

벼 常溫通風乾燥의 最小風量比에 관한 연구

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

금 동 혁*

박 선 태**

정희원

정희원

D.H. Keum

S. T. Park

1. 서론

상온통풍건조에 영향을 주는 요인은 風量比, 含水率, 穀物堆積깊이, 곡물퇴적방법, 송풍기와 가열기 작동방법 및 기상조건 등을 들 수 있다. 이들 요인중에서 기상조건에 가장 큰 영향을 받으면서 건조장치설계와 운영방법의 결정에 기본이 되는 요인이 풍량비이다.

본 연구의 목적은 벼의 상온통풍건조 시뮬레이션 모델을 개발하여 이를 건조실험을 통하여 검증하고, 우리나라 13개 지역의 장기간의 기상자료를 근거하여 시뮬레이션 방법으로 지역, 수확시기 및 초기함수율별로 최소풍량비를 결정하는데 있다.

2. 실험 및 분석방법

가. 시뮬레이션 모델 검증실험

상온통풍건조 시뮬레이션 모델의 검증을 위하여 상온통풍건조실험을 수행하였다. 실험장치를 실내에 설치하고 자기온습도계로 외기의 건구온도와 상대습도를 측정하였으며, 24시간 간격으로 시료를 채취하여 함수율을 측정하였다. 건조빈의 공기층만실의 정압을 측정하여 송풍량을 계산하였으며, 송풍량은 2.7 cmm/m^3 이었다.

나. 분석대상지역 및 방법

최소풍량비 분석대상지역은 경기도 1개지역, 강원도 4개지역, 충북, 충남, 전북, 전남 에서 각각 1개 지역, 경북 2개지역, 경남 2개 지역 등 총 13개 지역을 선정하였으며, 7~13개 년의 기상자료를 분석에 이용하였다.

*성균관대학교 생물기전공학과 교수

** 성균관대학교 대학원 석사과정

분석 연도중에서 벼의 상온통풍건조에 가장 불리한 연도의 기상조건하에서 성공적으로 상온통풍건조를 수행할 수 있는 최소의 풍량비를 최소풍량비로 하였다. 상온통풍건조에서 최상 10cm층의 벼가 16%(w.b.)까지 건조되는 동안 최상층의 건물증량손실율이 0.5%를 초과할 때 곡물이 손상되는 것으로 간주하여 건조작업이 실패한 것으로 가정하였다.

3. 상온통풍건조 시뮬레이션 모델링

본 연구에 이용한 상온통풍건조모델의 기본개념은 곡물의 후층을 많은 박층으로 나누고 각각의 박층에서 일어나는 변화를 연속적으로 계산하여 조합하는 방법이다. 시뮬레이션모델에서 요구되는 3개의 방정식은 박층에 대한 에너지 및 물질평형과 곡물의 건조속도를 나타내는 박층건조방정식을 도입하여 구성하였다. 이들 방정식은 다음과 같다.

에너지평형 방정식 :

$$\begin{aligned} & (c_a + c_v H_o) T_o + R(1 + M_o)(c_p + c_w M_{ow}) \Theta_o \\ & = (c_a + c_v H_f) T_f + R(1 + M_f)(c_p + c_w M_{fw}) T_f + (H_f - H_o) h_{fg} \end{aligned}$$

벼의 박층건조방정식 :

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

$$\text{여기서, } k = 0.168 + 0.007602 \left(\frac{T_o + \Theta_o}{2} \right) - 0.1572 \text{ RH}_o$$

평형함수율 방정식 :

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

$$M_{ea} = 0.397048 - 0.053204 \ln \{-1.987 (T_e + 123.297) \ln (\text{RH})\} \quad : \text{흡습}$$

수분평형 방정식 :

$$H_f = H_o + R(M_o - M_f)$$

건물증량손실율 방정식 :

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

$$DML = 0.02658 HEAT \Delta t$$

4. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션 모델의 검증

평균함수율의 실험치와 예측치 간의 최대오차는 0.5%(w.b.)로 매우 만족스러운 결과를 나타내었다. 전반적으로 예측치가 실측치보다 약간 낮은 값을 나타내었다. 각층별 함수율의 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 판단되었다.

나. 최소풍량비

1) 최악 기상년도

분석 연도중에서 기상조건이 벽의 상온통풍건조에 가장 불리한 연도를 찾아 내기 위하여 초기 함수율 24%(w.b.) 벽을 건조할 때의 연도별 최소풍량비를 계산하였으며, 최소풍량비가 가장 큰 값을 나타내는 연도를 기상조건이 가장 불리한 연도로 선택하였다. 최악의 기상년도는 춘천과 수원이 1983년도, 철원 1994년도, 원주 1986년도, 청주, 대구, 전주, 광주, 안동, 울산 및 대구가 1985년도, 전주가 1982년도로 나타났다.

2) 최소풍량비

최소풍량비는 지역, 초기함수율 및 수확시기에 따라서 다르게 된다. 표 4-5a 및 표4-5b는 분석 기상년도 중에서 기상조건이 가장 불리한 연도의 기상조건하에서 벽을 상온통풍건조할 경우의 지역, 초기함수율 및 수확시기에 따른 최소풍량비를 나타낸 것이다.

지역별 최소풍량비를 비교해 보면, 초기함수율 24%, 수확일 10월 1일인 경우 철원지역이 2.561 cmm/m³로 가장 낮은 값을 나타내었으며, 진주지역이 4.03 cmm/m³로 가장 높은 값을 나타내었다. 평균 외기온도가 비교적 높은 강릉, 광주 및 진주지역의 최소풍량비가 높은 값을 나타낸 반면 외기온도가 가장 낮은 철원지방이 가장 낮은 값을 나타내었으며 여타 지역은 비슷한 값을

나타내었다.

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

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

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

Table 4-5a. Minimum airflow requirements for different initial moisture contents and harvesting dates (cmm/m³)

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
Kangnung	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 4-5b. Minimum airflow requirements for different initial moisture contents and harvesting dates (cmm/m³)

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

5. 결론 및 요약

본 연구는 벼의 상온통풍건조장치의 설계와 적절한 운영계획을 확립하는데 가장 중요한 요인 중의 하나인 최소풍량비를 결정하기 위하여 수행되었으며, 최소풍량비는 시뮬레이션방법을 이용하여 분석되었다. 곡물층의 에너지 및 물질평형, 건조 및 흡습속도 방정식, 건조 및 흡습 평형함수율을 동시에 고려한 상온통풍건조 시뮬레이션모델을 개발하고, 이를 건조실험을 통해 검증하였다. 최상 10cm층의 벼가 16%까지 건조되는 동안 0.5%의 건물증량손실이 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 수확시기별로 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 시뮬레이션 모델에 의한 예측 함수율의 오차를 보면, 전층 평균함수율의 최대오차는 0.5%(w.b.)이었으며, 벼 퇴적깊이별의 최대오차는 최하층에서 0.7%(w.b.)로 가장 크게 나타

났으며 상층으로 갈수록 감소하여 최상층에서는 0.4%(w.b.)로 나타났다. 이와 같은 오차의 수준과 현상을 고려해 볼 때, 개발된 시뮬레이션모델은 최소풍량비의 분석뿐만 아니라 운영계획분석 등 함수율 예측을 필요로 하는 상온통풍건조장치의 분석에 만족스럽게 사용될 수 있는 것으로 판단되었다.

- 나. 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 수확일에 크게 영향을 받았다. 수확일이 늦어질수록 최소풍량비는 크게 감소하였으며, 수확일이 10월 초순에서 중순 및 하순으로 늦어짐에 따라 최소풍량비는 20 ~ 40%정도 감소하는 경향을 나타내었다.
- 마. 상온통풍건조시설의 설계기준으로는 안전을 고려하여 수확시기 10월 1일을 기준으로 한 최소풍량비를 선택하는 것이 타당하며, 빈 퇴적계획, 송풍기 및 가열기 등의 적정운전 계획 등의 확립에는 수확시기별의 최소풍량비가 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

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. thesis, 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. thesis, U.C.D.