

곡물 순환식의 상온통풍 건조기 개발 (I)

- 건조기 개발 및 벼의 건조성능 분석 -

Development of a Grain Circulating Type Natural Air In-bin Dryer (I)

- Development of dryer and analysis of drying performance -

윤 흥 선*	정 훈*	조 영 길*	박 원 규*
정회원	정회원	정회원	정회원
H. S. Yun	H. Chung	Y. G. Cho	W. K. Park

SUMMARY

A natural air in-bin grain dryer with a grain circulator was developed for on farm use. Natural air drying test for rough rice was carried out to evaluate drying rate, uniformity of moisture content distribution in grain bed and energy consumption.

It took 10 days to dry 8 ton of paddy rice from 21.9%(w.b) of moisture contents to 16.7%(w.b), by prototype dryer and the average drying rate was 0.52%/day. The uniformity of moisture content after drying was superior to a conventional natural air dryer in which grains were not mixed during drying periods. The dryer performance evaluation index was 738.3kJ/(kg.water), which was more effective than that of grain circulation type hot air dryer(3,500~5,000 kJ/kg.water).

주요용어(Key Words) : 상온통풍건조(Natural air drying), 저장건조(In-bin drying), 벼건조(Rice Drying)

1. 서 론

우리나라 벼 농사의 기계화는 주요 농작업 기계화율이 98%에 달하는 등 상당한 수준까지 진전되었다. 그러나 수확 후 처리에 있어서는 건조작업의 기계화율이 38% 밖에 되지 않아 대부분이 천 일건조에 의존하고 있고, 농가의 저장시설은 채래식 곳간이 75%를 차지하고 있어 아직도 기계화가 미흡한 수준에 머무르고 있다.

이에 따라 벼 수확 후 처리작업의 생력 기계화와 고품질미 생산을 위하여 '90년대에 들어와서

미곡종합처리장이 설치되기 시작하여 '99년말 현재까지 300여 개소가 설치되었다. 그러나 이것으로 처리할 수 있는 벼의 양은 전체 생산량의 15% 밖에 되지 않으며 나머지는 농가 단위에서 처리되어야 하는 실정에 있으나 농가단위에서의 벼 수확 후 처리를 위한 건조·저장장치의 개발 보급이 미진한 실정에 있다. 또한 이미 설치된 미곡종합처리장의 이용에 있어서도 물벼가 수확기에 집중적으로 반입되나 이를 처리할 수 있는 시설의 부족으로 신속한 처리가 이루어지지 못하여 양적·질적인 손실이 초래되고 있다. 따라서 이러한 문제

This study was conducted by the research fund supported by Rural Development Administration and article was submitted for publication in March, 2000 ; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in May 2000.

* National Agricultural Mechanization Institute, Rural Development Administration, Suwon, Korea

The corresponding author is H. S. YUN, Senior Researcher, Post-harvest Machinery Division, National Agricultural Mechanization Research Institute, 249 Suhdun-dong, Kwonsun-ku, Suwon City, 441-100, Korea.

e-mail: hsyoon@namri.go.kr

의 해결을 위해서는 농가에서의 벼 수확 후 관리의 생력기계화, 저비용화 및 품질관리를 위한 건조·저장 장치의 개발 보급이 필요하다.

우리나라 농가에서 사용하고 있는 벼의 건조방법으로는 천일건조, 개량공간을 이용하는 상온통풍 저장건조, 순환식 곡물 건조기를 이용하는 열풍건조 등이 있다. 그 중에서도 개량공간을 이용하는 상온통풍 저장건조는, 우리나라의 벼 수확기간 중의 기상조건이 상온통풍 건조에 적합하여(최홍식 등, 1989; 정창주, 1980) 이를 이용함으로써 열풍 건조에 소요되는 연료를 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 공간에 곡물을 저장하면서 건조를 수행하고 건조된 벼의 저장시설로도 겸용할 수 있으므로 시설비가 저렴하고 구조가 간단하며 출하시까지 별도의 저장시설이 필요없이 저장 가능한 이점 등이 있어 농가 단위에서의 이용에 매우 유리하다(심영근 등, 1989).

그러나 개량공간을 이용한 상온통풍 건조에서는 상부와 하부 사이에 건조가 불균일하게 되며, 또한 곡물의 입·출고 작업을 인력에 의존하고 있어 노령화, 부녀화되고 있는 농촌 노동력의 여건에 비추어 볼 때 노동부담이 과다하고 운반시스템과 연결하여 작업하기가 쉽지 않은(장동일, 1989) 문제가 있다. 이러한 문제가 해결된다면 상온통풍 건조는 벼의 수확 후 처리작업의 생력화, 저비용화 및 손실의 최소화 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 기존 개량공간의 문제점을 보완하여 퇴적 높이에 관계없이 균일한 건조가 가능하고, 곡물의 투입과 배출을 기계화하여 노동력을 절감할 수 있는 곡물 순환식의 상온통풍 건조기를 개발하고,
2. 개발된 시작기를 사용하여 벼를 건조할 때의 함수율 변화와 소요에너지를 측정·분석하여 그 실용성을 검증한다.

2. 재료 및 방법

가. 곡물의 상온통풍건조 이론

(1) 평형함수율

곡물을 건조한 공기 중에 노출시키면 곡물로부터 수분이 증발하여 곡물은 건조되며, 습한 공기 에 노출시키면 곡물은 공기로부터 수분을 흡수한다. 따라서 상온통풍 건조에 있어서 평형함수율은

곡물이 건조될 수 있는 최저의 함수율이 된다. 우리나라 10월의 기상조건은 지역별로 차이는 있으나 평형함수율이 13.8~15.9% 범위로 건조 잠재력이 매우 높으며 상온통풍 건조에 아주 적절하다(금동혁, 1998).

(2) 안전한계 송풍량

곡물을 변질없이 상온통풍 건조할 수 있는 최소한의 송풍량을 안전한계 송풍량이라 한다. 우리나라의 경우 지역에 따라 약간의 차이는 있지만 벼의 초기함수율이 24, 22, 20 및 18%(w.b)일 때 안전한계 송풍량은 각각 4, 3, 2.5 및 1.5 cm^3/m^3 정도이다(고학균 등, 1990). 상온통풍 건조빈에 설치할 송풍기의 송풍량은 수확일이 10월 초순, 함수율 18%일 때의 안전한계 송풍량(0.6~0.85 cm^3/m^3)을 기준으로 빈의 최대용량에 대한 소요 송풍량에 25%를 가산한 값으로 한다(금동혁, 1998).

(3) 송풍저항

상온통풍 건조장치에서 공기가 곡물층, 다공철판, 가열기, 덕트 등을 통과하며 압력손실, 즉 송풍 저항이 발생되며, 송풍기의 정압은 이러한 송풍 저항을 능가하여야 한다. 벼 퇴적층(다진채움, 산물밀도 640 kg/m^3)에서의 송풍 저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_g = 468.506V^{1.485}$$

여기서, ΔP_g : 곡물층 1m당 압력손실(mm.H₂O/m)
V : 곡물층 단위면적당 송풍량($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$)

또, 다공판에서의 송풍 저항은 유공부분의 면적비가 10% 이상일 경우에는 무시할 수 있다(고학균 등, 1990).

(4) 상온통풍 건조속도의 예측

벼의 상온통풍 건조속도는 기상조건, 풍량비 및 가열조건 등에 따라 다르게 된다. 특히, 기상조건은 지역 및 연도에 따라서 상이하므로 수년간 지역별로 실험에 의하여 건조속도를 결정하기란 거의 불가능하다. 따라서, 상온통풍 건조속도는 컴퓨터 시뮬레이션 방법으로 예측이 가능하다(금동혁, 1998).

(5) 건조기 성능평가지수

건조기 성능평가지수(DPEI)는 곡물에서 수분 1

kg을 제거하는데 소요된 총에너지로서 다음과 같이 나타내며, 곡물순환식 건조기의 성능평가지수는 3,500~5,000kJ/kg 범위이다.(고학균 등, 1990).

$$DPEI = \frac{3,600 \times P}{\Delta M}$$

여기서, P : 소요에너지(KW)

ΔM : 곡물로부터 제거된 수분량(kg)

나. 건조기 설계 및 제작

새로 개발한 건조기의 설계 및 제작에 있어서는 다음과 같은 사항들을 고려하였다.

① 농가 단위에서 벼를 건조한 후 저장시설로도 사용이 가능하도록 한다.

② 균일한 건조가 이루어질 수 있도록 곡물의 순환이 가능한 구조로 한다.

③ 곡물 배출이 용이하도록 곡물빈의 형태를 호퍼(hopper)형으로 한다.

④ 상온통풍 건조가 가능한 통풍장치를 구비하고, 곡물빈은 벼의 압력을 견딜 수 있도록 한다.

⑤ 입·출구에 소요되는 노력을 최소화시킬 수 있도록 한다.

⑥ 가격이 저렴하고 농촌 현장에서 쉽게 건설할 수 있도록 한다.

⑦ 쥐, 새 등의 피해를 방지할 수 있도록 한다.

이러한 기본 사항들을 고려하여 제작된 벼 건조기는 곡물 빈, 곡물 순환장치, 송풍장치 등으로 구성되어 있으며, 그림 1은 시작기의 구조도이고, 그림2는 설치광경이며, 제원은 표 1과 같다.

(1) 곡물 빈(Bin)

곡물 빈은 제작비가 저렴하고 내구성이 우수한 F.R.P를 사용하여 호퍼형으로 제작하였으며, 호퍼의 각도는 60°로 하였다.

(2) 곡물 순환장치

곡물 빈에서 배출된 곡물은 스크류 컨베이어와 버킷 엘리베이터에 의해 다시 곡물 빈의 상부로 순환시킬 수 있으며, 버킷 엘리베이터의 상단에 설치된 분배기를 조작하여 입·출고 작업에도 사용이 가능하도록 제작하였다. 곡물 빈의 하부에는 배출량 조절게이트를 설치하여 순환장치의 반송능력이 균형을 이루지 못할 경우에 발생될 수 있는 기계의 손상을 방지할 수 있도록 하였다.

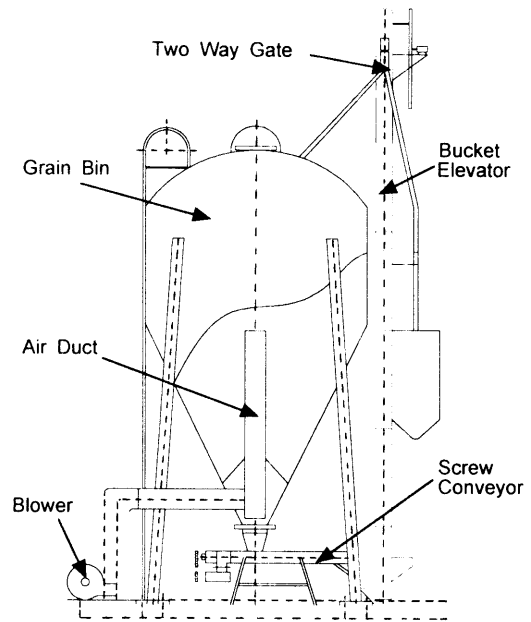


Fig. 1 Schematic diagram of prototype dryer.

Table 1 Specification of prototype dryer

Items		Specification
Grain Bin	Dimension	2,100(Φ)×4,650(H)mm
	Discharge Gate	300(Φ)mm
Bucket Elevator	Dimension	7,400(H)×200(W)mm
	2-way Gate	300(Φ)mm
	Loading hopper	600(H)×300(L)×500(W)
	Motor Power	1.5Hp
Capacity	2 ton/hr	
Screw Conveyor	Dimension	1,550(L)×100(Φ)mm
	Motor Power	0.75Hp
	Capacity	2 ton/hr
Blower	Air Volume & Static Pressure	45cmm, 74mm.Aq
	Motor Power	1Hp
	Air Duct	250(Φ)×1,500(L)mm
Supporting Frame		100(Φ)mm, Steel Pipe

(3) 송풍장치

곡물 빈 내부에 설치된 원통형의 다공 송풍관을 외부의 송풍기와 덕트로 연결하였으며, 외기를 곡물 빈 내부로 송풍시킬 수 있도록 제작하였다. 송풍기는 풍량 45cmm, 정압 74mm.Aq의 원심식을

Fig. 2 Photo of prototype dryer.

사용하였고, 곡물 빈 내부에 설치된 다공송풍관은 직경 250mm, 길이 1,500mm의 원통형이며 철망으로 제작하여 곡물 빈의 중앙부에 수직으로 설치하였다.

다. 성능시험 및 측정방법

시작기의 성능시험은 1998년 10월 16일 부터 경기도 용인군 남사면에서 실시하였으며, 시험에 사용된 벼의 품종은 수원 344호였다.

수확된 물벼는 무게를 계량하고 시료를 채취한 후 곡물 빈에 투입되었으며 투입량은 8톤이었다.

건조기간 동안 송풍기는 오전 10시부터 오후 5시까지 가동하였으며, 오후 2시부터 5시까지는 곡물 순환과 송풍을 동시에 실시하였다. 단 곡물 투입 후 1, 3, 8일 째에는 곡물을 순환시키지 않고 건조한 후 오후 5시부터 1시간 정도 곡물을 순환시켜 섞어주었다. 밤 동안에는 송풍 및 곡물순환 작업을 하지 않았다. 시료는 매일 오후 5시에 채취하였고, 채취위치는 곡물 빈의 상하 방향의 4지점에 대하여 벽면에서 중앙 쪽으로 각각 4지점씩을 선정하여 총 14점의 시료를 채취하였다. 그림 3은 곡물 빈 내에서 시료를 채취한 위치를 나타낸 것이다.

함수율은 곡물 입자들의 각각의 함수율과 평균함수율을 측정할 수 있도록 단립수분계(SHIZUOK A, GTR-800E)를 사용하여 측정하였으며, 단립수분계는 공기오븐법과 비교하여 보정하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 건조기간 동안의 외기조건

건조기간 동안의 외기온도와 상대습도의 변화를

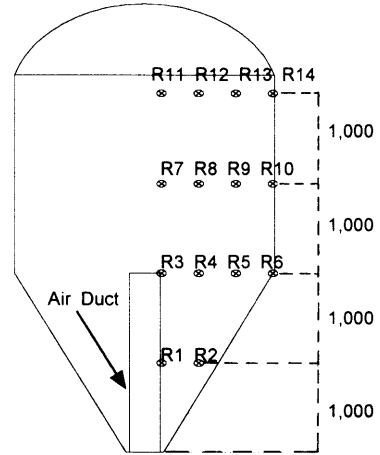


Fig. 3 Grain sampling position.

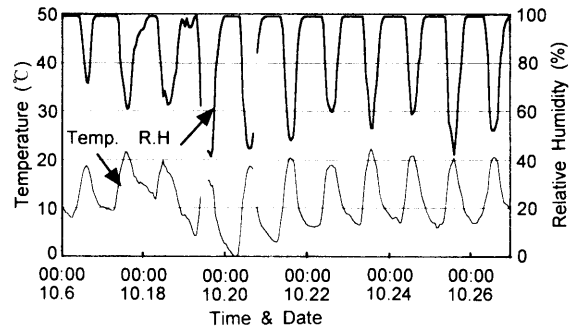


Fig. 4 Ambient air condition during drying periods.

그림 4에 나타내었다. 건조기간 동안에 09:00시 부터 18:00시 사이의 평균 외기온은 17.2°C이었고, 평균 상대습도는 67.2%로 상온통풍 건조에 매우 좋은 기상조건이었으며, 비가 온 날은 없었다.

나. 벼의 함수율 변화

시작기의 건조성능을 검증하기 위하여 벼의 함수율 변화 및 건조 소요에너지를 분석하였다. 그림 5는 건조기간 동안의 벼의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 초기 평균함수율 21.9%(w.b.)의 벼를 평균 16.7%(w.b.)까지 건조시키는데 약 10일이 소요되어 평균 건감율은 0.52%(w.b.)/일로 나타났다.

본 시험에 사용된 자료를 금(1998)이 제시한 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 상온통풍 건조속도 예측 결과에 적용했을 때의 건감율은 0.503%/일로서 실측치와 거의 같게 나타나 호퍼형 빈을 이용한 상

적높이 2.2m에 상당)에 달하고, 초기함수율이 20.1~23.6%(w.b) 범위였던 것을 고려하면 전체 곡물이 매우 균일하게 건조된 것으로 판단되었다. 이 결과는 곡물을 고정된 상태로 상온통풍 건조할 때 퇴적높이를 1m로 하여 적정한 건조조건을 유지하여 건조할 경우에도 상부의 곡물 함수율이 15%에 도달하면 하부의 곡물 함수율이 12~13%로 과건된다는(김기선 등, 1987) 연구결과와 비교하여 불 때 시작기를 이용한 곡물순환 상온통풍 건조는 균일 건조에 효과가 우수한 것으로 판단되었다. 그림 6은 건조기간 동안의 벼 입자 사이의 함수율 분포의 변화를 나타낸 것이다. 초기 표준편차는 2.3~3.7%의 범위에 있었으나 건조가 진행되면서 표준편차도 줄어들어 건조 6일째 부터는 1.0% 이하로 되었으며, 건조종료 시에는 0.58~0.87%의 범위로 나타나 건조시간이 경과함에 따라 벼 입자 사이의 함수율 불균일이 줄어드는 것으로 나타났다.

다. 순환건조와 비순환건조의 비교

그림 5에서 보는 바와 같이 곡물을 하루 3시간씩 순환시킨 경우에는 벼의 함수율이 거의 일정한 상태로 건조되었으나, 곡물을 순환시키지 않고 건조시킨 경우(1, 3, 8일째)에는 저장 빈 내부의 송풍관에 가까운 곡물이 빠르게 건조되어 함수율 불균일이 심하게 나타났다. 특히 곡물의 함수율이 낮을 경우(8일째)에는 일부 곡물의 함수율이 14.5%(w.b) 까지 떨어져 과건될 가능성도 높은 것으로 판단되었다. 따라서 균일한 건조를 위해서는 매일 일정시간씩 곡물을 순환시키며 건조하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

한편, 그림 6에서 불 때 비순환 건조시에 각 측정지점의 벼 입자들의 함수율의 표준편차가 줄어들었으나 다음날에는 표준편차가 현저히 늘어나는 것으로 나타났는데, 이는 불균일 건조로 함수율 편차가 커진 곡물이 다음날 순환과정에서 섞여지면서 나타난 현상으로 판단되었다.

라. 건조기 성능 평가지수

표 2는 건조에 소모되는 전력량과 건조기 성능 평가지수를 나타낸 것이다. 소요된 전력량은 송풍기에서 52.5kWh, 곡물 순환장치에서 50.04kWh로 모두 102.54kWh이었으며, 건조된 수분량은 총 500kg이었는데, 이로부터 계산된 건조성능 평가지수는

온통풍 건조속도의 예측에도 원통형 빈을 이용한 상온통풍 건조속도의 예측법을 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

건조종료 시점에서의 각 측정지점의 평균함수율의 범위는 16.3~17.0%(w.b)로 나타났는데 곡물의 퇴적높이가 4.4m (원통형 빈으로 환산할 때의 퇴

Table 2 Energy consumption and dryer performance evaluation index

Electric Energy Consumption (kWh)			Total Evaporated Water (kg)	Dryer Performance Evaluation Index (kJ/kg.water)
Blower	Grain Circulation	Total		
52.5	50.04	102.54	500.0	738.3

738.3 kJ/kg.water로 곡물순환식 열풍건조기의 성능평가지수(3,500~5,000 kJ/kg.water) 보다 매우 적은 값을 나타내어 에너지 절감효과가 큰 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

농가 단위에서 벼를 상온통풍 건조하는데 있어서 기존의 개량곳간의 문제점을 보완하여 균일한 건조가 가능하고, 노동력을 절감할 수 있는 곡물순환식의 상온통풍 건조기를 개발하였다. 개발된 시작기를 사용하여 벼를 건조할 때의 벼의 함수율 변화와 소요에너지를 측정·분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 건조기간 동안에 09:00시 부터 18:00시 사이의 평균 외기온은 17.2℃이었고, 평균 상대습도는 67.2%로 상온통풍 건조에 매우 좋은 기상조건이었다.

2) 개발된 건조기를 사용하여 함수율 21.9% (w.b)의 벼를 평균 16.7%(w.b) 까지 건조시키는데 10일이 소요되어 평균 건감율이 0.52%/일로 나타났다.

3) 본 시험에 사용된 자료를 금(1998)이 제시한 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 상온통풍 건조속도 예측결과에 적용했을 때의 건감율은 0.503%/일로서 실측치와 거의 같게 나타나 호퍼형 빈을 이용한 상온통풍 건조속도의 예측에도 원통형 빈을 이용한 상온통풍 건조속도의 예측법을 사용할 수 있는 것으로 나타났다.

4) 곡물을 하루 3시간씩 순환시키며 건조시킨 경우에는 각 측정지점의 벼의 평균함수율이 거의 균일한 상태로 건조되었으나, 곡물을 순환시키지 않고 건조시킨 경우에는 저장 빈 내부의 송풍관에 가까운 곡물이 빠르게 건조되어 함수율 불균일이 심하게 나타났다. 특히 곡물의 함수율이 낮을 경우에는 일부 곡물이 과건될 가능성도 높은 것으로

판단되었다. 따라서 균일한 건조를 위해서는 매일 일정시간씩 곡물을 순환시키며 건조하는 것이 좋은 것으로 판단되었다.

5) 건조종료 시점에서의 각 측정지점의 평균함수율은 16.3~17%(w.b) 범위로 나타났고, 벼 입자 사이의 함수율의 표준편차도 0.58~0.87의 범위로 나타나 본 연구에서 개발된 건조기는 균일건조에 효과가 큰 것으로 판단되었다.

6) 개발된 건조기를 사용하여 벼를 건조시킬 때의 건조기 성능평가지수는 738.3kJ/kg.water로 곡물순환식 열풍건조기의 성능평가지수(3,500~5,000 kJ/kg.water) 보다 매우 적은 값을 나타내어 에너지 절감 효과가 높은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 고학균, 금동혁 외 7인. 1994. '95 농협 미국 종합처리장 설계기준. 농협중앙회.
2. 고학균 외 6인. 1990. 농산가공기계학. pp 377. 향문사.
3. 금동혁. 1998. 원형철제빈을 이용한 벼의 건조 및 저장 핸드북. pp.84. 성균관대학교.
4. 금동혁 외 5인. 1996. 교반식 원형철제빈에 의한 벼의 누적 혼합 저장건조에 관한 현지 시험 연구. pp.61. 신흥기업사.
5. 심영근, 신명곤. 1989. 개량곳간의 농가보급과 경제성. 한국식품개발연구원. 벼의 수확후 관리 기술 : 67-93.
6. 장동일, 박재복, 김동철. 1989. 개량곳간의 발전방향. 한국식품개발연구원. 벼의 수확 후 관리기술 : 95-130.
7. 최홍식. 1989. 개량곳간의 개발과 운영. 한국식품개발연구원. 벼의 수확 후 관리기술 : 29-66.
8. 農業機械學會. 1996. 生物生産機械ハンドブック. p. 789-812.
9. Chung, C. J. 1980. Post-production Rice Systems in Korea. College of Agriculture, Seoul National University.
10. Brookerk, D. B. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. pp. 450.
11. Keum, D. H. and S. T. Park. 1996. Minimum Specific Airflow Rate Requirements for Natural Air Drying of Rough Rice in Korea. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 21(1):60-71. (In Korean)
12. Kim, K. S. and M. G. Shin. 1987. Ambient-Air In-Bin Drying of Paddy with the Modified Flat-type Store for Small Scale Korean Farmer. J. of the Korean Society for Agricultural Machinery 12(3):50-56. (In Korean)