

## 벼 상온통풍건조의 최소풍량비에 관한 연구

# Minimum Specific Airflow Rate Requirements for Natural Air Drying of Rough Rice in Korea

금동혁\*      박선태\*

정희원      정희원

D.H. Keum   S. T. Park

### ABSTRACT

The purposes of this study were to develop a simulation model and to determine minimum specific airflow rate requirements for natural air drying of rough rice in Korea. A simulation model was developed considering energy and mass balances within grain bed, drying and rewetting rates, and hysteresis effect between sorption and desorption isotherms. As the results of validation test, the moisture contents predicted by the model agreed very well with the actual data. The criteria for determining minimum specific airflow rate requirements was that the top 10cm layer in the bin be dried to a moisture content below 16 percent wet basis with less than 0.5% drymatter decomposition. The minimum specific airflow rate requirements in 13 locations of Korea were presented based on the worst one among the past 7 to 13-year weather data. These requirements were also presented for all the combinations of three harvest dates and four harvest moisture contents. Specific airflow rate requirements seemed to be half by each 2 percent reduction in moisture content from 24 percent. As harvest date was delayed by 10 days from October 1, these requirements were reduced by about 20 to 40 percent.

**주요 용어(Key Words)** : 최소풍량비(Minimum Specific Airflow Rate), 상온통풍건조(Natural Air Drying)

### 1. 서론

상온통풍건조는 열풍건조에 비하여 곡물의 품질을 효과적으로 보존할 수 있고, 건조 소요에너지가 절감되며, 장치가 간편하여 관리가 용이한 장점이 있다. 그러나, 상온통풍건조는 기상조건

에 절대적인 영향을 받기 때문에 지역의 기상여건을 잘 분석하여 적절한 설계와 건조작업을 수행하지 않으면 실패할 확률이 높다.

상온통풍건조에 영향을 주는 요인은 風量比, 含水率, 穀物堆積깊이, 곡물 퇴적방법, 송풍기와 가열기 작동방법 및 기상조건 등을 들 수 있다.

\* 성균관대학교 생물기전공학과

이들 요인 중에서 기상조건에 가장 큰 영향을 받으면서 건조장치 설계와 운영방법의 결정에 기본이 되는 요인이 풍량비이다. 상온통풍건조를 성공적으로 수행하기 위해서는 일정 한계 이상의 풍량비가 확보되어야 한다. 곡물의 품질손상 없이 상온통풍건조를 성공적으로 수행하는데 요구되는 최소의 풍량비를 最小風量比 또는 安全限界風量比라고 한다. 최소풍량비는 곡물의 초기함수율과 기상조건에 따라 적절한 값을 결정하여야 하며, 어떠한 조건하에서도 최소풍량비가 확보되지 않으면 건조작업은 실패하게 된다. 따라서 상온통풍 건조장치의 설계와 운영방법의 결정을 위해서는 최소풍량비의 분석이 무엇보다도 우선되어야 한다.

최소풍량비는 장기적인 기상자료를 근거로 결정하여야 하므로 실험적인 방법으로 최소풍량비를 결정하기는 어려우며 일반적으로 시뮬레이션 방법을 이용한다. 본 연구의 목적은 벼의 상온통풍 건조 시뮬레이션 모델을 개발하여 이를 건조 실험을 통하여 검증하고, 우리나라 13개 지역의 장기간의 기상자료를 근거하여 시뮬레이션 방법으로 지역, 수확시기 및 초기 함수율별로 최소풍량비를 결정하는데 있다.

## 2. 실험 및 분석방법

상온통풍건조 시뮬레이션 모델에 의한 함수율 예측 정밀도를 검증하기 위한 건조 실험방법 및 최소풍량비 분석방법은 다음과 같다.

### 가. 시뮬레이션 모델 검증실험

상온통풍건조 시뮬레이션 모델의 검증을 위하여 상온통풍 건조실험을 수행하였다. 실험은 1994년 10월 7일부터 17일까지 수행하였다. 실험에 사용된 벼는 추청벼였다. 실험에 사용된 빈은 직경 60cm, 높이 120cm의 원통형으로 하였으며, 철판으로 제작하고 벽체를 단열하였다. 원통형 빈의 바닥에서 20cm 높이에 다공의 통기마루를 설치하고 벼를 약 110cm 깊이로 퇴적하였다. 통

기마루로부터 15, 30, 75, 105 cm의 높이에 각각 시료 채취공을 설치하였다. 실험장치를 실내에 설치하고 창을 모두 개방하여 실내의 공기조건이 실외의 공기조건과 같도록 하였다. 건조 실험장치는 송풍기로 유입되는 공기의 건구온도와 상대습도, 빈 통기마루 하부의 공기층만실의 건구온도를 자기온습도계를 이용하여 연속 측정하여, 곡물로 유입되는 공기의 상대습도를 습공기 성질을 계산하는 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산하였다. 건조 실험기간 동안의 곡물층 유입 공기의 평균 건구온도는 16.3°C, 평균 상대습도는 75.6%이었다. 24시간 간격으로 시료를 채취하여 함수율을 측정하였다. 빈 하부의 공기층만실의 정압을 측정하여 풍량비를 계산하였으며, 풍량비는 2.7 cmm/m<sup>3</sup> 이었다.

### 나. 최소풍량비 분석방법

#### 1) 대상지역

최소풍량비 분석 대상지역은 그림1과 같이 도별로 균일하게 선정하였으며, 경기도 1개지역, 강원도 4개지역, 충북, 충남, 전북, 전남에서 각각 1개 지역, 경북 2개지역, 경남 2개 지역등 총 13개

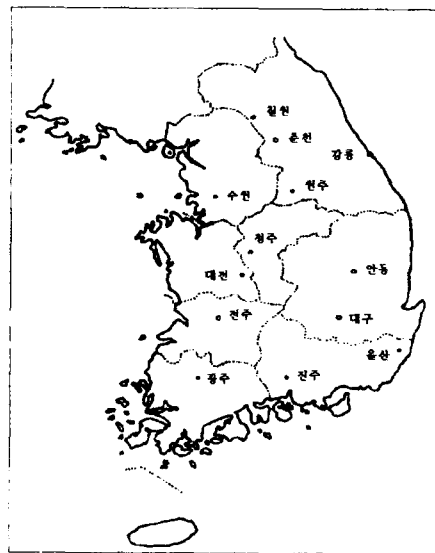


Fig. 1 Locations of weather data.

지역을 선정하였으며, 7~13년의 기상자료를 분석에 이용하였다. 도별 대상지역과 기상자료 분석년도는 표1과 같다. 기상자료는 기상대에서 이용 가능한 자료에 국한하였으며 10월, 11월 및 12월의 3시간 단위의 대기온도와 상대습도의 기상대 관측자료를 이용하였다.

Table 1. Locations and periods of weather data

Locations		Periods	Durations (years)
Kyungki	Suwon	1982 - 1994	13
Kangwon	Ch'unch'on	1982 - 1994	13
	Ch'orwon	1988 - 1994	7
	Wonju	1985 - 1994	10
	Kangnung	1982 - 1994	13
Ch'ungbuk	Ch'ongju	1982 - 1994	13
Ch'ungnam	Taejon	1982 - 1994	13
Ch'onbuk	Ch'onju	1982 - 1994	13
Ch'onnam	Kwangju	1982 - 1994	13
Kyungbuk	Andong	1983 - 1994	12
	Daegu	1982 - 1994	13
Kyungnam	Ulsan	1982 - 1994	13
	Chinju	1982 - 1994	13

2) 분석방법

분석 년도중에서 비의 상온통풍건조에 가장 불리한 연도의 기상조건하에서 성공적으로 상온통풍건조를 수행할 수 있는 최소의 풍량을 최소풍량비로 하였다. 상온통풍건조에서 최상 10cm 곡물층의 비가 16%(w.b.)까지 건조되는 동안 최상층의 건물중량 손실율이 0.5%를 초과할 때 곡물이 손상되는 것으로 간주하여 건조작업이 실패한 것으로 가정하였다. 분석에 이용된 비의 퇴적깊이는 3.0m이었으며, 최상 10cm 곡물층은 전체의 3.3%에 해당하는 곡물량이다. 시뮬레이션 프로그램에 의하여 최상 10cm층의 비가 16%(w.b.)까지 건조되는 동안의 최상층의 건물중량 손실율을 구하고, 이 건물중량 손실율을 풍량의 함수로 나타낸 건물중량 예측방정식을 구

하였다. 건물중량 손실율이 0.5%가 되는 예측방정식의 근을 Newton-Raphson방법으로 구하여, 이를 최소풍량비로 하였다. 먼저 비의 상온통풍건조에 가장 불리한 연도를 찾아 내기 위하여 초기 함수율 24% 비에 대한 최소풍량비를 각 지역에 대하여 연도별로 구하고, 최소풍량비가 가장 큰 값을 나타내는 연도를 기상조건이 가장 불리한 연도로 간주하였다. 이와 같이 선택한 가장 불리한 연도의 기상자료를 이용하여 지역별, 초기 함수율별, 수확 시작일별로 최소풍량비를 분석하였다.

3. 상온통풍건조 시뮬레이션 모델링

가. 시뮬레이션 모델

본 연구에 이용한 상온통풍건조 모델의 기본 개념은 곡물의 후층을 많은 박층으로 나누고 각각의 박층에서 일어나는 변화를 연속적으로 계산하여 조합하는 방법이다. 후층을 n개의 박층으로 나누고 I번째 박층에서 일어나는 변화를 고려해 보자. I층 곡물의 함수율을  $M_0$ , 곡온을  $\theta_0$ , I층에 유입되는 공기의 건구온도를  $T_0$ , 절대습도를  $H_0$ 라고 하면, 건조가 진행됨에 따라 I층 곡물의 함수율은 감소하여  $M_1$ 가 되며, 곡온은 상승하여  $\theta_1$ 가 된다. I층에서 배출되는 공기의 상대습도는 증가하고 온도는 하강하게 된다. I층에서 배출된 공기는 I+1층의 유입공기가 된다. 이러한 과정을 전체 곡물층에 대하여 연속적으로 적용하면 후층건조를 해석할 수 있다. 곡물층에서 배출되는 공기의 온도와 곡온이 평형을 이룬다고 가정하면, I층에서 기지항은  $M_0, \theta_0, H_0$  및  $T_0$ 가 되며 미지항은 건조 후의 함수율  $M_1$ , 배출공기의 절대습도  $H_1$ , 배출공기의 건구온도  $T_1$ 가 되므로 기본적으로 3개의 방정식이 요구된다.

3개의 방정식은 I층에 대한 에너지 및 물질평형과 곡물의 건조속도를 나타내는 박층건조방정식을 도입하여 구성하였다.

4시간 동안 4x두께의 곡물층에 대한 에너지 평형을 고려하면,

$$(c_o + c_w H_o) T_o + R(1 + M_o)(c_p + c_w M_{ow}) \theta_o \\ = (c_o + c_w H_i) T_f + R(1 + M_f)(c_p + c_w M_{fw}) T_f + \\ (H_f - H_o) h_{fg} \quad (1)$$

여기서,

$c_o$  : 건공기의 비열 (1.007 kJ/kg.K)

$c_w$  : 수증기의 비열 (1.876 kJ/kg.K)

$c_p$  : 곡물 건물의 비열 (3.49 kJ/kg.K)

$c_w$  : 곡물중의 물의 비열 (1.2692 kJ/kg.K)

$G_a$  : 건공기 질량유동율 (kg/hr.m<sup>2</sup>)

$h_{fg}$  : 곡물수분의 증발잠열(kJ/kg)

$H_o, H_i$  : 유입 및 배출공기의 절대습도(kg/kg)

$M_o, M_f$  : 건조전후의 함수율(dec., d.b.)

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

$$R = \frac{\rho_p \Delta x}{G_a \Delta t}$$

$T_o, T_f$  : 유입 및 배출공기의 건구온도(°C)

$\Delta t$  : 시간증분(hr)

$\theta_o$  : 건조전 곡온(°C)

$\rho_p$  : 곡물의 乾物 産物密度(kg/m<sup>3</sup>)

식(1)의 왼쪽 항은 유입공기와 건조전 곡물의 엔탈피의 합이며, 오른쪽 항은 배출공기의 엔탈피, 건조후 곡물의 엔탈피 및 곡물 수분 증발잠열의 합이다.  $\Delta x$ 층의 건조속도는 다음 식(2)의 벼의 박층건조방정식(Wang, 1978)을 이용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad (2)$$

여기서,

$$k = 0.168 + 0.007602 \left( \frac{T_o + \theta_o}{2} \right) \\ - 0.1572 RH_o$$

$M$  : 함수율(dec., d.b.)

$M_e$  : 평형함수율(dec., d.b.)

$RH_o$  : 유입공기의 상대습도(dec.)

$t$  : 건조시간(hr)

식(2)는 벼의 박층건조속도를 나타내며, 평형 함수율은 방습(건조)과 흡습이 일어날 경우를 동시에 고려하였으며, 흡습속도는 건조속도의 50%로 간주하였다(1987, Lu). 벼의 방습 및 흡습평형함수율은 다음의 (3)식과 (4)식을 이용하였다(금, 1994)

$$M_{ed} = 0.409396 - 0.059794 \ln \{-1.987 \\ (T_e + 56.190) \ln (RH)\} \quad (3)$$

$$M_{es} = 0.397048 - 0.053204 \ln \{-1.987 \\ (T_e + 123.297) \ln (RH)\} \quad (4)$$

여기서,

$M_{ed}$  : 방습평형함수율 (dec., d.b.)

$M_{es}$  : 흡습평형함수율 (dec., d.b.)

$RH$  : 상대습도 (dec.)

$T_e$  : 평형온도(°C)

배출공기의 절대습도를 계산하기 위하여  $\Delta x$ 층 곡물에 대한 수분평형을 고려하면,

$$H_f = H_o + R(M_o - M_f) \quad (5)$$

식(2)와 식(3)을 이용하여  $M_f$ 와  $H_f$ 를 계산할 수 있으며, 식(1)을  $T_f$ 에 관하여 풀면 배출공기의 온도를 계산할 수 있다.  $T_f$ 는 다음 식(6)과 같이 표시된다.

$$T_f = \frac{(c_o + c_w H_o) T_o + R(1 + M_o)(c_p + c_w M_{ow}) T_o - (H_f - H_o) h_{fg}}{c_o + c_w H_f + R(1 + M_f)(c_p + c_w M_{fw})} \quad (6)$$

곡물수분의 증발잠열  $h_{fg}$ 는 식(3)의 평형함수율방정식으로부터 Othmer방법을 이용하여 유도하였으며, 다음 식(7)과 같이 표시되었다.

$$h_{fg} = (2502.5 - 2.386 T_o) (1 + 1.2356 \exp \\ (-0.167255 M_o)) \quad (7)$$

건물중량 손실율은 다음 식(8)의 Murata 등(1976)의 저장벼의 호흡식을 이용하였다.

$$HEAT = \exp(-C_1 T^2 + C_2 T M + C_3 M^2 + C_4 T + \\ C_5 M + C_6) \quad (8)$$

여기서,

HEAT : 호흡열 (kcal/hr.kg-drymatter)

- T : 곡온(°C)
- M : 함수율(%w.b.)
- C<sub>1</sub> = -0.111339E-02
- C<sub>2</sub> = 0.111532E-02
- C<sub>3</sub> = -0.5820E-02
- C<sub>4</sub> = 0.08708
- C<sub>5</sub> = 0.4147
- C<sub>6</sub> = -10.85623

건물 1kg 중에서 180g이 분해하면 677.2 kcal의 열이 발생하므로 1kcal/kg의 호흡열의 발생은 0.2658g/kg의 건물분해 즉 0.02658 %의 건물중량손실율을 의미하게 된다. 이에 근거하여 건물중량 손실율( $\Delta DML, \%$ )은 식(8)의 호흡열 방정식을 다음 식(9)로 수정하여 사용하였다.

$$\Delta DML = 0.02658 \text{ HEAT } \Delta t \quad (9)$$

여기서,  $\Delta DML$ 은 시간중분  $\Delta t$ 시간 동안의 건물중량 손실율이다. 상온통풍건조 시뮬레이션 프로그램에 건물중량 손실율을 계산하는 부프로그램이 포함되어 있으며, 각 시간중분별로 건물중량손실율을 계산하고 이를 총 건조시간에 걸쳐서 누적하여 총 건물중량 손실율을 계산하였다.

#### 나. 컴퓨터 프로그램

컴퓨터 프로그램은 Fortran77 언어로 작성하였다. 3시간 단위의 기상자료(건구온도, 상대습도),공기와 곡물의 열 및 물리적 특성, 풍량비가 입력된다. 초기곡온, 유입공기의 건구온도 및 상대습도로 식(2), 식(3) 및 식(4)를 이용하여 건조 후의 함수율을 계산한다. 식(5)을 이용하여 배출공기의 절대습도를 계산하고, 식(6)과 식(7)을 이용하여 배출공기의 건구온도를 계산한다. 습공기의 성질을 계산하는 부프로그램을 이용하여 배출공기의 상대습도를 계산한다. 배출공기의 건구온도와 상대습도가 다음 곡물층의 유입공기가 된다. 곡물층의 미소두께는 0.1m로 하였다.

시뮬레이션 프로그램은 주프로그램과 습공기의 성질을 계산하는 부프로그램, 건물중량 손실율을 계산하는 부프로그램으로 구성되어 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 가. 시뮬레이션 모델의 검증

표2는 시뮬레이션에 의한 예측 평균함수율과 실험치를 비교한 것이다. 평균함수율의 실험치와 예측치 간의 최대오차는 0.5%(w.b.)로 매우 만족스러운 결과를 나타내었다. 전반적으로 예측치가 실측치보다 약간 낮은 값을 나타내었다.

Table 2. Comparison of experimental and predicted average moisture contents

Drying time (hr)	Actual moisture content(%w.b.)	Predicted moisture content(%w.b.)	Difference (Actual-Predicted)
24	21.5	21.1	0.4
72	19.7	19.2	0.5
120	18.5	18.4	0.1
144	17.8	18.0	-0.2
168	17.6	17.4	0.2
192	16.8	16.8	0.0
216	15.2	14.7	-0.5

표3은 각 층별의 함수율을 비교한 것이다. 실측치와 예측치 간의 최대오차는 0.9%(w.b.)로 나타났다. 기상조건에 민감한 최하층에서 오차가 크게 나타났으며 상층부로 갈수록 오차는 감소하였다. 중간층의 최대오차는 0.7%(w.b.), 최상층부의 최대오차는 0.4%(w.b.)로 나타났다. 따라서, 각 층별의 함수율의 예측도 매우 만족스러운 결과로 판단되며, 특히 최소풍량비는 품질손상이 가장 먼저 일어나는 상층부 곡물의 상태에 의하여 결정되므로 상층부의 함수율 예측이 매우 중요한 점을 고려할 때, 상층부로 갈수록 오차가 감소하여 상층부의 최대오차가 가장 작은

Table 3. Comparison of experimental and predicted moisture contents at each layer

Drying time (hr)	Bottom layer (30cm)			Middle layer (75cm)			Top layer (105cm)		
	A	P	A-P	A	P	A-P	A	P	A-P
24	20.6	19.8	0.8	21.3	21.4	-0.1	21.7	21.3	0.4
72	16.4	15.9	0.5	21.3	21.2	0.1	21.6	21.3	0.3
120	15.6	15.9	-0.3	18.1	17.7	0.4	21.7	21.3	0.4
144	15.5	16.0	-0.5	17.8	17.5	0.3	21.6	21.3	0.3
168	15.2	16.1	-0.9	16.4	16.2	0.2	21.3	21.2	0.1
192	15.7	15.8	-0.1	15.7	16.4	-0.7	19.4	19.5	-0.1
216	15.7	15.9	-0.2	16.0	16.5	-0.5	17.2	17.2	0.0

A : Experimental values P : Predicted values

0.4%(w.b.)로 나타남은 매우 만족스러운 결과로 판단된다.

나. 평균기상조건

표4는 벼의 수확 및 건조시기인 10월과 11월

의 지역별 평균 외기 온도와 상대습도를 나타낸 것이다. 10월의 평균 외기 온도는 춘천, 철원, 원주 등의 강원도 지방과 경북의 북부에 위치한 안동지방이 11.1 ~ 12.8 °C의 낮은 분포를 나타내었으며, 수원, 청주, 대전 지방 등 중부지방이

Table 4. Average ambient air temperatures and relative humidities during the harvesting and drying season

Locations	October				November				Periods
	Temperature(°C)		Relative Humidity (%)		Temperature(°C)		Relative Humidity (%)		
	Aug.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	Avg.	S.D.	
Ch'unch'on	12.2	5.4	74.0	20.1	5.2	5.4	73.3	20.2	1982-1994
Ch'orwon	11.1	5.9	71.7	24.0	4.6	6.1	71.5	22.2	1988-1994
Kangnung	15.0	4.3	63.2	18.4	9.4	4.8	55.8	20.0	1982-1994
Wonju	12.2	5.5	75.0	20.6	5.2	5.8	73.3	20.2	1985-1994
Suwon	13.4	5.2	72.7	19.9	6.6	5.5	70.3	19.7	1982-1994
Ch'ongju	13.4	5.5	73.1	21.4	6.5	5.6	73.4	20.5	1982-1994
Taejon	13.9	5.1	71.8	20.5	7.4	5.4	71.9	19.9	1982-1994
Ch'onju	14.6	5.1	71.0	19.9	8.3	5.4	71.3	18.8	1982-1994
Kwangju	15.4	4.7	70.4	18.6	9.1	5.0	71.4	18.5	1982-1994
Andong	12.8	5.4	73.4	21.9	6.1	5.6	69.9	22.7	1983-1994
Daegu	15.4	4.8	66.3	19.3	8.9	5.2	63.9	19.5	1982-1994
Ulsan	15.8	4.5	68.2	19.1	9.9	5.2	62.0	20.8	1982-1994
Chinju	14.4	5.5	74.6	21.3	8.0	5.8	71.8	22.3	1982-1994

Avg. : Average ambient air temperature

S.D. : Standard deviation

13.4 ~ 13.9 °C의 중위의 분포를, 전주, 광주, 대구, 울산, 전주 등 전남북, 경북 남부 및 경남 지방 등 남부 지방과 강릉 지방이 14.4 ~ 15.8 °C의 높은 분포를 나타내었다.

11월의 평균기온도 10월과 비슷한 지역별 양상을 보이고 있으며, 10월에 비하여 6°C 정도 낮은 분포를 나타내고 있다. 평균 상대습도는 10월의 경우 강릉, 대구, 울산 지방이 63~68%, 기타 지역은 71~75%를 나타내었으며, 11월의 경우는 10월과 비교하여 7%이하의 낮은 분포를 나타내었다.

다. 최소풍량비

1) 건물중량 손실을 예측방정식

그림 2는 1983년 수원지방에서 24%(w.b.)의 벼를 16%(w.b.)까지 건조할 경우 최상 10cm 층의 건물중량 손실율을 풍량비별로 나타내고, 6차의 예측다항식과 비교한 것이다. 건물중량 손실율은 풍량비의 6차의 다항식으로 대단히 정확하게( $r^2 = 0.9981$ ,  $rmse = 0.007$ ) 표시 되었다. 대상지역과 기상년도에 관계없이 건물중량 손실

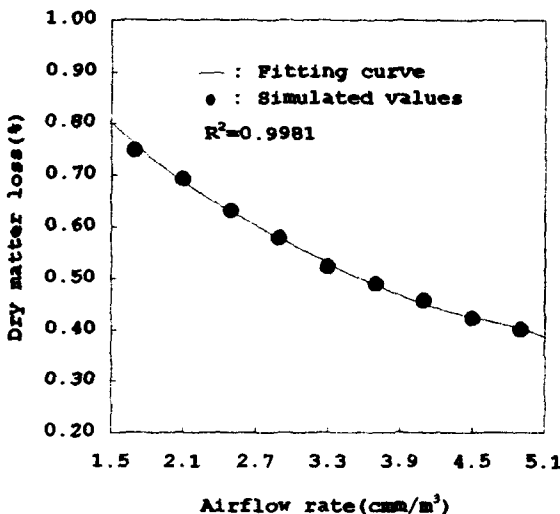


Fig. 2 Drymatter loss prediction equation as a function of specific airflow rates for Suwon area (initial moisture content : 24%, w.b., harvest date : Oct.1).

율은 풍량비의 6차다항식으로 아주 만족스럽게 표시할 수 있었다. 최소풍량비를 계산하기 위한 컴퓨터 프로그램에서 건물중량 손실율이 0.5% 전후로 나타나는 풍량비의 범위를 정하고, 지역 및 연도별 기상자료를 이용하여 풍량비별로 건물중량 손실율을 계산한 다음 이를 6차의 다항식으로 나타내고, 이 다항식에서 건물중량 손실율이 0.5%일 때의 근을 Newton-Raphson 방법으로 구하여 최소풍량비로 하였다.

2) 최악 기상년도

분석 연도 중에서 기상조건이 벼의 상온통풍 건조에 가장 불리한 연도를 찾아내기 위하여 초기함수율 24%(w.b.) 벼를 건조할 때의 연도별 최소풍량비를 계산하였으며, 최소풍량비가 가장 큰 값을 나타내는 연도를 기상조건이 가장 불리한 연도로 선택하였으며, 연도별 최소풍량비는 표 5a 및 표 5b와 같다. 최악의 기상년도는 춘천과 수원이 1983년도, 철원 1994년도, 원주 1986년도, 청주, 대구, 전주, 광주, 안동, 울산 및 대구가 1985년도, 전주가 1982년도로 나타났다.

최소풍량비의 연도간의 차이는 매우 크게 나타났다. 수원지방의 경우 기상조건이 가장 불리한 1983년도의 최소풍량비는 약 3.6cm³/m³으로 기상조건이 가장 양호한 1989년도의 최소풍량비 1.8cm³/m³의 2배에 달하고 있다. 다른 지방도 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 그림3은 수원 지방에서 초기함수율 24%(w.b.)의 벼를 3m 깊이로 퇴적하고 3 cm³/m³의 풍량비로 상온통풍 건조할 경우 평균 함수율 변화를 연도별로 나타낸 것이며, 그림4는 최상층의 건물중량 손실율의 변화를 연도별로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 기상조건이 가장 양호한 1989년도에는 평균 16%까지 건조되는 데 220시간이 소요되었으며 이 때의 최상층의 건물중량 손실율은 0.3%로 나타난 반면, 기상조건이 가장 불리한 1983년도에는 건조소요시간은 480시간, 건물중량 손실율은 0.55%로 나타났다. 건조속도가 가장 느린 1983, 1985 및 1986년도에 건물중량 손실율은 가장 크

Table 5a. Minimum specific airflow rate requirements for natural air drying of short grain rough rice of 24%,w.b. moisture content under different year weather conditions (cmm/m<sup>3</sup>, harvest date : Oct.1)

Locations Year	Ch'unch'on	Ch'orwon	Kangnung	Wonju	Suwon	Ch'ongju	Taejon
1982	2.465	—	2.134	—	2.548	2.070	2.880
1983	3.386	—	2.165	—	3.555	2.975	3.608
1984	1.754	—	1.563	—	2.234	1.939	2.052
1985	2.746	—	2.007	3.215	3.493	3.866	3.611
1986	2.222	—	2.476	3.410	2.927	3.308	2.829
1987	1.923	—	1.957	2.368	2.475	2.671	2.501
1988	1.694	1.562	1.895	1.816	2.171	2.030	1.746
1989	2.097	1.774	1.802	1.957	1.769	2.219	1.795
1990	2.334	1.630	2.100	1.873	2.000	2.307	1.992
1991	1.900	1.493	1.851	2.246	1.825	1.645	1.824
1992	2.883	2.263	2.653	2.333	2.810	2.303	2.455
1993	1.819	1.256	1.918	1.920	1.907	1.903	2.042
1994	3.284	2.561	2.064	2.674	2.224	2.224	2.222
Worst Year	1983	1994	1992	1986	1983	1985	1985

Table 5b. Minimum specific airflow rate requirements for natural air drying of short grain rough rice of 24%,w.b. moisture content under different year weather conditions (cmm/m<sup>3</sup>, harvest date : Oct.1)

Locations Year	Chonju	Kwangju	Andong	Daegu	Ulsan	Chinju
1982	2.956	3.316	—	2.032	3.124	4.030
1983	3.284	3.072	3.449	2.596	3.286	3.516
1984	2.139	2.471	2.003	2.172	2.215	2.415
1985	3.289	3.944	3.533	3.449	3.342	3.966
1986	3.028	2.952	2.010	2.505	3.135	3.619
1987	2.548	2.480	2.439	2.084	2.604	2.704
1988	1.792	2.009	1.815	1.829	2.276	2.155
1989	1.838	1.942	2.080	1.929	1.912	2.424
1990	2.062	2.239	2.549	1.933	2.646	2.971
1991	1.713	1.875	1.929	1.790	2.293	2.148
1992	2.243	2.240	2.972	2.618	2.857	2.469
1993	1.838	2.079	1.720	1.927	1.739	1.797
1994	2.255	2.016	2.072	1.635	1.923	2.041
Worst Year	1985	1985	1985	1985	1985	1982



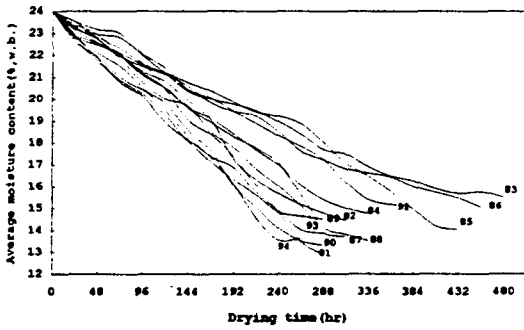


Fig. 3 Comparison of average moisture content changes under different year weather conditions in Suwon area (initial moisture content : 24%,w.b., specific airflow rate : 3.0cmm/m<sup>3</sup>, bed depth : 3m).

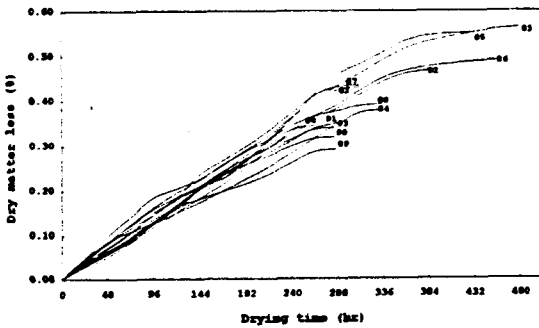


Fig. 4 Comparison of dry matter loss changes at top 10cm layer under different year weather conditions in Suwon area ( initial moisture content : 24%,w.b., specific airflow rate : 3.0cmm/m<sup>3</sup>, bed depth : 3m).

계 증가하였으나, 다른 연도에는 건조속도와 건물중량 손실율의 변화 경향이 반드시 일치하지는 않았다.

3) 최소풍량비 최소풍량비는 지역, 초기함수율 및 수확시기에 따라서 다르게 된다. 표 6a 및 표 6b는 분석 기상년도 중에서 기상조건이 가장 불리한 연도의 기상 조건하에서 벼를 상온통풍 건조할 경우의 지역, 초기함수율 및 수확시기에 따른 최소풍량비를 나타낸 것이다.

지역별 최소풍량비를 비교해 보면, 초기함수율 24%, 수확일 10월 1일인 경우 철원지역이 2.561 cmm/m<sup>3</sup>로 가장 낮은 값을 나타내었으며, 진주지역이 4.030 cmm/m<sup>3</sup>로 가장 높은 값을 나타내었다. 철원 및 진주 지방의 최소풍량비 분석연도인 1994년 및 1982년의 10월의 평균 상대습도를 비교해 보면, 철원 지방(75.1%)이 진주 지방(79.6%)보다 4.5%의 낮은 값을 나타내었으며, 평균기온은 철원 지방(12.1℃)이 진주 지방(14.9℃)보다 2.8℃ 낮은 값을 나타내었다. 이와 같이 진주 지방은 철원 지방에 비하여 고습하고 기온이 높은 데 기인하여 최소풍량비가 크게 나타난 것으로 판단할 수 있다. 그림5와 그림6은 각각 철원과 진주 지방의 최소풍량비 분석년도의 기상조건에서 초기 함수율 24%(w.b.)의 벼를 3.0m 깊이로 퇴적하고 3.0 cmm/m<sup>3</sup>의 풍량비로 건조할 경우 평균 함수율과 최상 10cm층의 건물중량 손실율의 변화를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 철원 지방에서는 평균 16%(w.b.)까지 건조에 290시간이 소요된 반면 진주 지방에서는 390시간 건조 후 평균 함수율이 16%(w.b.)에 접근하여 건조와 흡습을 반복하는 현상을 나타내고 있으며, 이 때의 건물중량 손실율은 철원 지방에서 0.39%, 진주 지방에서 0.61%를 나타냄으로서 철원 지방의 기상조건이 상대적으로 양호한 것으로 판단할 수 있다.

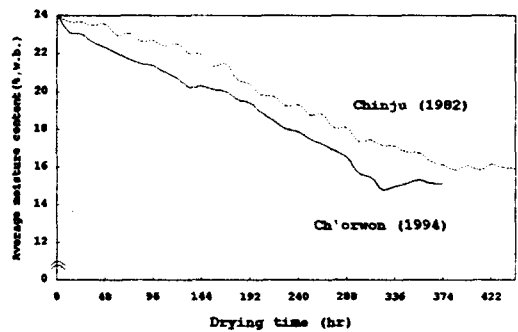


Fig.5 Comparison of average moisture content changes under the worst weather conditions in Ch'orwon and Chinju area (initial moisture content : 24 %w.b. , specific airflow rate : 3.0 cmm/m<sup>3</sup>, bed depth : 3.0m).

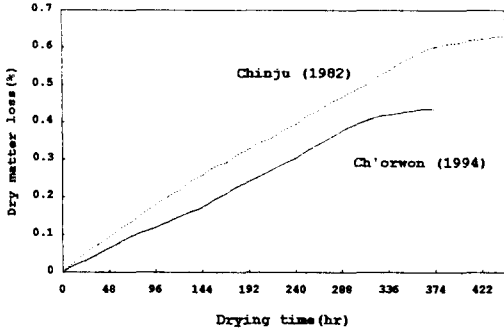


Fig.6 Comparison of dry matter loss changes at top 10cm layer under the worst weather conditions in Ch'orwon and Chinju area (initial moisture content : 24 %w.b. , specific airflow rate : 3.0 cmm/m<sup>3</sup>, bed depth : 3.0m).

상기와 같은 원인에 기인하여 진주, 광주 지역의 최소풍량비가 높은 값을 나타낸 반면 철원, 강릉 지방이 낮은 값을 나타내었으며 다른 지역은 비슷한 값을 나타내었다. 최소풍량비는 초기 함수율에 크게 영향을 받았으며, 함수율이 24%

(w.b.)에서 2%(w.b.) 낮아짐에 따라 최소풍량비는 대체로 1/2 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

최소풍량비는 수확 일에 크게 영향을 받았다. 수확 일이 늦어질수록 최소풍량비는 크게 감소하였다. 수확 일이 10월 초순, 중순 및 하순으로 늦어짐에 따라 최소풍량비는 20 ~ 40%정도 감소하는 경향을 나타내었다.

상온통풍 건조시설의 설계기준으로는 안전을 고려하여 수확시기 10월 1일을 기준으로 한 최소풍량비를 선택하는 것이 타당하며, 벼의 빈 퇴적계획, 송풍기 및 가열기 등의 적정 운전계획 등의 확립에는 수확시기별의 최소풍량비가 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결론 및 요약

본 연구는 벼의 상온통풍 건조장치의 설계와 적절한 운영계획을 확립하는데 가장 중요한 요인 중의 하나인 최소풍량비를 결정하기 위하여

Table 6a. Minimum specific airflow rate requirements for different initial moisture contents and harvesting dates (cmm/m<sup>3</sup>)

Locations	Initial moisture content(%w.b.)								
	26			24			22		
	Harvest date			Harvest date			Harvest date		
	Oct.1	Oct.10	Oct.20	Oct.1	Oct.10	Oct.20	Oct.1	Oct.10	Oct.20
Ch'unch'on	5.487	3.236	2.473	3.386	2.027	1.534	1.754	1.140	0.761
Ch'orwon	3.831	2.982	1.874	2.561	1.731	1.250	1.255	0.998	0.706
Kanguung	3.763	3.892	1.963	2.653	2.278	1.265	1.503	1.082	0.737
Wonju	5.353	3.337	2.034	3.410	1.880	1.306	1.673	1.028	0.677
Suwon	5.748	4.180	2.546	3.555	2.279	1.624	1.902	1.291	0.868
Ch'ongju	5.887	3.658	2.864	3.866	2.323	1.944	1.867	1.883	1.005
Taejon	5.417	3.766	2.783	3.611	2.363	1.931	1.790	1.349	1.049
Ch'onju	4.768	3.828	3.015	3.289	2.382	2.088	1.660	1.397	1.174
Kwangju	5.845	4.416	3.674	3.944	2.705	2.485	2.199	1.566	1.529
Andong	5.338	3.797	2.927	3.533	2.365	1.892	1.735	1.371	1.003
Daegu	4.855	4.497	3.046	3.449	2.532	2.097	1.942	1.481	1.088
Ulsan	4.629	4.840	3.145	3.342	2.632	2.079	1.924	1.499	1.086
Chinju	6.453	4.478	2.850	4.030	2.629	2.111	2.331	1.521	1.287

Table 6b. Minimum specific airflow rate requirements for different initial moisture contents and harvesting dates (cmm/m<sup>3</sup>)

Locations	Initial moisture content(%w.b.)					
	20			18		
	Harvest date			Harvest date		
	Oct.1	Oct.10	Oct.20	Oct.1	Oct.10	Oct.20
Ch'unch'on	0.948	0.604	0.109	0.409	0.047	—
Ch'orwon	0.698	0.518	0.270	0.307	0.078	—
Kangnung	0.802	0.597	0.320	0.360	0.097	—
Wonju	0.842	0.520	0.138	0.319	—	—
Suwon	1.005	0.673	0.274	0.506	0.208	—
Ch'ongju	0.999	0.728	0.501	0.449	0.198	0.022
Taejon	0.972	0.744	0.515	0.441	0.210	0.060
Ch'onju	0.934	0.787	0.633	0.460	0.282	0.022
Kwangju	1.132	0.930	0.871	0.600	0.330	—
Andong	0.978	0.749	0.406	0.448	0.192	—
Daegu	1.016	0.825	0.592	0.500	0.284	0.048
Ulsan	1.016	0.844	0.571	0.512	0.307	0.056
Chinju	1.260	0.996	0.826	0.723	0.600	0.490

수행되었으며, 최소풍량비는 시물레이션 방법을 이용하여 분석되었다. 곡물층의 에너지 및 물질 평형, 건조 및 흡습속도 방정식, 방습 및 흡습 평형함수율을 동시에 고려한 상온통풍건조 시물레이션 모델을 개발하고, 이를 건조실험을 통해 검증하였다. 최상 10cm층의 벼가 16%까지 건조되는 동안 최상 10cm층에서 0.5%의 건물중량 손실이 일어나면 상온통풍건조가 실패한 것으로 간주하고, 이를 최소풍량비 결정의 기준으로 하였다. 전국 13개 지역의 7 ~ 13년간의 10월 ~ 12월의 기상자료를 분석에 이용하였다. 분석 기상년도중에서 벼 상온통풍건조에 가장 불리한 연도를 찾아내고, 이 연도의 기상조건하에서의 최소풍량비를 지역, 초기함수율 및 수확 시기별로 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 시물레이션 모델에 의한 예측 함수율의 오차를 보면, 전체 평균함수율의 최대오차는 0.5%(w.b.)이었으며, 벼 퇴적깊이별의 최대오차는 최

하층에서 0.7%(w.b.)로 가장 크게 나타났으며 상층으로 갈수록 감소하여 최상층에서는 0.4%(w.b.)로 나타났다. 이와 같은 오차의 수준과 경향을 고려해 볼 때, 개발된 시물레이션 모델은 최소풍량비의 분석뿐만 아니라 운영계획 분석 등 함수율 예측을 필요로 하는 상온통풍 건조장치의 분석에 만족스럽게 사용될 수 있는 것으로 판단되었다.

나. 기상 조건이 가장 나쁜년도의 상대습도와 평균 기온이 비교적 높은 진주 및 광주 지역의 최소풍량비가 높은 값을 나타낸 반면 상대습도와 외기 온도가 비교적 낮은 철원, 강릉 지방에서 낮은 값을 나타내었으며 다른 지역은 비슷한 값을 나타내었다.

다. 최소풍량비는 초기함수율에 크게 영향을 받았으며, 함수율이 24%(w.b.)에서 2%(w.b.) 낮아짐에 따라 최소풍량비는 대체로 1/2 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

라. 최소풍량비는 수확 일에 크게 영향을 받았다. 수확 일이 늦어질수록 최소풍량비는 크게 감소하였으며, 수확일이 10월 초순에서 중순 및 하순으로 늦어짐에 따라 최소풍량비는 20 ~ 40% 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

마. 상온통풍 건조시설의 설계기준으로는 안전을 고려하여 수확시기 10월 1일을 기준으로 한 최소풍량비를 선택하는 것이 타당하며, 빈 퇴적 계획, 송풍기 및 가열기 등의 적정 운전 계획 등의 확립에는 수확시기별의 최소풍량비가 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단 되었다.

#### 참고문헌

1. 금동혁. 1994. 곡류 및 버섯류의 평형함수율 및 건조방정식에 관한 연구. 한국과학재단

연구보고서

2. 금동혁. 1988. 습공기의 성질계산을 위한 컴퓨터 프로그램. 한국농업기계학회지 13(3)
3. 금동혁. 1986. 벼 건조과정 분석에 필요한 자료 및 관련식. 한국농업기계학회지 11(2)
4. Lu, F.M., 1987. Simulation model for forced aeration of rice. Ph.D. dissertation, U.C.D.
5. Murata, S., Chuma, Y., and Otsuka, K. 1976. The formulae for aeration and ventilation for storage room of farm products. JSAM. 38(2)
6. Wang, C.Y. 1978. Simulation of thin layer and deep-bed drying of rough rice. Ph.D. dissertation, U.C.D.