

## 순환식 병류형 곡물건조기 개발 (I) - 시작기의 성능시험 -

한재응 금동혁 한종규 김 훈 홍상진

### Development of a Rice Circulating Concurrent-flow Dryer (I) - Performance Test of Pilot Scale Dryer -

J. W. Han D. H. Keum J. G. Han H. Kim S. J. Hong

#### Abstract

This study was performed to evaluate the performances for a concurrent flow rice dryer of pilot scale with devices for circulating rice. The pilot scale dryer with the capacity of 700 kg was developed to obtain design informations for the development of actual scale dryer of holding capacity of 10 tons. Three drying tests were conducted at two temperature levels of 100°C and 120°C, and two air flow rates levels of 28.5 cmm/m<sup>2</sup> and 57.1 cmm/m<sup>2</sup>. Drying conditions for Test-1, Test-2 and Test-3 were 100°C-28.5 cmm/m<sup>2</sup>, 120°C-28.5 cmm/m<sup>2</sup> and 120°C-57.1 cmm/m<sup>2</sup> respectively. Drying rates were 0.73% (w.b./h) for Test-1, 0.90% (w.b./h) for Test-2 and 1.46% (w.b./h) for Test-3. The crack ratios of brown rice after drying ranged from 2.4% to 8.4%, and increased with the increase of drying rate and airflow rate. The energy consumptions were from 6,225 kJ/kg to 6,993 kJ/kg which was higher than that of conventional cross-flow rice circulating type dryer used in Korea. This results were due to the lower ambient air temperatures of 4.5°C to 13.4°C during drying tests.

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

#### 1. 서론

곡물건조기는 건조속도를 유지하면서 건조 중 동할 발생과 건조소요에너지가 최소화 되도록 설계되어야 한다. 따라서 일반적으로 곡물건조기의 성능은 건조속도, 건조 곡물의 품질 및 건조소요에너지 등 3개의 성능요인으로 평가한다. 새로 개발한 곡물건조기는 기존건조기에 비하여 이들 성능요인 중 적어도 1개항은 우수하고 나머지 2개항은 동등하여야 한다.

현재 국내에서 널리 사용되고 있는 횡류형 순환식 건조기는 벼를 건조할 경우 건조속도가 0.7~0.9%(w.b.)범위이며, 동할율은 5%이내, 건조소요에너지는 5,000~7,000 kJ/kg-water

정도이다(Keum, 1986). 일반적으로 횡류형 건조기는 곡물이 균일하게 열풍에 노출되지 않아 불균일 건조를 피할 수 없는 구조기 때문에 건조속도를 향상시키거나 건조소요에너지를 절감하기 위하여 건조중에 곡물을 혼합하는 등 다양한 방법을 채택하고 있다. 이에 비하여 병류형은 건조 원리상 모든 곡물이 동일한 열풍에 노출되므로 불균일 건조를 피할 수 있는 장점이 있다. 이러한 병류형 건조기의 장점때문에 병류형 곡물건조기의 개발에 많은 연구가 이루어지고 있다.

Keum과 Lee(1988)는 용량 2,000 kg의 병류형 건조기를 개발하여 건조온도를 110-100-90-80°C의 4단계로 조절하고, 송풍량은 25 cmm/m<sup>2</sup>으로 하였을 때 건조속도는 2.1%/h, 곡

This study was supported by the agricultural R&D Center (ARPC), Ministry of Agriculture and Forestry. The article was submitted for publication in June 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2006. The authors are Jea Woong Han, KSAM member, Researcher, Dong Hyuk Keum, KSAM member, Professor, Sang Jin Hong, KSAM member, Researcher, Dept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University, Korea, Jong Gyu Han, KSAM member, President, Hansung Industrial Co. Ltd., Korea, Hoon Kim, KSAM member, Researcher, Korea Food Research Institute, Korea. The Corresponding author is D. H. Keum, Professor, Kept. of Bio-Mechatronic Engineering SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea; E-mail: <dhkeum@skku.edu>

온은 36°C 이하를 유지하여 완전미 수율이 건조전후 2.1% 감소한 것으로 보고하였다.

Brook등(1977)은 병류형 건조기의 연료소비량이 기존의 건조기에 비해 약 49% 절감되었다고 보고하였다. Bakker-Arkema등(1977)은 병류형 건조기로 옥수수를 건조할 때 횡류형 건조기에 비하여 에너지는 절감되면서 건조 옥수수의 품질에는 차이가 없었다고 보고하였다.

Walker와 Bakker Arkema(1981)는 병류형 건조기를 이용한 장립종 벼의 건조 실험에서 병류형이 횡류형에 비하여 소요에너지가 절감되었다고 보고하였다.

본 연구는 10톤 용량의 농가용 순환식 병류형 곡물건조기를 개발하기 위한 예비 실험으로 용량 700 kg의 시작기를 개발하여 건조속도(1.0~1.2%/h), 동할율(5%이하) 및 건조소요 에너지(5,000 kJ/kg-water이하)가 적합한지를 평가하고, 본기 설계의 기초자료를 얻기 위하여 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험용 건조장치

그림 1은 순환식 병류형 곡물건조기의 구조와 건조공기 흐름을 나타낸 것이다. 건조기는 템퍼링부, 건조부 및 배출부로 구성하였으며 버킷엘리베이터, 송풍기 및 버너 등 주변장치를 설치하였다. 건조기는 500×700×4,600(L×W×H) mm크기로, 벼를 기준으로 700 kg용량이다. 템퍼링부에 퇴적된 곡물

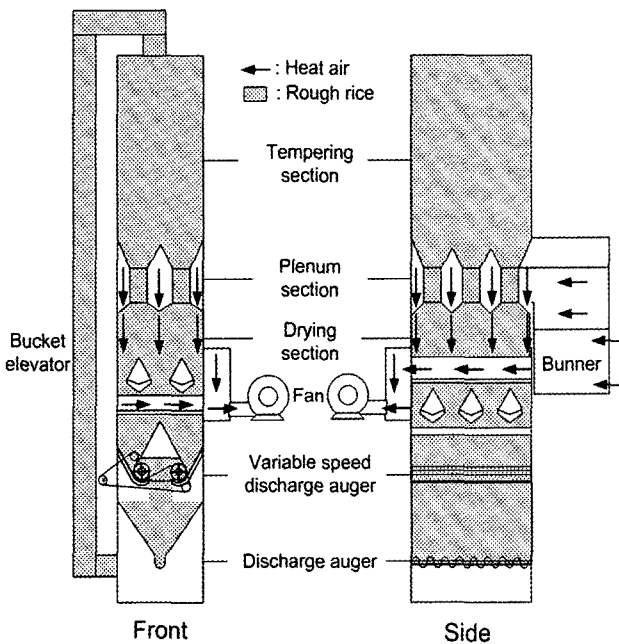


Fig. 1 Schematic diagram of rice circulating concurrent-flow dryer.

은 총 6개(2×3열)의 Y형 슈트를 통하여 건조부로 유입되어 일정한 속도로 유하하게 되고, 배출부를 통과한 후 버킷엘리베이터에 의하여 템퍼링부로 순환되도록 하였다. 건조공기는 버너(OL-3, Deawon, Korea)와 1 hp 송풍기(Samwha, Korea)에 의해 Y형 슈트사이의 공기층만실을 통해 유입된 후 건조부의 곡물층을 병류흐름으로 통과한 후 배기덕트로 통해 외부로 배출된다. 유입덕트에 온도센서(PT-100 Ω)를 설치하고 온도조절장치(HSD-V2, Hansung, Korea)를 이용하여 건조공기의 온도를 조절하였다.

Y형 슈트의 상단은 233×250(L×W) mm이며 안식각을 고려하여 60°로 제작하였으며, 하단은 100×100(L×W) mm로 하였다. 건조부의 용적은 0.193 m<sup>3</sup>으로, 템퍼링부의 용적(0.875 m<sup>3</sup>)에 대비하여 1:4.5 비율로 제작하였다(그림 2).

건조공기가 배출되는 배기덕트는 상단 2열과 하단 3열을 서로 직교되게 설치하였다. 상단 2열은 1개면, 하단 3열은 2개면에서 건조공기가 배출되도록 하였다(그림 3).

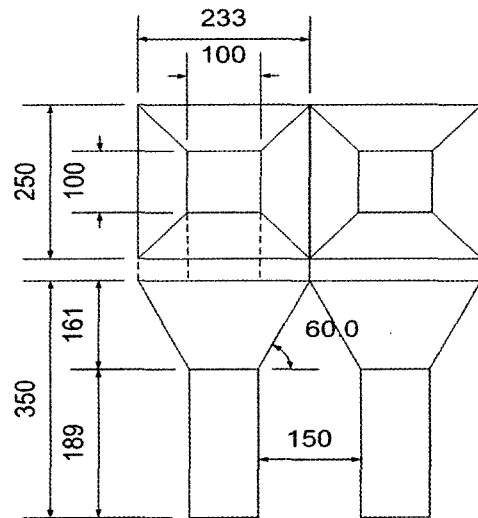


Fig. 2 View of rice inlet(Y-type chute).

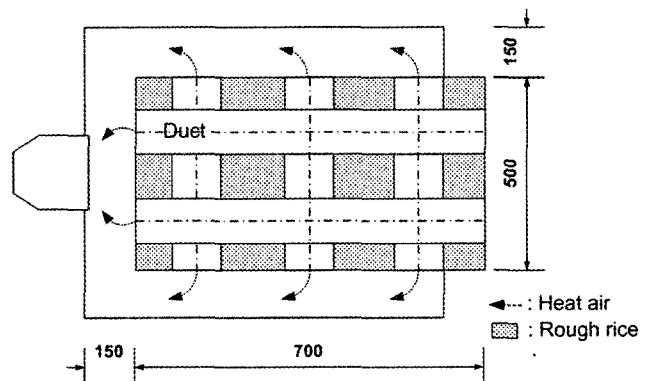


Fig. 3 Schematic diagram of exhaust duct.

배출부는 직경 43 mm의 축에 높이 26 mm, 폭 4 mm의 안내 깃을 4개 설치하여 1회전에 5.5 kg의 벼가 배출되도록 하였다. 인버터(S500, Mitsubishi, Japan)로 회전수를 제어하여 곡물의 유하속도를 4.5 m/h로 조정하였다.

**나. 공시재료**

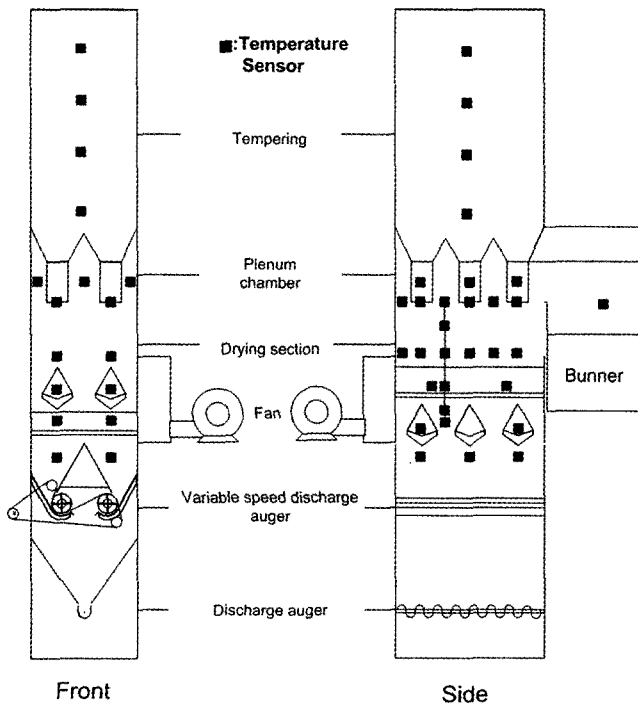
실험에 사용한 벼는 경기 화성지역에서 수확한 2004년도에 생산한 추청벼이며, 초기함수율은 21.3~22.6% 범위였다. 수확한 벼는 정선한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 1℃의 저온저장고에 보관하였다. 실험시작 24시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내어 상온에서 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험하였다.

**다. 실험방법**

표 1은 벼의 건조 실험조건을 나타낸 것으로 3회의 건조실험에서 건조온도는 3수준, 송풍량은 2수준으로 조절하였다.

**Table 1** Drying conditions for the drying tests

Test No.	Drying air temperature (℃)	Air flow rate (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	Grain flow rate (m/h)
Test-1	98	28.5	4.5
Test-2	114	28.5	4.5
Test-3	126	57.1	4.5



**Fig. 4** Positions of temperature sensors in dryer for measuring temperature distribution.

초기중량은 700 kg이었으며, 함수율이 16.0%에 도달할 때 실험을 종료하였다. 건조과정에서 30분 간격으로 약 500 g 시료를 채취하여 함수율과 동할율을 측정하였다. 함수율은 10 g-135℃-24 h 상압건조법으로 측정한 후 105℃ 건조법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하였다. 동할율은 채취한 벼를 밀봉하여 72시간 상온에 보관 후 수작업으로 왕겨를 제거하고, 정상립 250립에 대하여 동할립판별기(DC-50, S.SEIKI, Japan)를 이용하여 육안으로 측정하였다.

곡물온도는 텀퍼링부의 높이별 4개지점, 건조부의 폭방향 12개지점, 깊이방향 7개지점 및 배풍덕트하단에 6개지점, 건조공기의 온도는 유입부 및 배기부에 각각 5개 및 6개 지점에 열전대(T-type, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 측정하여 PC에 저장하였다(그림 4). 외기 2개지점, 건조공기 유입부 및 배기부 1개 지점에 온습도센서(3166, HIOKI, Japan)를 설치하여 온습도를 측정하였다. 소요전력은 전산전력계(3166, HIOKI, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 열선풍속계(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배기부에서 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, Korea)을 이용하여 30분 간격으로 측정하였다.

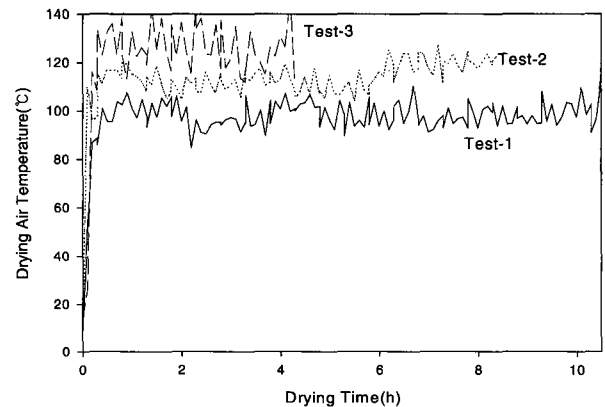
**3. 결과 및 고찰**

**가. 외기온습도**

Test-1은 평균 외기온도 7.1℃, 평균 상대습도 46%, Test-2는 평균 외기온도 4.5℃, 평균 상대습도 35%, Test-3은 평균 외기온도 13.4℃, 평균 상대습도 28.5%이었다.

**나. 건조온도 및 곡온변화**

그림 5는 건조실에 유입되는 건조공기의 온도 변화를 나타



**Fig. 5** Changes of drying air temperature during drying.

낸 것이다. 설정된 건조온도에 도달하는 시간은 약30분이었다. 평균 건조온도는 Test-1, Test-2 및 Test-3에서 각각 98.2°C (83.5~113.5°C), 113.6°C(97.9~131.6°C) 및 126.4°C(111.8~

146.4°C)로 나타났다. 건조실내에서 유입되는 건조공기와 곡물이 합류되는 각 지점의 평균온도는 Test-1, Test-2 및 Test-3에서 각각 69.6, 83.3 및 110.0°C이었으며, 온도편차는 가로방향의 경우 1.0°C이내, 세로방향의 경우는 5.0~9.0°C 범위로 설정온도가 높을수록 편차는 다소 높게 나타났지만, 높은 설정온도를 고려했을 때 온도편차는 미비한 수준으로 판단된다.

그림 6은 건조실을 통과하는 벼의 곡온변화를 순환횟수별로 나타낸 것이다. Test-1의 경우 평균곡온은 건조공기와 접촉되는 상부에서 76.8°C까지 상승한 후 건조실 하부로 유하하면서 점차 하강하여 32.3°C를 유지하였다. Test-2의 경우는 상부에서 87.3°C까지 상승한 후 건조실 하부로 유하하면서 점차 하강하였지만, 순환횟수가 증가할수록 최대 40.0°C를 유지하였다. Test-3의 경우는 설정온도(126°C)가 가장 높았지만 건조실 하부의 곡온은 23.1°C를 유지하여 이는 송풍량 (57.1 cmm/m<sup>2</sup>)이 다른 실험조건(28.5 cmm/m<sup>2</sup>)에 비해 큰 것이 원인인 것으로 판단된다.

그림 7은 건조부를 통과한 후 배출되는 건조공기의 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 배출되는 건조공기의

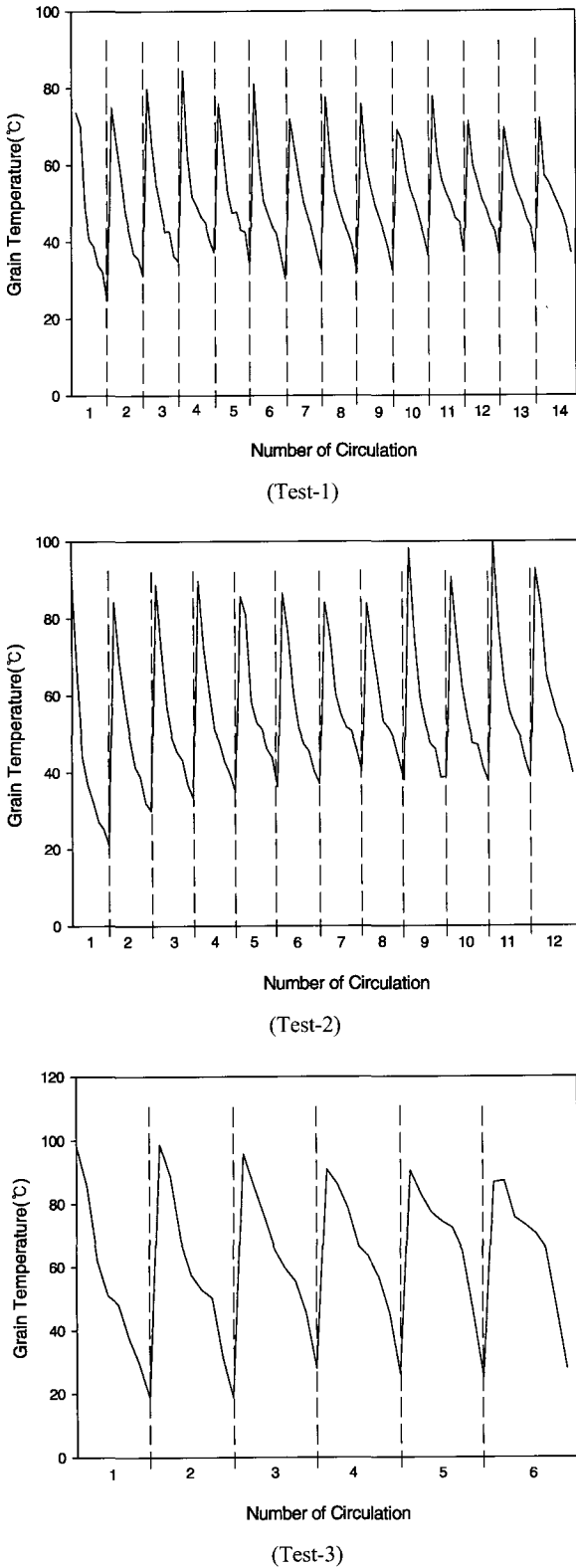


Fig. 6 Changes of grain temperature during drying.

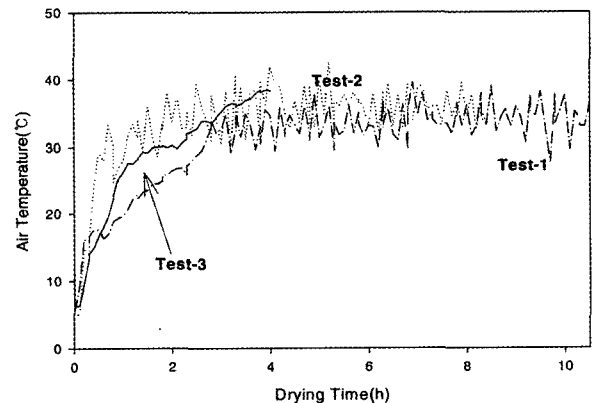


Fig. 7 Changes of exhaust air temperature during drying.

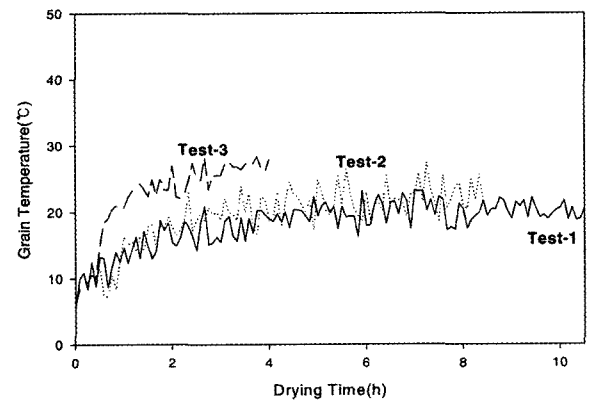


Fig. 8 Changes of tempering grain temperature during drying.

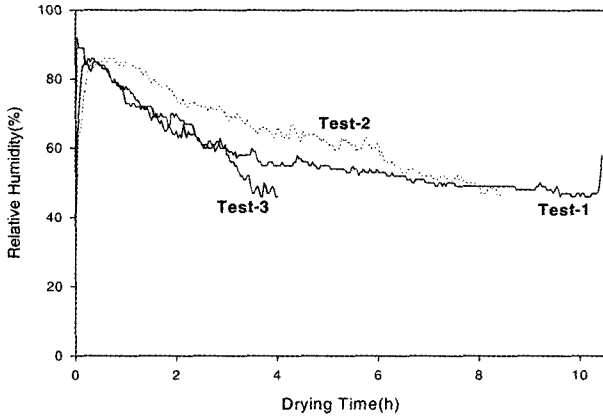


Fig. 9 Changes of relative humidities at outlet.

온도는 건조가 진행될수록 점차 증가하여 Test-1, Test-2 및 Test-3에서 각각 30.7°C, 34.9°C 및 30.8°C를 유지하여 건조실내의 곡온과 비슷한 경향으로 나타났다.

그림 8은 템퍼링실의 벼 곡온을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 템퍼링실의 평균 곡온은 Test-1, Test-2 및 Test-3에서 각각 18.7°C(4.3~29.1°C), 19.9°C(4.9~24.8°C) 및 23.5°C(10.4~30.7°C)이었으며 깊이별 곡온 차이는 없었으며, 건조가 진행될수록 점차 상승하는 것으로 나타났다.

그림 9는 건조부를 통과한 후 배출되는 건조공기의 상대습도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 배출되는 건조공기의 상대습도는 초기에 90%정도까지 상승한 후 점차 감소하였다.

**다. 건조속도**

그림 10은 건조과정 중 함수율 변화를 나타낸 것으로 건조가 진행되면서 함수율은 점차 감소하였다. 표 2는 실험조건에 따른 건조소요시간, 건조속도 및 곡물순환회수를 나타낸 것이다. Test-1은 초기함수율 22.6%에서 최종함수율 15.0%까지 건조하는데 10.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.79%/h로 나타났으며, Test-2에서는 초기함수율 22.2%에서 최종함수율 15.9%까지 건조하는데 8.5시간이 소요되어, 건조속도는 0.9%/h로 나타났다. Test-3에서는 초기함수율 21.3%에서 최종함수율을 15.4%까지 건조하는데 4.0시간이 소요되어, 건조속도는 1.46%/h로 나타났다.

**라. 에너지소비량**

표 3은 건조소요에너지를 나타낸 것으로 외기온도(2~5°C)가 낮아 건조소요에너지도 비교적 높게 나타나 Test-1, Test-2 및 Test-3에서 각각 6,224, 6,898 및 6,992kJ/kg으로 Test-1에 비해 Test-2 및 Test-3에서 높게 나타났다. 건조시간이 긴

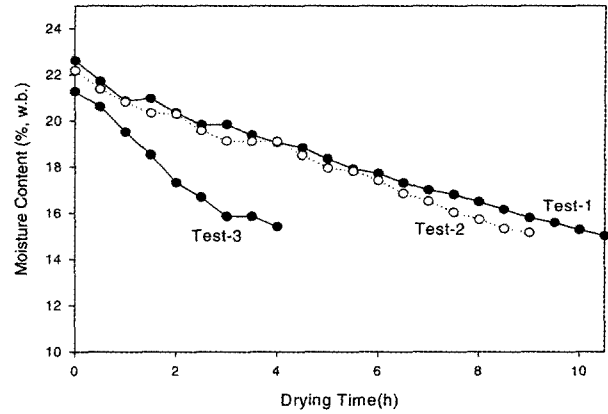


Fig. 10 Variations of moisture contents rice by drying tests.

Table 2 Drying rates and drying times

Test No.	Initial moisture content (%w.b.)	Final moisture content (%w.b.)	Drying time (h)	Drying rate		Number of circulation
				(%d.b./h)	(%w.b./h)	
Test-1	22.6	15.0	10.5	1.09	0.79	14.5
Test-2	22.2	15.9	8.5	1.12	0.9	12.0
Test-3	21.3	15.4	4.0	2.20	1.46	5.5

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	1,152	5,072	6,224
Test-2	630	6,246	6,894
Test-3	396	6,596	6,992

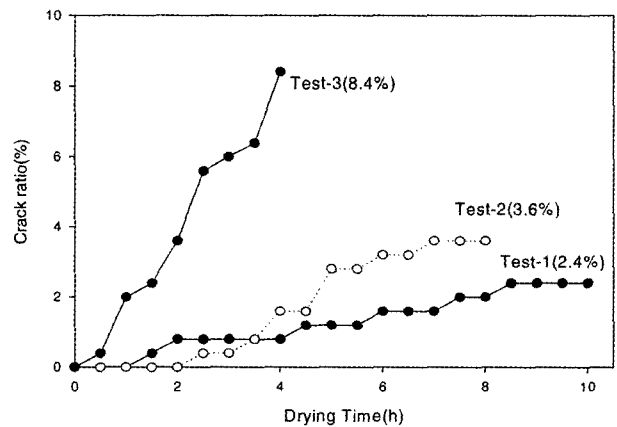


Fig. 11 Variations of crack ratio of brown rice by drying tests.

Test-1은 송풍기 소비량이 크게 나타났으며, 건조온도가 높은 Test-3은 연료 소비량이 높게 나타났다.

마. 품질특성

그림 11은 건조과정 중 동할증가율을 나타낸 것이다. Test-1은 건조 4시간 동안에는 1%미만, 이후 6.5시간동안 1.4% 증가하여 최종 2.4%까지 증가하였다. Test-2는 건조초기에는 동할증가율이 Test-1과 비슷하였으나 건조 5시간이후에는 다소 높게 증가하여 3.6%까지 증가하였다. Test-3은 건조초기부터 다소 높게 나타나 최종 8.4%까지 증가하였다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 10톤 용량의 순환식 병류형 곡물건조기를 개발하기 위한 예비 실험으로 용량 700 kg의 시작기를 개발하여 그 성능을 평가하고 본기 설계의 기초자료를 얻기 위하여 수행하였다.

- (1) 건조실험 조건은 Test-1(100°C, 28.5 cmm/m<sup>2</sup>), Test-2(120°C, 28.5 cmm/m<sup>2</sup>) 및 Test-3(120°C, 57.1 cmm/m<sup>2</sup>) 3수준의 실험을 수행하였다. Test-1, Test-2 및 Test-3에서 각각 평균 열풍온도는 98.2°C(83.5~113.5°C), 113.6°C(97.9~131.6°C) 및 126.4°C(146.4~111.8°C)이며 열풍온도 분포는 최대 5°C, 8°C 및 9°C의 차이를 보였다. 3면 배기에 의해 좌우는 온도차가 1°C미만 이었다.
- (2) Test-1은 초기함수율 22.6%에서 최종함수율 15.0%까지 건조하는데 10.5시간이 소요되었으며, 건조속도는 0.79%/h로 나타났으며, Test-2에서는 초기함수율 22.2%에서 최종함수율 15.9%까지 건조하는데 8.5시간이 소요되어, 건조속도는 0.9%/h로 나타났다. Test-3에서는 초기함수율 21.3%에서 최종함수율 15.4%까지 건조하는데 4.0시간이

소요되어, 건조속도는 1.46%/h로 나타났다.

- (3) 최종 동할증가율은 Test-1 2.4%, Test-2 3.6% 및 Test-3 8.4%로 나타났으며, Test-1, Test-2는 동할율 5%이하였고 Test-3는 고온의 건조공기와 많은 송풍량으로 건조속도는 높으나, 동할율이 많이 증가하였다. 소요에너지는 6,224 kJ/kg, 6,898 kJ/kg 및 6,992 kJ/kg이 소비되었으며, 실험중 설계 온도보다 낮은 외기에 의해 에너지 소비량이 높았다. 건조기 형식에는 매우 만족스런 결과를 얻었으며, 열풍의 온도는 110°C이상, 송풍량은 28.5 cmm/m<sup>2</sup>이 적정하다고 판단된다.

참고 문헌

1. Keum, D. H. 1986. Analysis of performance for rice circulating dryer using simulation. Sungkyunkwan Univ. 37(1).
2. Keum, D. H and W. S. LEE. 1988. Simulation of rice circulating concurrent-flow dryer. J. of the KSAM 13(3):59-70.
3. Bakker-Arkema, F. W., R. C. Brook. L. P. Kalchik., S.J and Adnania. A. 1977. Concurrent flow grain drying grain quality aspects. Corn Quality Res. Conf. Proc., Univ. of ILL., Urban, IL.
4. Brook. R. C and F. W. Bakker-Arkema, 1977. Design of multi stage grain dryers using computer optimization. ASAE Paper No. 77-3529.
5. Walker. L. P and F. W. Bakker-Arkema. 1981. Energy efficiency in concurrent flow rice drying. Transactions of the ASAE 1352:1356.
6. Bakker-Arkema. F. W., 1982, Concurrent-flow rice drying, ASAE Paper No. 82-3068.