

순환식 병류형 곡물건조기 개발(III) - 12톤 용량 건조기 성능평가 -

한재웅

Development of a Rice Circulating Concurrent-flow Dryer(III) - Performance Evaluation of 12-ton Capacity Dryer -

J. W. Han

Abstract

This study was conducted to evaluate the performance of a 12 tons capacity circulating concurrent flow rice dryer. An actual scale dryer with the capacity of 12 tons was developed to obtain a faster drying rate of 0.8~1.2%(w.b.)/h, while maintaining a lower drying energy consumption of 5,000 kJ/kg-water and achieving a drying quality that was comparable to a conventional cross-flow rice dryer.

The Test-1 was conducted at 110°C - 20 cmm/m² and the Test-2 was conducted at 120-110-100-90°C - 20 cmm/m² under the same conditions as Test-1. In Test-1, the drying rate, drying energy consumption and crack ratio were 0.98 %(w.b.)/h, 4,573 kJ/kg-water and 3.2%, respectively. In Test-2, the drying rate, drying energy consumption and crack ratio were 0.74 %(w.b.)/h, 4,790 kJ/kg-water and 4.0%, respectively. The results of these tests demonstrated that this concurrent-flow dryer reached the desired drying rate, drying energy consumption and crack ratio.

Keywords : Concurrent-flow dryer, Rice Circulating type, Rough rice, Drying

1. 서론

옥수수 생산에 소요되는 화석에너지는 60%가 건조공정에 소요되며, 경작에는 16%, 파종 및 재배에 12%, 수확에 6% 및 이송에 6%가 소요되므로 건조공정의 에너지 절감은 전체적인 에너지 절감에 큰 영향을 미친다(Brooker et al., 1992). 건조공정은 옥수수 외에 국내에서 소비되는 모든 곡물의 경우에도 많은 에너지가 소요된다. 벼의 건조목표는 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 횡류형 순환식 건조기의 경우, 건조속도 0.7~0.9%(w.b.)/h, 동할율 5%이내 및 건조소요에너지 5,000~7,000 kJ/kg-water 수준이며, 기존 건조기로는 건조속도 및 건조소요에너지의 개선에는 한계가 있다고 보고되었다(Keum, 1986).

건조속도 및 건조소요에너지 개선을 위한 순환식 병류형 곡물건조기 개발(Han et al., 2006; Han et al., 2007)에서 용량 700 kg의 건조기를 이용하여, 곡물 유입은 Y-형 슈트럼 이용하여 벼의 흐름을 원활하게 하였으며, 열풍과 병류 흐름에 최대한 근접하도록 하였다. 배풍형태는 2단 크로스 형태와 3면에서 배기를 함으로써 원활한 배기가 이루어지는 형태를 선택하여 건조 수행 결과 기존 횡류형 건조기에 비하여 건조속도 빠르고 에너지는 적게 소비하였으며, 품질은 동일한 수준으로 나타났다고 보고하였다.

본 연구에서는 미곡종합처리장에서 사용할 수 있는 용량 12톤 규모의 기존 횡류형 건조기에 비해 건조속도는 0.7~1.2%(w.b.)/h이고 건조소요에너지는 5,000 kJ/kg-water이하, 건조품질은 기존 건조기와 동일한 수준의 순환식 병류형 곡물건조기 개발을 목표로 하였다.

This study was supported by the agricultural R&D Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication on 2009-08-10, reviewed on 2009-09-08, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2009-09-24. The author is Jae Woong Han, Researcher, KSAM member, Faculty of life science & technology, Suwon, Korea. Corresponding author: J. W. Han, Researcher, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea; Tel: +82-31-290-7832; Fax: +82-31-290-7901; E-mail: <hanwoong @empal.com>.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 건조장치

순환식 병류형 곡물건조기의 용량은 12톤으로 하였으며, 건조기의 건조성능 목표는 건감율은 0.7~1.2%(w.b.)/h로 하였다. 또한 우리나라 가을철 평균외기온도를 기준으로 소요 에너지는 5,000 kJ/kg-water이하로 설계하였다.

건조기의 주요 구성과 개략도는 그림 1과 같다. 그림과 같이 건조부, 템퍼링부, 곡물배출장치, 곡물순환장치, 제어장치로 구성하였다. 건조기의 주요한 설계인자는 건조실 높이는 0.512 m 및 곡물순환속도는 3.0 m/h로 설정하였으며, 템퍼링시간은 50.8분, 건조실 체류시간은 11.2분으로 건조 및 템퍼링비를 1 : 5로 하였다. 송풍량은 최대 35.0 m³/min·m²가 가능하도록 설계하였다.

건조부의 단면은 2.4×2.4(L×W) m의 정사각형으로 제작하였다. 템퍼링부에서 건조부로 곡물이 유입되는 부분은 36(6×6)개의 곡물 유입슈트를 설치하여 곡물이 균일하게 유입되어 건조부를 자유낙하 할 때 열풍의 흐름을 균일하도록 하였다. 곡물 유입슈트는 0.17×0.17(L×W) m의 정사각형 단면으로 하고, 상부의 호퍼 부분의 경사는 60°로 하여 곡물의 흐름을 원활하게 하였다.

배기덕트는 3각형 덕트를 2단으로 배치하여 상단에 6열, 하단 6열을 설치하였다. 상단 6열은 열풍의 반대방향으로 배

기를 하며, 하단 6열은 열풍유입과 관계없이 양측면으로 배기되도록 하였다. 상부 삼각형 덕트는 0.17×0.17(W×H) m, 하부의 삼각형 덕트는 0.19×0.22(W×H) m로 하여 곡물의 종말속도를 고려하여, 풍속이 3.0 m/s이하가 되도록 하였다 (Keum, 2008).

송풍기(3.7kW, Eul-Ji, Korea)는 3.75 kW 2대를 설치하여 양쪽을 분할하여 흡인하도록 설치하였으며, 버너(LT-20U, Olympia, Korea)는 송풍량 172.8 m³/min의 외기를 120℃까지 가열할 수 있도록 하였으며, 버너는 150,000 kJ/h의 용량을 사용하였다. 곡물배출부는 6개의 배출오거를 설치하고 배출속도를 조절할 수 있도록 하였다.

제작된 순환식 병류형 곡물건조기는 건조기 총 높이는 8.7 m이며, 가로, 세로 폭은 2.4 m인 정사각형이다.

나. 공시재료

건조 실험에 사용한 벼는 2006년도에 경기도 화성지역의 미곡종합처리장에서 수매한 추정벼를 실험에 사용하였으며, 초기함수율은 22.0~25.0%(w.b.)의 벼를 건조실험에 사용하였다.

다. 실험방법

표 1은 건조 실험조건이다. 표에서와 같이 열풍온도 2수준으로 하고, Test-1에서는 건조 시작 후 종료 때까지 110℃로 동일한 온도를 유지하였으며, Test-2에서는 120-110-100-90℃로 각 순환 횟수별로 온도를 단계적으로 조정하였다. 송풍량은 20.0 m³/min/m², 곡물유하속도는 3.0 m/h로 하였다. 건조 실험 시작 후 매 순환마다 약 500g 시료를 채취하여 함수율을 측정하였다. 함수율이 16.0%(w.b.)에 도달할 때 실험을 종료하였다. 함수율은 10g-135℃-24h 상압건조법으로 측정 후 105℃ 건조법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하였다(ASAE Standards, 2004). 동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에서 보관 후 수작업으로 왕겨를 제거하고, 현미 250립에 대하여 동할립 판별기(DC-50, S.SEIKI, JAPAN)를 이용하여 육안으로 측정하였다(Sharma and Kunze, 1982; Yamashita, 1993).

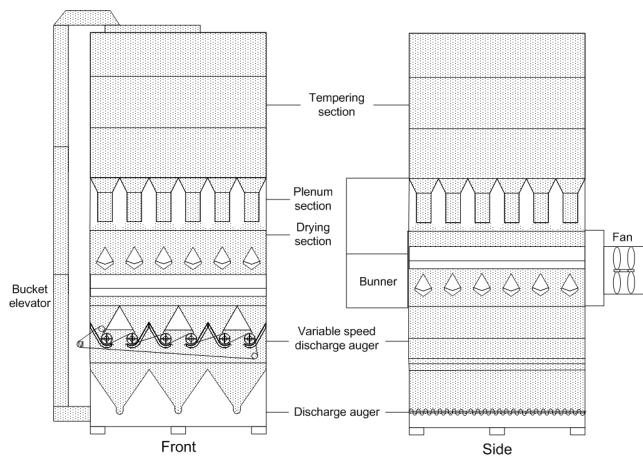


Fig. 1 Schematic diagram of rice circulating concurrent-flow dryer.

Table 1 Drying conditions for the drying tests

Test No.	Drying air temp (°C)	Airflow rate (m ³ /min/m ²)	Grain vel. (m/h)	Initial m.c. (%w.b.)	Initial grain weight (kg)	Ambient temperature (°C)	Relative humidity (%)
Test-1	110	20.0	3.0	22.8	10,000	16.0	81.0
Test-2	120-110-100-90	20.0	3.0	22.3	10,000	17.2	75.4

그림 2는 벼의 곡온 및 공기의 온도를 측정하기 위한 온도 센서의 위치를 나타낸 그림이다. 외기 온도를 측정하기 위해 외부 1개 지점, 열풍온도를 측정하기 위하여 열풍유입부 9개 지점 및 배기부 10개 지점, 곡온을 측정하기 위하여 건조실 내의 높이별 7개 지점 및 배기덕트 하단의 10개 지점에 열전대(T-TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 5분 간격으로 온도를 측정하여 PC에 저장하였다. 풍속계(640-0, DWYER INSTRUMENTS, USA)를 사용하여 배기의 풍속을 3개 지점에서 측정하였다. 또한 건조공기 유입부 1개 지점과, 공기 배출부 1개 지점에 습도계(TR-72, TandD, Japan)를 설치하여 5분 간격으로 습도를 측정하였다. 소요전력은 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)로 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 소비된 연료의 무게를 측정하였다.

실험 중 평균 외기온도는 Test-1, 2에서 각각 16.0 및 17.2°C이었으며, 평균상대습도는 각각 81.0 및 75.4%로 수원지역 10월 평균값 보다 높았으며, 특히 상대습도의 경우는 실험기간 중 주야간에 심한 온도차로 짙은 안개로 인하여 상대습도가 높았다.

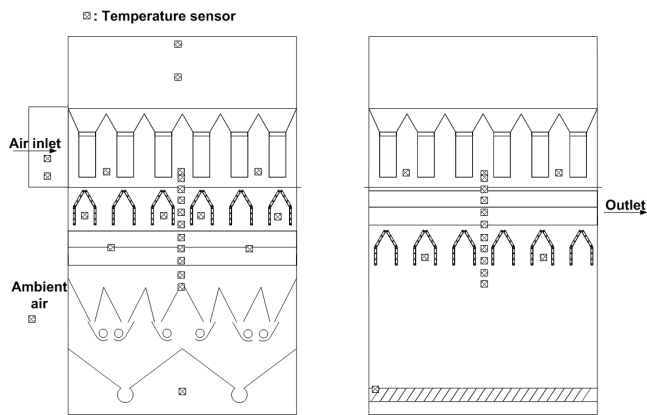


Fig. 2 Locations of temperature sensors in dryer.

3. 결과 및 고찰

가. 열풍온도 및 곡온변화

그림 3은 건조실에 유입되는 열풍온도의 변화를 나타낸 것이다. 초기에 설정한 열풍온도에 도달하는 시간은 약 5분이였다. Test-1의 평균열풍온도는 110.5°C(91.2~121.6°C)로 나타났다. Test-2는 순환횟수별로 열풍온도를 설정하였으므로 1-pass는 119.4°C이며, 2-pass는 109.4°C이며, 3-pass는 104.6°C이며, 4-pass이후로는 93.6°C로 나타났다. 벼의 온도편차를 줄이기 위하여 2단 버너를 사용하였으며, 온도 편차는 ±11.6°C 이내로 나타났다. 건조실로 유입되는 공기는 유입덕트의 온도상승으로 인하여 건조에 사용되는 열풍의 온도는 크게 차이를 보이지 않았다. 건조실에서 유입열풍 온도

는 건조실 좌우방향으로 ±5°C의 편차를 나타내었으며, 전후 방향으로 최대 20.1°C 편차를 나타내었다.

그림 4는 건조실의 곡물층을 통과하는 공기의 온도변화를 나타낸 것이다. Test-1의 경우 공기는 열풍유입부에서 평균 110.4°C까지 상승한 후 건조실의 곡물층을 통과하면서 하강하여 평균 33.5°C로 건조실에서 배출되었다. Test-2의 경우 열풍유입부에서 평균 104.8°C까지 상승한 후 건조실의 곡물층을 통과하면서 하강하여 평균 32.2°C로 건조실에서 배출되었다.

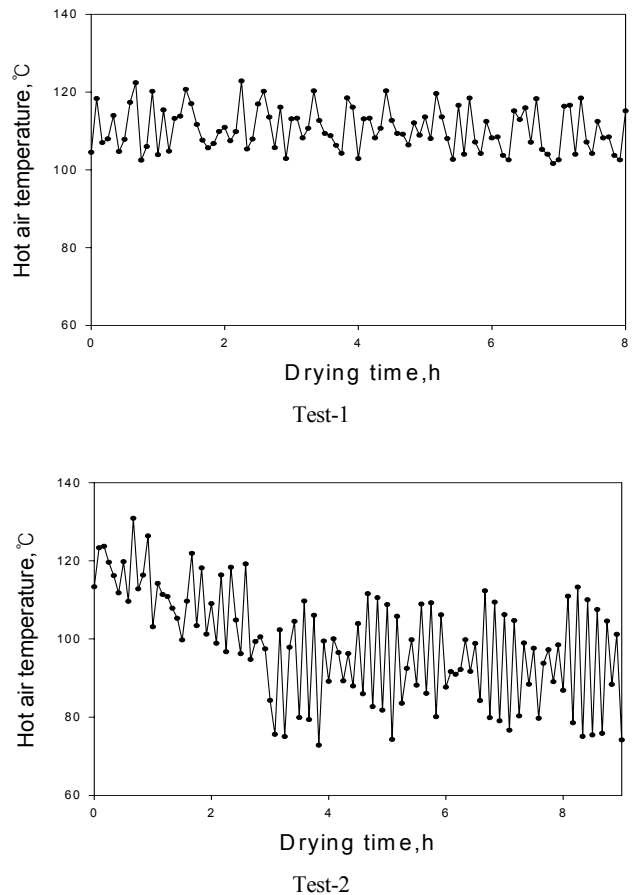
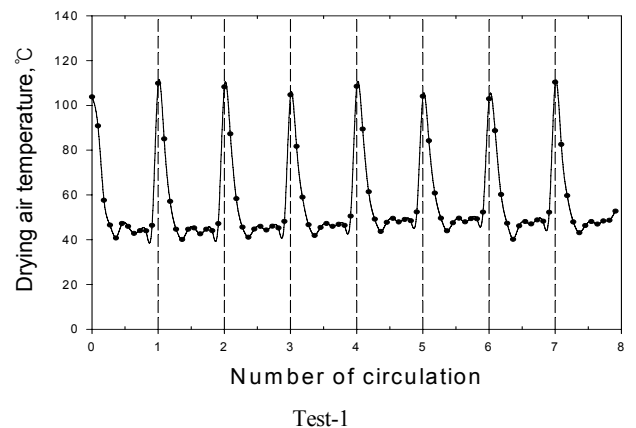


Fig. 3 Curve of drying air temperature during drying.



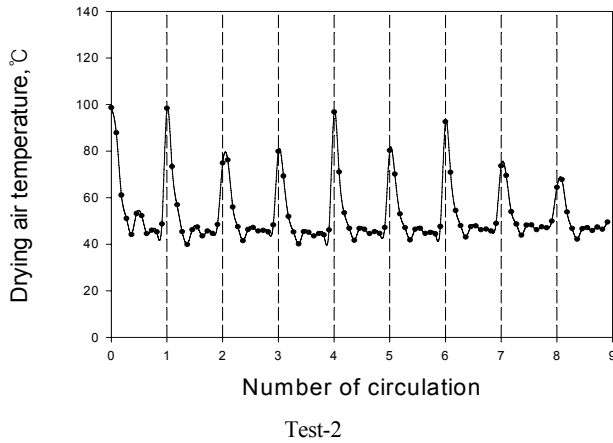


Fig. 4 Curve of air temperature flowing down through grain section.

나. 배출곡온변화

그림 5는 건조 중 배출부의 곡온변화를 나타낸 것이다. Test-1은 곡온은 22.4°C에서 서서히 증가하여 건조 종료시에는 36.3°C에 이르렀으며, Test-2의 경우는 25.1°C에서 34.6°C까지 증가하였다.

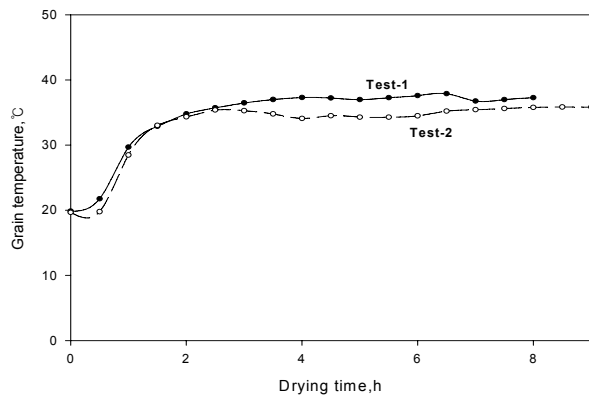


Fig. 5 Changes of discharge grain temperature during drying.

다. 건감율 및 건조소요에너지

표 2는 건조소요시간, 건감율 및 곡물 순환횟수를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 Test-1의 경우 22.8%(w.b.)에서 15%(w.b.)까지 건조하는데 8시간이 소요되어 건감율은 0.98%(w.b.)/h로 나타났으며, Test-2의 경우, 22.3%(w.b.)에서 15.6%(w.b.)까지 건조하는데 9시간이 소요되어 건감율은 0.74%(w.b.)/h로 나타났다.

Test-1과 Test-2 모두 투입곡물의 함수율의 표준편차는 ±3.1%(w.b.)로 나타났으며, 건조종료 후 함수율의 표준편차는 ±1.0%(w.b.)이하로 순환식 병류형 곡물건조기는 건조기 내의 곡물의 열풍 흐름 및 교반이 균일하게 나타났다.

Table 2 Drying rates and drying times

Test No.	Initial moisture content (%w.b.)	Final moisture content (%w.b.)	Drying time (h)	Drying rate (%w.b./h)	Number of circulation
Test-1	22.8	15.0	8.0	0.98	8
Test-2	22.3	15.6	9.0	0.74	9

표 3은 건조소요에너지를 나타내었다. Test-1, Test-2의 연료소요에너지와 송풍에너지를 총 소요에너지는 각각 4,570 및 4,790 kJ/kg-water로 나타났다. 이는 일반 열풍건조기의 소요에너지 5,000~7,000 kJ/kg-water에 비하여 낮은 수준으로 나타났다. 전체 소요에너지 중 연료소요에너지가 96.8~97.5% 및 송풍에너지 및 각 단위기계의 구동에너지는 2.5~3.2%로 나타났다.

Table 3 Drying energy consumptions

Test No.	Fan energy consumption (kJ/kg-water)	Fuel energy consumption (kJ/kg-water)	Total energy consumption (kJ/kg-water)
Test-1	114	4,459	4,573
Test-2	152	4,638	4,790

라. 건조비의 품질

초기 동할은 없었으며, 건조종료 후 Test-1 및 Test-2의 동할율은 각각 3.2 및 4.0%로 두 실험 모두 건조기 품질 목표인 동할율 5.0%미만으로 나타났으며, Test-2는 건조온도변화로 인하여 배출공기가 Test-1보다 낮은 결과가 나타났지만 긴 건조시간으로 인하여 동할율이 높게 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 미곡종합처리장에서 사용가능한 용량 12톤 규모의 순환식 병류형 곡물건조기를 설계·제작하여 미곡종합처리장에서 성능평가를 실시하였다.

- (1) 최적설계의 결과에 따라 송풍량 35.0 m³/min/m², 곡물유하속도 3.0 m/h, 건조실높이 0.512 m를 이용하여 10톤 규모의 순환식 병류형 곡물건조기를 설계·제작하였다.
- (2) 열풍온도가 110°C(Test-1) 및 단계별로 120-110-100-90°C(Test-2)로 조절되는 2회의 건조실험을 수행하였으며, Test-1의 건조속도는 0.98%(w.b.)/h, Test-2는 0.74%(w.b.)/h로 나타났다. 소요에너지는 각각 4,573 및 4,790 kJ/kg-water로 나타났으며, Test-1 및 2의 품질 변화인 동할율은 3.2 및 4.0%으로 나타났다.

- (3) 건조온도를 순환별 조절하는 Test-2의 경우는 회수별 소비에너지는 적게 소모되었지만 목표함수율 도달까지의 총에너지 소비율은 Test-1에 비하여 긴 건조시간으로 인하여 높게 나타났으며, 품질에도 좋지 않은 결과를 나타냈다.
- (4) 건조온도를 조절하는 방법인 Test-2 보다 초기 건조온도를 유지한 방법인 Test-1이 건조속도, 에너지 및 품질 면에서 우수하게 나타났다.
- (5) 건조온도를 다르게 하여 실험한 결과 2가지 경우 모두 기존 횡류형 건조기보다 우수한 것으로 나타났으며, 바로 현장에 적용하여 사용가능한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. ASAE Standards. 2004. S352.2: Moisture Measurement-Unground Grain and Seeds. ASAE Standards 51st Edition pp. 582-583.
2. Brooker, D. B., F. W. Bakker-Arkema and C. W. Hall. 1992. Drying and Storage of Grains and Oilseeds. An Avi Book, NW, USA.
3. Han, J. W., D. H. Keum, H. Kim and S. J. Hong. 2007. Development of a rice circulating concurrent-flow dryer(I)-validation of drying simulation model-. Journal of Biosystems Engineering 32(5):309-315. (In Korean)
4. Han, J. W., D. H. Keum, J. G. Han, H. Kim and S. J. Hong. 2006. Development of a rice circulating concurrent-flow dryer(II)-performance test of pilot scale dryer-. Journal of Biosystems Engineering 31(4):349-354. (In Korean)
5. Keum, D. H. 2008. Post-harvest Process Engineering. CIR, Seoul, Korea.
6. Keum, D. H. and R. P. Singh. 1986. Continuous flow rice drying using simulation. Journal Korea Society Agriculture Machinery 11:41-54. (In Korea)
7. Sharma, A. D. and O. R. Kunze. 1982. Post-drying fissure developments in rough rice. Transaction of the ASAE 25: 465-474.
8. Yamaguchi, S., S. Yamazawa, S. Wakabayashi and T. Shibata. 1980. Experimental study on the internal stress cracking of rice kernel (part 1). Journal of the Japan Society of Agriculture Machinery 42:91-96. (In Japanese)