한 운영방법의 구명이 무엇보다도 중요하다.

우리나라에 원형철제 빈이 미곡종합처리장에 설치되어 운영된지는 불과 4~5년에 불과하지만, 200여 개소의 미곡종합처리장에 수백기가 설치되어 운영되고 있다. 우리나라에서 벼의 상온통풍 건조에 관한 많은 연구가 수행되어 설계 및 이용기술이 거의 확립되어 있으나, 교반장치가 부착된 비교적 대용량의 원형 빈을 이용한 벼의 건조기술에 대한 연구는 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 미곡종합처리장의 합리적인 운영을 위해 우리나라의 기상조건에 적합한 누적 혼합 상온통풍건조 기술의 확립이 매우 긴급하고 시급한 실정이다.

상온통풍건조 시설의 적절한 운영방법은 실험 또

는 시뮬레이션 방법으로 결정한다. 그러나 실험에 의한 방법은 많은 시간과 경비가 소요되므로 거의 이용되지 않고 있으며, 시뮬레이션 방법이 주로 이용된다.

본 연구의 목적은 원형철제 빈을 이용한 벼의 누적혼합 상온통풍건조에서 함수율 변화, 곡물품질 및 건조 소요에너지를 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하고, 이를 실험을 통하여 검증하며, 시뮬레이션방법에 의해 기상조건에 따라 적절한 송풍 및 가온방법을 제시하는데 있다.

2. 시뮬레이션 모델링

가. 수학모델

본 연구에서는 곡물의 후층을 많은 박층으로 나누고 각각의 박층에서 일어나는 변화를 연속적으로 계산하여 조합하는 방법을 상온통풍건조 모델의 기본 개념으로 하였다.

곡물층에서 배출되는 공기의 온도와 곡온이 평형을 이룬다고 가정하면, 임의의 곡물층에서 미지항은 건조 후의 함수율 M_f , 배출공기의 절대습도 H_f , 배출공기의 건구온도 T_f 가 되므로 기본적으로 3개의 방정식이 요구된다. 3개의 방정식은 임의의 곡물층에 대한 에너지 및 물질평형과 곡물의 건조속도를 나타내는 박층건조방정식을 도입하여 구성하였다.

Δt 시간 동안 Δx 두께의 곡물층에 대한 에너지평형과 물질평형을 고려하여 유도한 식과 벼의 박층 건조방정식은 다음과 같다.

$$T_f = \frac{(c_a + c_v H_o) T_o + R(1 + M_o)(c_p + c_w M_{ow}) T_o - (H_f - H_o) h_{fg}}{c_a + c_v H_f + R(1 + M_f)(c_p + c_w M_{fw})} \dots \dots \dots (1)$$

$$H_f = H_o + R(M_o - M_f) \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \dots \dots \dots (3)$$

여기서,

c_a : 건공기의 비열 (1.007 kJ/kg.K)

c_v : 수증기의 비열 (1.876 kJ/kg.K)

c_p : 곡물 건물의 비열 (3.49 kJ/kg.K)

c_w : 곡물층의 물의 비열 (1.2692 kJ/kg.K)

G_a : 건공기 질량유동율 (kg/hr.m²)

h_{fg} : 곡물수분의 증발잠열(kJ/kg)

H_o, H_f : 유입 및 배출공기의 절대습도(kg/kg)

k : 건조상수(1/hr)

M : 함수율(dec., d.b.)

M_c : 평형함수율(dec., d.b.)

M_o, M_f : 건조전후의 건량기준 함수율(dec., d.b.)

M_{ow}, M_{fw} : 건조전후의 습량기준 함수율(dec., w.b.)

T_o, T_f : 미소곡물층 유입 및 배출공기의 건구온도(°C)

$$R = \rho_p \Delta x / (G_a \Delta t)$$

ρ_p : 곡물의 건물 산물밀도(kg/m³)

Δt : 시간중분 (hr)

Δx : 깊이중분 (m)

식 (1)은 에너지 평형, 식 (2)는 수분평형에 기초한 식이며, 식(3)은 박층건조방정식이다.

벼의 박층건조방정식의 건조상수 k 는 다음 식 (4)를 이용하였다(금동혁, 박춘우, 1997).

$$k = 0.122111 + 0.00549133T - 0.171811 RH \dots (4)$$

식 (4)에서 T 는 온도(°C), RH 는 유입공기의 상대습도(소수)이다.

건조속도의 해석에 건조와 흡습을 동시에 고려하였으며, 흡습속도는 건조속도의 50%로 간주하였다(1987, Lu). 벼의 방습 및 흡습평형함수율은 다음의 식 (5)와 식 (6)을 이용하였다(금동혁, 박선태, 1996)

$$M_{cd} = 0.409396 - 0.059794 \ln \{-1.987 (T + 56.190) \ln (RH)\} \dots (5)$$

$$M_{ca} = 0.397048 - 0.053204 \ln \{-1.987 (T + 123.297) \ln (RH)\} \dots (6)$$

여기서, M_{cd} : 방습평형함수율 (dec., d.b.)

M_{ca} : 흡습평형함수율 (dec., d.b.)

곡물수분의 증발잠열 h_{fg} (kJ/kg)는 식(5)의 평형함수율식으로부터 Othmer 방법을 이용하여 유도하였으며, 다음 식(7)과 같이 표시되었다.

$$h_{fg} = (2502.5 - 2.386 T) \{1.1 + 1.2356 \exp(-16.7255 M)\} \dots (7)$$

빈에 투입되는 곡물층의 깊이에 따라 송풍량이 변하게 된다. 벼퇴적 깊이별 송풍량은 벼 퇴적층의 공기저항식과 송풍기의 성능곡선식을 이용하여 구하였다.

벼 퇴적층의 공기저항식은 다음 (8)식을 이용하였다(고학균 외, 1994).

$$\Delta P = 653.54 \left(\frac{V}{60 A} \right)^{1.2727} D \dots (8)$$

여기서, ΔP = 벼 퇴적층의 공기저항(mmAq)

A = 빈의 단면적(m²)

D = 빈의 퇴적깊이(m)

V = 송풍량(m³/min.)

식 (8)를 벼의 퇴적깊이별로 정압을 실측한 결과를 이용하여 다음 식 (9)와 같이 수정하여 사용하였다.

$$\Delta P = CF * 653.54 \left(\frac{V}{60 A} \right)^{1.2727} D \dots (9)$$

여기서, CF = 수정계수(1.3 : 퇴적고 1.1m 이하, 0.8 : 퇴적고 1.1m 이상)

실험에 사용된 빈에 설치된 송풍기의 성능곡선을 이용하여 정압과 송풍량의 관계식을 유도하였으며, 이는 다음 (10)식으로 표시되었다

$$\Delta P = 143.258 + 0.315115 V - 3.88172 \times 10^{-4} V^2 \dots\dots\dots (10)$$

$$\gamma^2 = 0.99968, 400 \leq V \leq 1100$$

여기서, ΔP = 송풍기 정압(mmAq)
 V = 송풍량(m³/min)

식 (9)의 곡물층의 공기저항식과 식 (10)의 송풍기의 정압곡선의 교점이 송풍기의 작동점이다. Newton-Raphson 방법으로 퇴적깊이의 변화에 따른 작동점의 송풍량을 구하여, 송풍량과 퇴적깊이와의 관계를 함수로 나타내었으며, 다음 식(11)로 표시되었다.

$$V = 1105.17 e^{-0.0697 D} (\gamma^2 = 0.9951) \dots\dots\dots (11)$$

식 (11)을 이용하여 퇴적깊이별 송풍량을 계산하고, 이를 퇴적곡물부피로 나누어 풍량비를 구하여 퇴적깊이와 풍량비의 관계를 다음 식 (12)로 나타내었다.

$$SAR = -0.9376 + \frac{11.2422}{D} (\gamma^2 = 0.9998) \dots\dots\dots (12)$$

여기서, SAR : 풍량비(m³/min.m³)

송풍동력은 다음 식 (13)을 이용하였다(Smith, 1983).

$$P = 0.8 P_{max} \{1 - 1.28 (0.75 - Q/Q_{max})^2\} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, P = 송풍량 Q일 때의 소요 송풍동력(kW)
 P_{max} = 최대 송풍기 동력(kW)

Q = 벼 퇴적깊이별 송풍량(cmm)
 Q_{max} = 송풍기의 개방체적(cmm)

송풍기를 통과한 공기는 송풍에너지에 의하여 온도가 약간 상승한다. 송풍동력이 모두 공기의 온도 상승에 이용된다고 가정하여 다음 식(14)로 상승온도를 계산하였다.

$$TR = \frac{3,600 P}{(c_a + c_v H) G_a} \dots\dots\dots (14)$$

여기서, TR = 상승온도(°C)
 P = 소요 송풍동력(kW)
 H = 외기의 절대습도

곡물의 품질손상 정도를 판단하기 위하여 건물중량 손실률을 예측하였다. 건물중량 손실률은 다음 식 (15)의 Murata 등(1976)의 저장벼의 호흡식을 이용하였다.

$$HEAT = \exp(-C_1 T^2 + C_2 T M + C_3 M^2 + C_4 T + C_5 M + C_6) \dots\dots\dots (15)$$

여기서, HEAT : 호흡열 (kcal/hr.kg-drymatter)

T : 곡온(°C)
M : 함수율(%w.b.)
 $C_1 = -0.111339E-02$
 $C_2 = 0.111532E-02$
 $C_3 = -0.5820E-02$
 $C_4 = 0.08708$
 $C_5 = 0.4147$
 $C_6 = -10.85623$

건물 1kg 중에서 180g이 분해하면 677.2 kcal의 열이 발생하므로 1kcal/kg의 호흡열의 발생은 0.2658/kg의 건물분해 즉 0.02658 %의 건물중량 손실률을 의미하게 된다. 이에 근거하여 건물중량 손실률

(ΔDML , %)은 식(15)의 호흡열 방정식을 다음 식 (16)의 건물중량 손실률식으로 수정하여 사용하였다.

$$\Delta DML = 0.02658 \text{ HEAT} \cdot \Delta t \dots\dots\dots (16)$$

여기서, ΔDML 은 시간중분 Δt 시간 동안의 건물중량 손실률이다.

나. 컴퓨터 프로그램

컴퓨터 프로그램은 Fortran77 언어로 작성하였다. 3시간 단위의 기상자료(건구온도, 상대습도), 공기와 곡물의 열 및 물리적 특성, 풍량비를 입력하였다. 초기곡은, 유입공기의 건구온도 및 상대습도로 식 (3)을 이용하여 건조 후의 함수율을 계산하고, 식 (2)를 이용하여 배출공기의 절대습도를 계산하며, 식(1)을 이용하여 배출공기의 건구온도를 계산하였다. 습공기의 성질을 계산하는 부 프로그램을 이용하여 배출공기의 상대습도를 계산하였다. 곡물층의 미소두께는 0.1m로 하였다. 시뮬레이션 프로그램은 주 프로그램과 건조속도 계산, 평형함수율 계산, 습공기의 성질 계산 및 건물중량 손실률을 계산하는 부 프로그램으로 구성하였다.

3. 모델의 검증

가. 검증실험

1) 공시재료

본 실험은 1994년 10월 14일부터 11월 9일까지 충북 진천읍 진천농협 미곡종합처리장에서 실시하였으며, 실험에 사용된 벼는 진천군내의 일반 농가에서 재배한 추정벼였다.

2) 실험장치

신흥기업사에서 1993년에 설계 제작하여 1994년 5월에 충북 진천읍 진천농협 미곡종합처리장에 설치한 300톤 저장용량의 2중강판재 교반식 원형철제 빈(SSD-11M)을 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 원형철제 빈의 주요 제원은 표 1과 같다.

빈은 파형강판재의 본체, 다공통기마루 및 송풍기로 구성되어 있으며, 내부에 곡물 분산장치와 교반장치 및 배출시스템이 설치되어 있다. 빈의 벽체는 2중파형강판 단열구조로 5cm 두께의 우레탄폼으로 단열하였으며, 교반장치는 수평축과 4분의 수직오거로 구성되어 있다.

3) 실험방법

가) 투입벼의 중량

생산자별로 반입되는 물벼의 중량은 미곡종합처리장에 설치된 호퍼형 자동 무게계량장치(호퍼스케일)를 이용하였으며, 호퍼스케일의 1배치당 계량중량은 100kg이며, 계량정도는 1/1000이다.

나) 함수율 측정

(1) 투입벼 함수율

생산자별로 반입되는 벼 100kg당 약 100g의 시료를 호퍼스케일을 통하여 채취하였다. 함수율의 측정

Table 1 Specifications of round steel bin used in drying test

Items	Specifications
Diameter of bin (m)	11.22
Height of bin (m)	11
Maximum bed depth (m)	4.85
Capacity of bin (ton)	300
Fan	
Power (kW)	37
Max. static pressure(mmAq)	230
Max. airflow rate(cmm)	1,200
Power of stirring device (kW)	4.8

은 10g의 곡립을 135℃에서 24시간 건조하는 상압정 온건조법을 이용하였으며, 이를 표준건조법인 5g 분쇄 - 105℃ - 5시간 건조법으로 환산하였다. 식 (17)을 환산에 이용하였다.

$$M_{105} = 100 - 1.0121 (100 - M_{135}) \dots\dots\dots (17)$$

여기서,

M_{105} : 105℃ 건조법에 의한 함수율(%w.b.)

M_{135} : 135℃ 건조법에 의한 함수율(%w.b.)

반입버의 일별 평균함수율은 반입단위별 함수율과 중량으로부터 구한 가중평균치로 하였다.

(2) 빈내의 함수율

건조중의 빈내 함수율 측정을 위한 시료채취 위치는 그림 1과 같이 빈의 중앙과 남북 및 동서 방향으로 빈의 중앙에서부터 2m 간격으로 하였다. 내경 2cm의 철제 파이프를 시료채취기를 제작하여 소정의 깊이까지 압입하여 시료를 채취 하였다. 깊이별로 약 10g의 시료를 채취하여 함수율 측정에 이용하였다.

빈내 벼의 함수율의 수직분포를 알기 위해 빈 바닥에서 0.15m의 위치에서 시료를 채취하고, 벼 퇴적

높이가 2m 미만일 때는 수직 0.5m 간격으로, 2m 이상일 때는 수직 1m 간격으로 시료를 채취하였다. 함수율의 측정은 투입버의 경우와 같은 방법을 사용하였다. 빈내 함수율은 바닥층(비교반층)과 교반층으로 나누어 일별로 집계하였다.

다) 온도와 상대습도의 측정

빈내 곡물의 온도와 빈하부의 공기층만실의 공기 온도, 외기와 배출공기의 온·습도를 측정하였다. 측정점의 위치는 그림 2와 같다. 온도는 열전대(pt-100)에 의해 측정하고 온도기록계로 기록하였다. 습도는 자기습도기록계를 이용하였다.

그림 2에서 측정점 1~18은 곡온 측정점이다. 교반 장치의 구동에 방해가 되지 않는 빈 중앙 및 측벽에 센서를 고정하였다. 측정점 7~12는 빈 중앙에, 1~6은 남측 벽면에, 13~18은 북측 벽면에 설치하였다.

측점 19~22는 공기층만실에 유입되는 공기의 온도 측정점이다. 곡물층 유입공기의 습도는 외기의 온·습도 및 공기층만실의 온도를 이용하여 습공기선도로부터 계산하였다. 측정점 24는 외기의 온·습도 측정위치이며, 송풍기 흡입구 부근에서 측정하였다. 측정점 23은 배기의 온·습도 측정 위치이며, 빈 중앙 상부 배출공기구에 설치하였다.

라) 송풍량 및 정압 측정

곡물층을 통과하는 송풍량은 벼 퇴적층의 상부 표

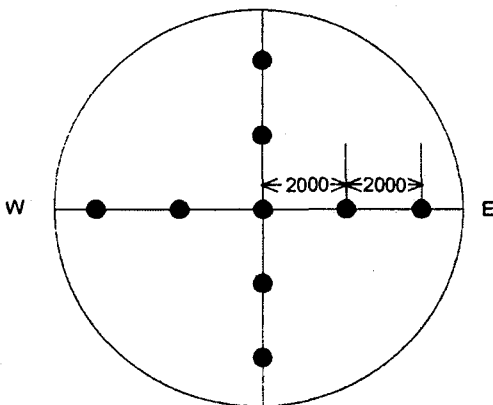


Fig. 1 Sampling locations in the bin.

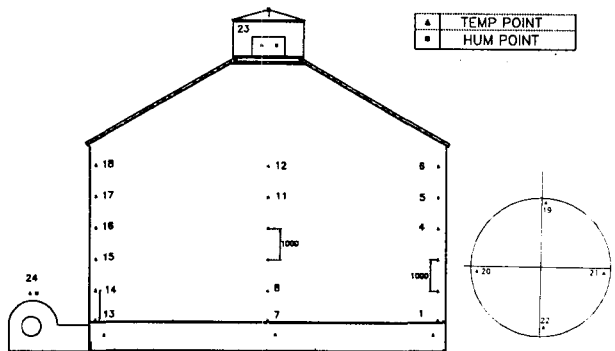


Fig. 2 Measuring points of temperatures and relative humidities.

면에서의 풍속을 집풍관과 풍속계를 이용하여 측정하고, 이를 면적비로 환산하였다. 또한, 곡물 퇴적고에 따라 빈하부 공기층만실의 정압을 액주계를 이용하여 측정하였다.

핸드 마노메타를 이용하여 매일 오전 10시 송풍기 가동시에 빈 공기층만실에 설치한 정압측정관을 통해서 정압을 측정하였다.

나. 실험결과 및 모델의 검증

1) 벼반입 상황

개별농가에서 벼의 반입은 10월 19일에 1일 최대 21톤이 반입된 반면 무반입일이 4일, 최소 반입량이 1.1톤 정도로 변화가 심하였으며, 평균 1일 7톤이 반입되었다. 10월 14일부터 11월 7일까지 24일 동안 반입된 벼의 누적중량은 총 164톤이었으며, 개별농가의 1회 평균반입량은 2.9톤이었다.

일별 반입벼의 함수율은 반입 초기에 약 27% (w.b.)의 고함수율에서부터 반입 최종일에 13.7%의 저함수율까지 변화가 심하였다.

2) 외기 및 유입공기의 온도와 습도

송풍기를 가동하는 동안 외기의 온도와 상대습도의 변화는 그림 3과 같다. 송풍기는 오전 9시부터 오후 9시 사이에 반입물량의 상황을 판단하여 적절히 가동하였다. 송풍기 가동시간대의 평균 외기온도는

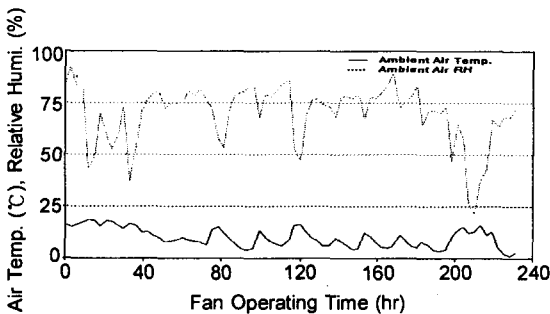


Fig. 3 Change of ambient air temperatures and relative humidities during fan operating period.

9.9°C, 상대습도는 69.6%였다.

외기는 송풍기를 통과하면서 송풍에너지의 흡수로 온도가 상승하였다. 빈의 공기층만실의 평균온도는 12.1°C로 외기에 비하여 평균 2.2°C 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 온도상승은 상대습도를 약 7% 낮추는 효과를 나타내었다.

3) 모델의 검증

가) 송풍량

벼의 퇴적깊이별로 실측한 정압과 식 (8)로 계산한 정압을 그림 4에 나타내었다. 그림에서와 같이 퇴적고가 1.1m 이하일 때는 실측 정압이 식 (8)에 의한 계산정압보다 높게 나타나고, 1.1m 이상일 때는 실측정압이 낮게 나타났다. 이는 퇴적고가 1.1m 이하일 때는 벼의 산물밀도가 660~712 kg/m³으로 높게 나타나 다짐이 심한 반면, 1.1m 이상일 때는 산물 밀도가 620~650 kg/m³으로 다짐의 정도가 완화되었

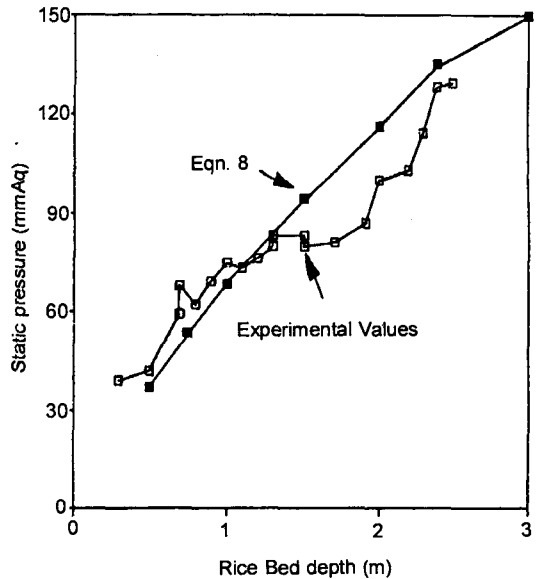


Fig. 4 Comparison of experimental and calculated values of static pressures versus bed depth.

기 때문이었다. 또한 퇴적깊이가 낮을 때는 교반장치에 의한 다짐의 완화효과가 낮은 반면, 퇴적깊이가 1.1m를 넘으면 교반장치가 이를 충분히 완화하기 때문인 것으로 판단되었다. 이와 같은 현상을 고려할 때 식 (8)의 수정이 필요하였으며, 수정계수를 도입하여 식 (9)로 수정하였다.

식 (11)에 의한 예측 송풍량과 실측 송풍량을 그림 5에 비교하여 나타내었다.

그림 5에서와 같이 벼의 퇴적고가 높을 때는 예측치가 실측치와 잘 일치하였으며, 퇴적고가 낮을 때는 예측치가 실측치보다 다소 높게 나타났다. 예측치의 최대 상대오차가 6.3%로 나타나 식 (11)의 송풍량 예측 방정식은 벼 퇴적고에 따른 송풍량을 매우 만족스럽게 예측할 수 있는 것으로 판단되었다.

나) 함수율

벼의 바닥층은 60시간 통풍 후에 평균 14.6%까지 건조되었으며, 교반층은 평균 18.9%까지 건조되어 상하층간에 4.3%의 함수율 구배가 발생하였으나, 150시간 건조 후에 교반층의 함수율은 16%, 비교반층은 14.5%까지 건조되어 함수율 구배는 1.5%로 줄어들었다. 송풍기 가동시간은 총 234시간이었다.

표 2는 건조종료 후 빈내의 퇴적깊이 및 수평방향에 따른 함수율을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 건

조종료 후 바닥층(비교반층)의 함수율은 빈 중앙과 북쪽 방향의 벼가 높은 경향을 나타내었으며, 다른 방향은 거의 비슷한 값을 나타내었다. 바닥층의 전체 평균함수율은 $13.9 \pm 0.81\%$ 이었다. 교반층의 함수율은 곡물깊이 및 방향에 관계없이 균일한 함수율을 나타내었으며, 표면층을 제외하면 표준편차가 0.5%로 이하로 나타났다.

표면층을 제외한 교반층은 전층이 고르게 혼합됨을 알 수 있으며, 곡물표면의 균평도 대단히 양호하여 균일한 송풍이 이루어지는 것으로 간주할 수 있었다. 다만 표면층은 외기의 영향에 민감하게 반응

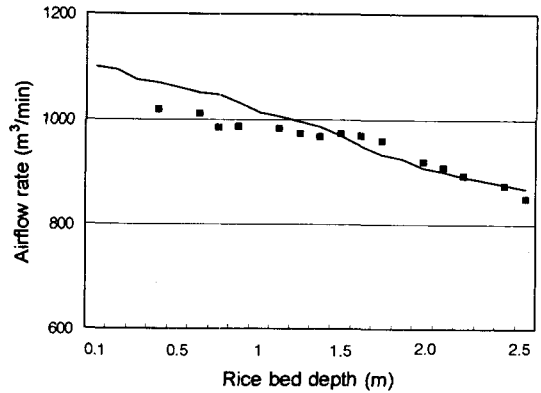


Fig 5. Comparison of calculated and experimental value of airflow rate versus bed depth.

Table 2 Moisture content distribution in depths and horizontal directions at the end of drying process

Location	Center	East		West		South		North		Average
		2m	4m	2m	4m	2m	4m	2m	4m	
Bottom	14.7	13.5	13.1	12.7	13.2	13.8	14.2	15.3	14.6	13.9 ± 0.81
1 m	15.6	15.4	15.5	15.4	16.2	15.3	16.0	15.8	15.9	15.7 ± 0.32
2 m	15.6	15.1	15.6	15.2	15.9	15.3	15.6	15.4	15.2	15.4 ± 0.24
Surface	15.3	15.3	14.7	15.3	15.6	15.2	15.7	10.0	12.6	14.4 ± 1.79
Average (Mixing layer)	15.5 ± 0.13	15.3 ± 0.15	15.3 ± 0.41	15.3 ± 0.07	15.9 ± 0.23	15.3 ± 0.02	15.8 ± 0.15	13.7 ± 2.67	14.6 ± 1.43	15.2 ± 0.63

Table 3 Comparison of experimental and predicted values of final moisture content, grain weight and energy requirement after drying

	Final moisture content (% w.b)	Weight of final grain (ton)	Electrical energy of fan (kWh)	Energy requirement of fan (kJ/kg.water)
Experimental value	15.0	154.1	6,626.0	2,570.0
Predicted value	15.5	155.7	6,686.0	2,723.6
Relative error (%)	3.3	1.0	0.9	6.0

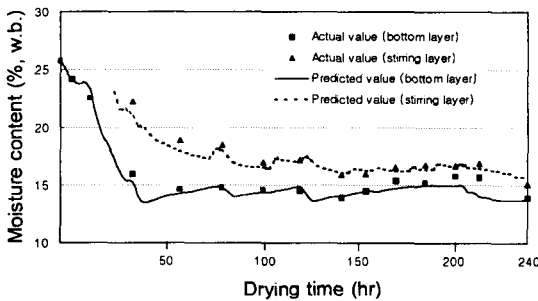


Fig. 6 Comparison of the experimental and predicted average moisture contents.

한 것으로 간주할 수 있었다.

이와 같은 빈내의 동서남북 방향의 비교반층의 함수율의 편차가 크지 않으며, 교반층은 동서남북 및 깊이 방향별로 함수율 편차가 크지 않으므로 균일한 건조가 이루어지고 있는 것으로 간주하여 각 층의 평균함수율을 대표 함수율로 하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

실험기간 동안의 투입벼의 중량과 함수율, 외기의 온도와 상대습도를 입력하여, 함수율 변화를 3시간 단위로 출력하여 실험치와 비교하였다. 비교반층과 교반층의 평균함수율을 비교하여 그림 6에 나타내었다. 실험치와 예측치의 상대오차는 5% 미만으로 예측치는 실험치와 매우 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

다) 소요에너지

최종 함수율, 건조후 중량, 총소요전력량, 소요에너지의 실험치와 예측치를 비교하여 표 3에 나타내었다. 표 3에서와 같이 최종 평균함수율, 건조 후 곡물무게, 소요 전력량과 소요 에너지의 예측치의 상대오차는 각각 3.3%, 1.2%, 0.9% 및 6.0%를 나타내었다. 일반적으로 사용되는 건조시뮬레이션 모델의 오차가 10~15% 범위인 점을 고려할 때, 본 모델의 오차 수준은 매우 신뢰할 수 있는 수준으로 판단할 수 있었다.

따라서, 개발한 시뮬레이션 프로그램은 함수율, 소요 건조시간 및 소요에너지 등의 예측에 매우 유효하게 사용될 수 있으며, 빈의 운영방법 분석, 건조비용분석 등에 매우 적절하게 이용될 수 있는 것으로 판단되었다.

2. 송풍 및 가온방법

가. 분석방법

앞에서 개발한 시뮬레이션 프로그램을 송풍 및 가온방법의 특성을 분석하는데 이용하였다.

13년(1982~1994년)간의 수원지방의 10월과 11월의 3시간 단위의 온도와 상대습도의 기상대 자료를 분석에 이용하였다. 분석에 이용한 원형 빈은 현재 미곡종합처리장에 많이 설치되어 있는 직경 9.14m, 저장용량 200톤의 원형철제 빈으로 하였으며, 송풍기는 금(1998)의 연구결과에 따라 우리나라 남부지

역의 기상조건에서 적절한 11.2kW(15hp)로 한정하였다. 빈의 비 퇴적고와 송풍량의 관계식은 금(1998)의 연구결과를 이용하였다.

벼의 반입은 21일 동안 이루어지는 것으로 가정하여, 처음 7일 동안은 함수율 24%의 벼가 총 60톤 반입, 다음 7일 동안은 함수율 22%의 벼가 총 100톤 반입, 다음 7일 동안은 함수율 20%의 벼가 총 40톤 반입되는 것으로 가정하였다. 교반장치에 의해 1일 1회 곡물이 완전 혼합되는 것으로 가정하였으며, 빈내의 최고함수율이 16.5%(w.b.)에 도달하였을 때 건조가 완료되는 것으로 가정하였다.

송풍 및 가온방법은 상온통풍건조의 특성에 비추어 일반적으로 이용가능한 다음의 10가지 방법을 가정하였다.

- ① 가온없이 연속송풍
- ② 1.5℃ 가온하여 연속송풍
- ③ 3.0℃ 가온하여 연속송풍
- ④ 연속송풍하되 상대습도 85% 이상일 경우에만 1.5℃ 가온
- ⑤ 연속송풍하되 상대습도 90% 이상일 경우에만 1.5℃ 가온
- ⑥ 처음 10일은 연속송풍, 다음은 상대습도 85%

이하일 경우에만 송풍

- ⑦ 상대습도 75% 이하일 경우에만 송풍
- ⑧ 상대습도 85% 이하일 경우에만 송풍
- ⑨ 상대습도 90% 이하일 경우에만 송풍
- ⑩ 09시부터 21까지 송풍

연도별 기상조건하에서 이상의 방법별로 시물레이션한 결과 중에서 최악 기상년도, 최상기상년도 및 13년간의 평균치를 분석에 이용하였다.

나. 기상조건의 영향

연도별 기상조건이 벼의 상온통풍건조에 미치는 영향을 판단하기 위하여 가열없이 연속송풍한 경우(①의 방법)의 시물레이션 결과를 비교하였다. 시물레이션 결과 중에서 건물중량 손실률을 연도별로 그림 7에 나타냈다. 그림에서와 같이 건물중량 손실률이 가장 작은 값(0.160%)을 나타내는 1991년도가 가장 양호한 기상년도로, 가장 큰 값(0.419%)을 나타내는 1983년도가 가장 불리한 기상년도로 판단할 수 있다. 최악 기상년도인 '83년도의 건물중량 손실률은 최상 기상년도인 '91년도에 비하여 2.6배의 큰 값을 나타내었다.

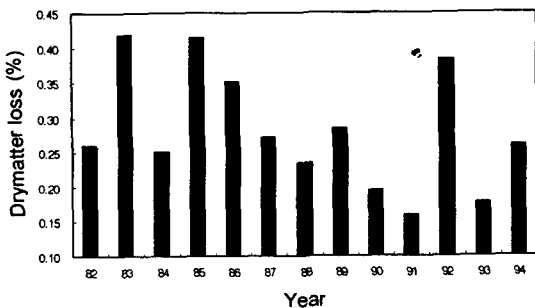


Fig. 7 Comparison of drymatter losses of rough rice produced during natural air drying under different yearly weather conditions in Suweon area (no heat added, continuous fan operation).

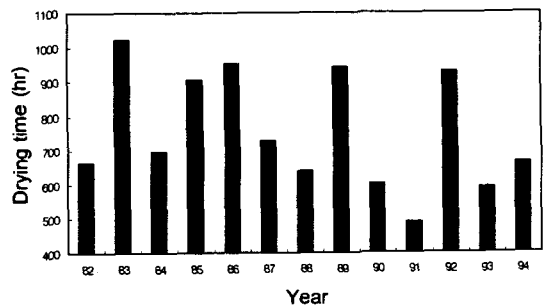


Fig. 8 Comparison of required drying times of rough rice by natural air under different yearly weather conditions in Suweon area (no heat added, continuous fan operation).

건물중량 손실을 외에 연도별 기상조건의 유·불리에 가장 민감한 결과를 나타내는 요소는 건조 소요시간과 송풍 에너지이다. 이들을 각각 그림 8과 그림 9에서 연도별로 비교하였다. 그림 8에서와 같이 건조 소요시간은 최상의 기상년도인 '91에 491시간에서부터 최악의 기상년도인 '83년에 1,023시간까지 큰 폭으로 변화하였으며, 약 2.1배의 차이를 나타내었다. 그림 9에서와 같이 소요 송풍에너지는 2,069 ~ 4,366 kJ/kg 범위에서 큰 폭으로 변화하였으며, 최상과 최악의 기상년도 간에 약 2.1배의 차이를 나타내었다.

이상과 같이 기상조건이 가장 불리한 연도로 판단되는 '83년에 건물중량 손실률이 가장 높게 나타나고, 건조에 가장 많은 시간과 에너지가 소요됨을 알 수 있었으며, 가장 유리한 연도인 '91년도에는 반대의 현상이 나타남을 알 수 있었다. 또한 연도별 기상조건에 따라서 건조장치의 성능 지표가 되는 건물중량 손실률, 건조 소요시간 및 건조 소요에너지가 큰 폭으로 변함을 알 수 있었다. 따라서, 기상조건의 변화에 따라 건조 벼의 품질을 양호하게 유지하면서 건조 소요에너지를 절감할 수 있는 적절한 송풍방법의 확립이 무엇보다도 중요한 것으로 판단되었다.

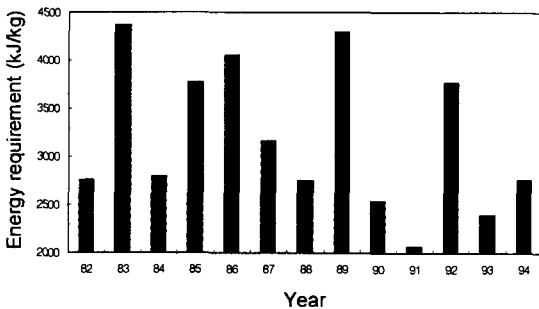


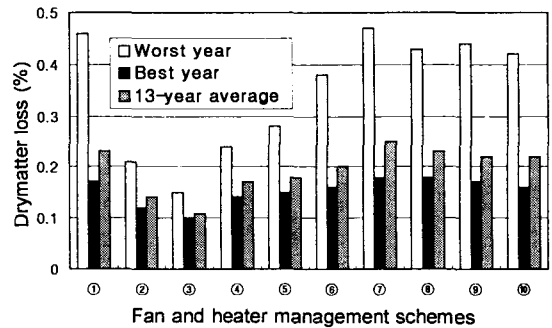
Fig. 9 Comparison of energy requirements for natural air drying of rough rice under different yearly weather conditions in Suweon area (no heat added, continuous fan operation).

다. 송풍 및 가온 방법의 비교

그림 10~14는 송풍기 및 가열기의 작동방법에 따른 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 건조에 가장 유리한 연도(1991)와 가장 불리한 연도(1983)의 기상조건하에서의 시뮬레이션 결과와 13년간의 평균치를 표시하였다.

1) 건물중량 손실률

그림 10은 건조 중 벼의 품질 손상 정도를 나타내는 건물중량 손실률을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 기상조건이 가장 나쁜 해의 경우가 기상조건이



(① Operating fan continuously with no supplemental heat, ② Operating fan continuously with 1.5°C heated air, ③ Operating fan continuously with 3.0°C heated air, ④ Operating fan continuously, and heating air with 1.5°C temperature rise only when RH > 85%, ⑤ Operating fan continuously, and heating air with 1.5°C temperature rise only when RH > 95%, ⑥ Operating fan continuously during 10 days from starting date and then operating fan when RH < 85%, ⑦ Operating fan only when RH < 75%, ⑧ Operating fan only when RH < 85%, ⑨ Operating fan only when RH < 90%, ⑩ Operating fan from 9 am to 9 pm)

Fig. 10 Comparison of drymatter losses of rough rice produced during natural air drying under the worst and best weather conditions, and 13-year average values for different fan and heater management schemes.

가장 양호한 해에 비하여 1.5~2.7배의 높은 값을 나타내고 있으나, 최악의 기상조건하에서 어떠한 운전방법도 건물중량 손실률이 0.5%를 상하지 않음으로서 10가지의 모든 운전방법이 품질 손상없이 성공적으로 벼를 상온통풍건조할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 건물중량 손실률이 기상조건이 최상인 연도에는 운전방법에 관계없이 아주 낮은 값을 나타

냈으나, 최악의 기상년도에는 상당히 높은 값을 나타내어 관리방법에 따라서 품질 손상의 위험이 대단히 높은 것으로 나타났다.

또한, 그림 10에서 기상조건이 가장 나쁜 해의 건물중량 손실률을 송풍 및 가온방법별로 비교해 보면, 그림에서와 같이 가열 연속송풍 방법(②~⑤)이 0.15 ~ 0.28%의 값을 나타낸 반면, 가열 없는 연속

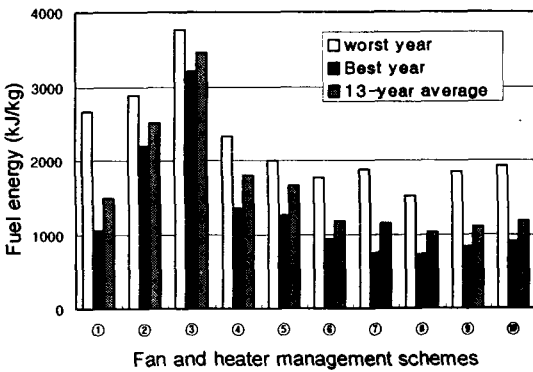


Fig. 11 Comparison of energy requirements under the worst and the best weather conditions, and 13-year average values for different fan and heater management schemes.

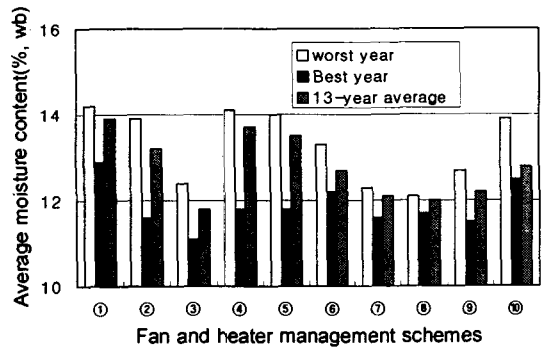


Fig. 13 Comparison of average moisture contents of bottom layers under the worst and the best weather conditions, and 13-year average values for different fan and heater management schemes.

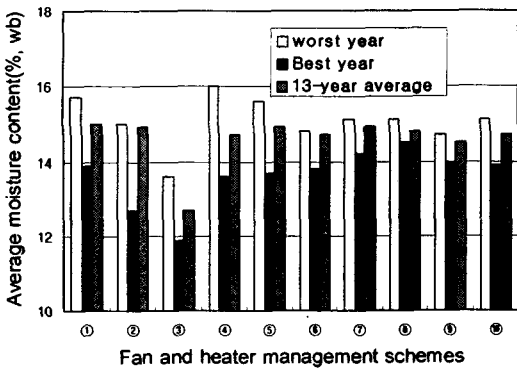


Fig. 12 Comparison of average moisture contents of all layers under the worst and the best weather conditions, and 13-year average values for different fan and heater management schemes.

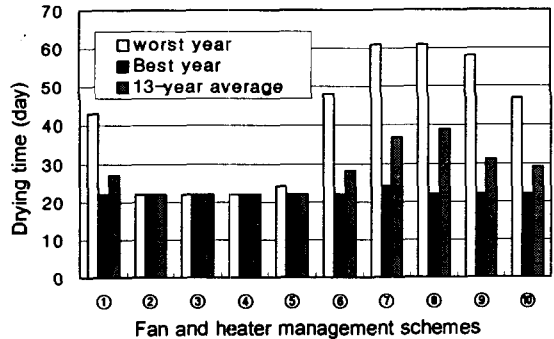


Fig. 14 Comparison of required drying time under the worst and the best weather conditions, and 13-year average values for different fan and heater management schemes.

송풍(①)과 간단 송풍방법(⑥ ~⑩)은 0.38~0.47%로 크게 나타났다.

이와 같이 간단 송풍 방법과 가열 없는 연속송풍 방법은 기상조건이 나쁜 경우에는 건물중량 손실률이 품질 손상의 기준이 되는 0.5%에 접근함으로써 관리 방법에 따라서 곡물 품질 손상의 우려가 대단히 높다고 판단할 수 있다. 따라서, 안전을 고려하여 건물중량 손실률을 0.4% 이하로 제한 한다면, 기상조건이 나쁜 때는 가열하여 연속 송풍하는 방법(②~⑤) 또는 높은 함수율의 벼가 반입되는 처음 10일 동안은 연속 송풍을 하고, 그 후에는 상대습도 85% 이하일 때만 송풍하는 방법(⑥)을 선택하는 것이 벼를 안전하게 건조할 수 있는 방법으로 판단되었다.

한편, 기상조건이 가장 좋은 연도의 경우는 모든 운전방법에서 건물중량 손실률이 0.18% 이하로 나타나 어떠한 운전방법을 선택하더라도 품질 손상의 위험은 없는 것으로 간주할 수 있었다.

13년간의 건물중량 손실률의 평균값은 전반적으로 낮은 수준을 나타내고 있으며, 상대습도 75% 이하일 경우에만 송풍하는 방법(⑦)에서 가장 높게 나타났다으며, 그 다음으로 ①, ⑧방법의 순으로 나타났다.

2) 소요에너지

그림 11는 운전방법별 소요에너지를 비교한 것이다. 최악의 기상년도의 소요에너지를 비교해 보면, 가열없이 연속 송풍하는 방법(①)과 상온의 공기를 가열하여 연속 송풍하는 방법(②~⑤)에서 상대적으로 높은 값(2,000~3,760kJ/kg)을 나타낸 반면, 간단 송풍방법(⑥~⑩)에서 상대적으로 낮은 값(1,500~1,900kJ/kg)을 나타내 소요에너지를 고려할 때 간단 송풍방법이 유리한 것으로 나타났다. 그러나, 앞에서 논의한 바와 같이 건물중량 손실률을 고려할 때 최악의 기상년도에 선택할 수 있는 수 있는 방법은 ②~⑥의 방법으로 제한된다. 이 방법들의 에너지를 비교해 보면 ⑥의 방법이 1,770kJ/kg으로 가장 낮게

나타났으며, ⑤의 방법(2,000kJ/kg), ④의 방법(2,330 kJ/kg), ②의 방법(2,880kJ/kg), ③의 방법(3,768kJ/kg)의 순으로 나타났다. 따라서, 기상조건이 나쁜 경우 곡물의 품질과 소요에너지를 동시에 고려할 때 가장 적절한 방법은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 처음 10일 동안은 연속 송풍을 하고 이 후에는 상대습도가 85% 이하일 때만 송풍하는 ⑥방법

2) 연속 송풍을 하되 상대습도가 85~90% 이상일 때만 1.5℃ 가열하여 송풍하는 ⑤와 ④의 방법

한편, 13년 평균 소요에너지를 보면 공기를 가열하여 송풍하는 방법(②~⑤)은 상대적으로 많은 에너지(1,650~3,464kJ/kg)가 소요된 반면, 공기를 가열하지 않고 간단 송풍하는 방법(⑥~⑩)이 상대적으로 적은 에너지(1,020~1,186kJ/kg)가 소요된 것으로 나타났다. 가장 적은 에너지가 소요되는 방법은 상대습도가 85~90% 이하일 때만 송풍기를 가동하는 간단 송풍방법(⑧, ⑨)으로, 이 방법은 연속 송풍방법(①)에 비하여 26~31%의 에너지가 절감되는 것으로 나타났다.

기상조건이 양호한 경우는 상대습도가 75~85% 이하일 경우에만 송풍하는 간단 송풍방법(⑦, ⑧)이 가장 유리한 것으로 나타났다.

3) 함수율

그림 12는 빈내 곡물의 최고함수율이 16.5%(w.b.)에 도달하였을 때의 빈내 전체 곡물의 평균함수율을 비교한 것이다.

기상조건이 최악인 연도의 경우를 보면, 공기를 3℃ 가열하여 연속 송풍방법(③)에서 평균함수율이 13.6%(w.b.)로 나타나 과건조 현상을 나타내었으나, 그 외의 모든 방법에서 평균함수율이 14.7~16.0%(w.b.)로 나타나 아주 적절한 수준으로 평가할 수 있었다.

기상조건이 최상인 연도를 보면, 상대습도가 75%와 85% 이하일 때만 송풍하는 간단 송풍방법(⑦, ⑧)은 각각 14.8%(w.b.)와 14.5%(w.b.)로 나타나 양호

한 수준을 나타내었으나 다른 모든 방법에서 평균함수율이 14%(w.b.) 이하로 나타나 과건조되는 것으로 나타났다. 특히 3.0℃와 1.5℃ 가열하여 연속 송풍하는 방법(③, ②)은 각각 11.9%(w.b.)와 12.7%로 나타나 크게 과건조되는 것으로 나타났다.

빈내 곡물의 평균함수율의 13년 평균치를 보면 3.0℃ 가열하는 방법(③)은 12.7%(w.b.)로 과건조되었으며, 여타 방법은 모두 14.7~15.1%(w.b.)로 적절한 수준을 나타내었다.

그림 13은 교반이 되지 않는 빈의 바닥층(20~30cm 층)의 평균 함수율을 나타낸 것이다. 기상조건이 최상인 연도에는 모든 방법에서 평균함수율이 12.5%(w.b.)로 나타나 과건조되었으며, 기상조건이 최악인 연도에는 가열하지 않고 연속 송풍하는 방법(①)과 연속 송풍을 하되 상대습도가 85% 및 90% 이상일 경우에 1.5℃ 가열하여 송풍하는 방법(④, ⑤)만이 14~14.2%(w.b.)로 비교적 적절한 수준을 나타내었다. 13년 평균함수율도 비슷한 경향을 나타내어 방법 ①과 방법 ④와 ⑤에서만 13.5%(w.b.) 이상의 함수율을 나타낸 반면, 그외 모든 방법은 과건조 되었다. 비교반층의 과건조를 줄이기 위해서는 연속 송풍방법이 가장 효과적이며, 연속하여 가열하는 방법과 간단 송풍방법이 가장 불리한 것으로 판단할 수 있으나, 비교반층이 전체 곡물량의 5% 정도에 불과하며 배출시에 혼합에 의한 함수율 조절을 고려할 때, 비교반층의 함수율은 적절한 송풍 및 가온방법의 결정에 크게 고려할 사항이 아닌 것으로 판단되었다.

4) 건조 소요일수

그림 14는 건조 소요일수를 송풍 및 가온방법별로 비교한 것이다. 10월 1일부터 벼가 매일 투입되어 10월 21일까지 계속되며, 투입된 모든 벼의 함수율이 16.5%(w.b.) 이하로 건조될 때를 건조 종료로 간주하였다.

그림에서와 같이 건조소요일수를 보면 기상조건

이 가장 불리한 연도의 경우, 가열 연속 송풍 방법(②~⑤)에서는 곡물 투입완료 1~3일 후에 건조가 완료되어 22~24일 소요되었으며, 그 외 방법에서는 33~61일이 소요된 것으로 나타났다.

그러나, 최상의 기상조건에서는 모든 방법에서 곡물 투입완료 1~3일 후에 건조가 완료되어 22~24일 소요되는 것으로 나타났다. 13년 평균 건조 소요일수는 상대습도가 75% 또는 85% 이하일 때에만 송풍하는 간단 송풍방법(⑦, ⑧)에서 38일 정도로 나타났으며, 그 외의 방법에서는 모두 31일 이하가 소요된 것으로 나타났다.

따라서, 건조 소요일수를 단축시키기 위해서는 상온의 공기를 가열하여 연속 송풍하는 방법(②~⑤)이 유리한 것으로 판단할 수 있다.

5) 적절한 송풍 및 가온방법

상은 통풍건조에서 적절한 송풍기 및 가열기 작동 방법을 선택하기 위해서는 벼의 품질(건물중량 손실률, 과건조), 건조 소요에너지, 건조 소요일수 및 기상상태 등을 종합적으로 고려해야 한다. 이상의 논의 결과를 종합하여 다음의 송풍기 및 가열기의 운전방법이 가장 적절한 것으로 판단되었다.

1) 기상조건이 양호한 경우(보통의 가을 기후)에는 상대습도가 85~90% 이하일 경우에만 가열 없이 송풍기를 가동하는 간단 송풍방법이 가장 효과적이었으며, 이 방법의 평균 소요에너지는 1,020~1,100 kJ/kg로 가열없이 연속 송풍하는 방법에 비하여 26~31%의 에너지가 절감되는 것으로 나타났으며, 평균 건물중량 손실률은 0.23%, 건조 소요일수는 31~39일로 나타났다. 상대습도에 의한 송풍기의 조작이 어려울 경우는 오전 9시에서 오후 9시까지만 송풍기를 가동하는 방법도 효과적인 것으로 나타났다.

2) 낮 동안에도 상대습도가 85% 이상으로 유지되는 등 기상조건이 불량할 경우에는 연속 송풍을 하되, 상대습도가 85~90% 이상일 때만 1.5℃ 가열하

여 송풍하는 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다.

3) 건조 소요일수를 단축할 필요가 있는 경우에는 기상조건에 관계없이 3)항의 방법이 유리하며, 1)항의 방법에 비하여 총소요에너지는 평균 11~20% 정도 증가하지만, 건조 소요일수가 평균 8~15일 정도 단축되는 것으로 나타났다.

6. 결론 및 요약

본 연구는 교반장치가 부착된 원형철제빈을 이용하여 벼를 누적혼합 상온통풍 건조할 때 적절한 송풍 및 가온방법을 시뮬레이션 방법으로 결정하기 위하여 수행되었다. 벼의 누적혼합 상온통풍 건조의 시뮬레이션 모델을 개발하고 실험을 통하여 이를 검증하였다. 검증실험에는 직경 11.22m, 용량 300톤 규모의 원형철제빈이 사용되었으며, 실험은 충북 진천읍 미곡종합처리장에서 1994년 10월 14일부터 11월 9일까지 수행되었다. 개별농가에서 수확된 벼가 1일 평균 7톤이 투입되었으며, 총 164톤이 투입되었다. 투입된 벼는 교반장치에 의해 혼합되면서 상온통풍 건조가 이루어졌으며, 외기 온습도, 함수율, 정압 및 송풍량을 측정하였다.

10가지의 송풍기 및 가열기의 운전방법을 가정하고, 시뮬레이션 방법에 의해 건물중량 손실률, 건조 소요시간, 건조 소요에너지, 함수율 변화를 상호 비교하여 최상의 방법을 결정하였다. 수원 지방의 13년간의 10월과 11월의 기상자료를 시뮬레이션에 이용하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 벼 퇴적층의 측정 정압은 송풍기의 성능곡선과 벼 퇴적층의 공기 저항곡선에서 구한 이론 정압보다 벼 퇴적깊이가 1.1m 이하일 때는 약 30% 높은 값을 나타낸 반면, 1.1m 이상의 퇴적고에서는 20% 정도 낮은 값을 나타내었다. 이에 따라 송풍량의 변화도 같은 경향을 나타내었다. 이에 따라 벼퇴층의 공기 저항식의 수정이 요구되었으며, 수정식은 벼 퇴적층

의 정압 강하를 잘 나타내었으며, 이에 의한 퇴적 깊이별 송풍량의 예측도 매우 만족스러운 결과를 나타내었다.

2. 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 예측한 비교반층과 교반층의 평균함수율의 건조시간별 예측치는 실험치와 상대오차가 5% 미만으로 나타났으며, 건조 종료후의 벼의 무게, 소요전력량 및 소요에너지의 예측치의 상대오차는 0.9~6%로 나타났다. 따라서, 개발한 시뮬레이션 모델은 함수율 변화와 소요에너지를 매우 만족스럽게 예측할 수 있었으며, 건조방법 및 건조비용 분석 등에 매우 유용하게 이용될 수 있는 것으로 판단되었다.

3. 벼의 품질(건물중량 손실률, 과건조), 건조 소요에너지, 건조 소요일수 및 기상상태 등을 종합적으로 고려할 때 적절한 송풍 및 가온 방법은 다음과 같이 나타났다.

1) 기상조건이 양호한 경우(보통의 가을 기후)에는 상대습도가 85~90% 이하일 경우에만 가열없이 송풍기를 가동하는 간단 송풍방법이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이 방법의 평균 소요에너지는 1,020~1,100kJ/kg으로 가열없이 연속송풍하는 방법에 비하여 26~31%의 에너지가 절감되는 것으로 나타났으며, 평균 건물중량 손실률은 0.23%, 건조 소요일수는 31~39일로 나타났다. 상대습도에 의한 송풍기의 조작성이 어려울 경우는 오전 9시에서 오후 9시까지만 송풍기를 가동하는 방법도 효과적인 것으로 나타났다.

2) 낮 동안에도 상대습도가 85% 이상으로 유지되는 등 기상조건이 불량할 경우에는 연속송풍을 하되, 상대습도가 85~90% 이상일 때만 1.5℃ 가열하여 송풍하는 방법이 가장 적합한 것으로 나타났다.

3) 건조소요일수를 단축할 필요가 있는 경우에는 기상조건에 관계없이 2)항의 방법이 유리하며, 1)항의 방법에 비하여 총소요에너지는 평균 11~20% 정도 증가하였지만, 건조소요일수가 평균 8~15일 정도 단축되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 고헌균, 금동혁외 7인. 1994. '95 농협 미곡종합처리장 설계기준. 농협중앙회.
2. 금동혁. 1998. 원형철제빈을 이용한 벼의 건조 및 저장 핸드북. 경기지역 컨소시엄총서2.
3. 금동혁, 박선태. 1996. 벼 상온통풍건조의 최소 풍량비에 관한 연구. 한국농업기계학회지 21(1).
4. 금동혁, 박춘우. 1997. 곡류 및 벼싹류의 평형함수율 및 박층 건조방정식에 관한 연구. 한국농업기계학회지 22(1).
5. 금동혁. 1989. 습공기의 성질 계산을 위한 컴퓨터 프로그램. 한국농업기계학회지 13(3).
6. 신흥기업사. 1994. 교반식 건조저장빈의 사용설명서.
7. Lu, F. M. 1987. Simulation model for forced aeration of rice. Ph.D theses, UCD.
8. Murata, S. 1976. The formulae of aeration and ventilation for storage room of farm products. JSAM 38(2).
9. Smith, E. A. 1983. Microcomputer program for interactive evaluation of the control options for near ambient driers. Dept Note SIN/393, Scot Inst agric Engng, Penicuit.
10. Thompson, T. L. 1972. Temporary storage of high moisture shelled corn using continuous aeration. Trans. ASAE 15.