

순환식 병류형 곡물건조기 개발(I)

- 시작기의 성능시험 -

Development of a Rice Circulating

Concurrent-flow Dryer(I)

-Performance Test of Pilot Scale Dryer-

금동혁*	한종규**	강성렬**	김의웅***	김 훈***	한재웅*	홍상진*
정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원	정회원

D. H. Keum J. G. Han S. R. Kang O. W. Kim H. Kim J. W. Han S. J. Hong

1. 서론

곡물건조기는 건조속도를 유지하면서 건조 중 동할 발생과 건조소요에너지가 최소화가 되도록 설계되어야 한다. 따라서 일반적으로 곡물건조기의 성능은 건조속도, 건조 곡물의 품질 및 건조소요에너지의 3개의 성능요인으로 평가한다. 새로 개발되는 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 5,000~7,000kJ/kg-H₂O 정도이다(금, 1986). 일반적으로 횡류형 건조기는 곡물이 균일하게 열풍에 노출되지 않는 단점이 있으며, 이를 극복하기 위하여 건조 중에 곡물을 혼합하는 다양한 방법이 채택되고 있다. 그러나, 횡류형은 불균일 건조를 피할 수 없는 구조이며, 이러한 단점 때문에 건조속도를 향상시키거나 소요에너지를 절감하는데 한계가 있다. 이에 비하여 병류형은 건조 원리상 모든 곡물이 동일한 열풍에 노출되므로 불균일 건조를 피할 수 있는 장점이 있다.

이러한 병류형 건조기의 장점 때문에 병류형 곡물건조기의 개발을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

금(1993)은 용량 2,000kg 정도의 병류형 건조기를 이용한 벼 건조 실험에서 건조온도를 110-100-90-80℃의 4단계로 조절하고 송풍량은 25cm³/m²으로 건조할 때 건조속도는 2.05%,w.b./hr, 곡온은 36℃이하를 유지하여 완전미 수율이 건조전후 2.1% 감소한 것으로 보고하였다.

* 성균관대학교 생명공학부

** 한성공업(주)

*** 한국식품연구원

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

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

본 연구는 10톤 용량의 농가용 순환식 병류형 곡물건조기를 개발하기 위하여 수행하였으며, 예비 실험으로 용량 700kg의 시작기를 개발하여 건조속도(설계목표 1.0~1.2% ,w.b./hr), 동할율(5%이하) 및 소요에너지(5000kJ/kg-water이하)가 설계목표에 적합한지를 평가하고, 본기 설계의 기초자료를 얻기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 건조장치

그림 1은 순환식 병류형 곡물건조기의 개략적인 구조와 열풍 및 곡물의 흐름을 나타낸 것이다. 건조기는 템퍼링실, 건조실, 순환장치 및 제어부가 있다. 템퍼링실에 퇴적된 곡물은 Y형 슈트를 통하여 건조실로 유입되어 서서히 하강한다. 열풍은 건조실 상부의 Y형 슈트 사이의 plenum chamber 로 유입되어 건조실의 곡물을 수직으로 통과하여 배기 덕트를 통하여 외부로 방출된다. 건조기의 용량은 건조실과 템퍼링실을 합한 700kg이며, 건조기의 외형 치수는 500×700×4,600(L×W×H)mm이다. 템퍼링실의 높이는 2,500mm이고 건조실의 높이는 500mm로 하였다.

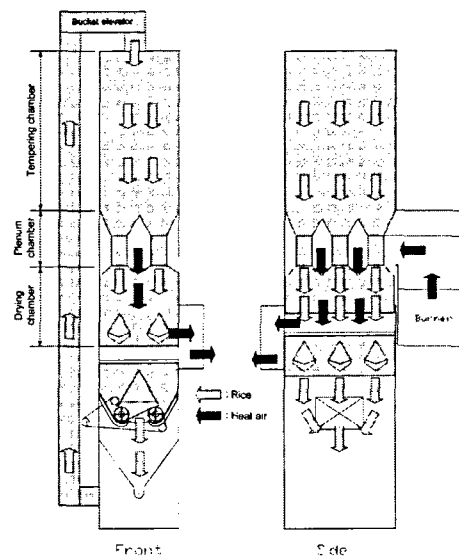


Fig. 1 Schematic diagram of rice circulating concurrent-flow dryer.

그림 2는 건조실의 단면도다. 그림에서 음영부분이 곡물이 건조실에 채워진 단면적이다. 이 단면적(0.261m²)에 건조실의 폭 700mm를 곱한 값이 건조실용적(0.193m³)이다. 건조실과 템퍼링실의 용적비는 1대 4~6으로 하였다. 템퍼링실의 용적은 0.875m³이다.

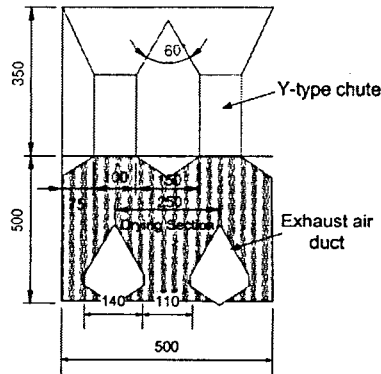


Fig. 2 Schematic diagram of drying section.

그림 3은 곡물을 건조실에 골고루 분배하기 위한 Y형 슈트의 치수와 제작된 사진이다. 상단은 크기는 233×250(L×W)mm이며, 하단은 100×100(L×W)mm정사각형으로 하였다. Y형슈트는 가로 2열, 세로 3열 총 6개이며, 슈트상부 깔대기부의 경사각은 안식각을 고려하여 60°로 하여 벼의 흐름을 원활하게 하였다. 슈트사이의 간격은 150mm로 하였다.

그림 4는 배풍덕트의 치수와 제작된 사진이다. 배풍덕트는 상단 2열과 하단 3열을 서로 직교되게 설치하였다. 배풍덕트는 곡물의 흐름에 영향이 없도록 안식각을 고려하여 정삼각형으로 제작하였다. 상단 2열의 덕트는 앞면, 하단 3열의 덕트는 약 측면이 개방되어 배기가 유출되도록 하였다. 덕트의 단면적은 공기유속이 2.91m/s가 되도록 결정하였다.

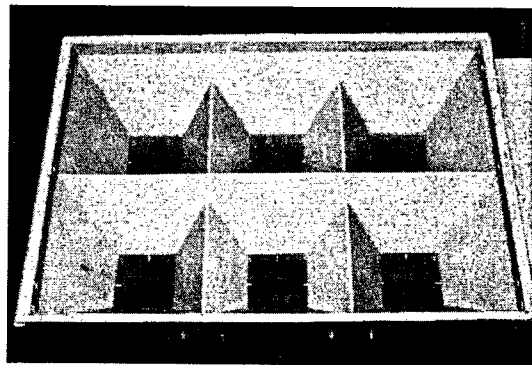
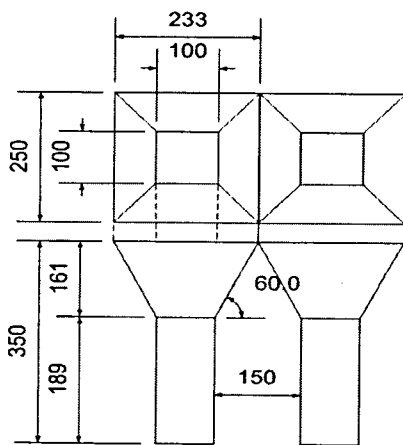


Fig. 3 View of rice inlet(Y-type chute).

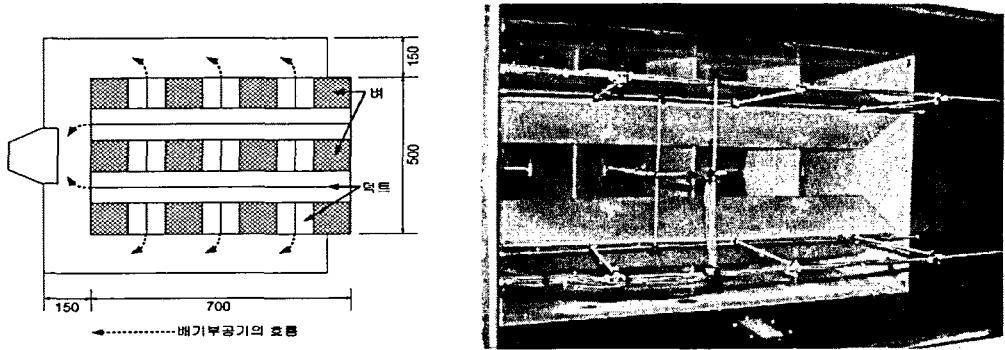


Fig. 4 View of air outlet.

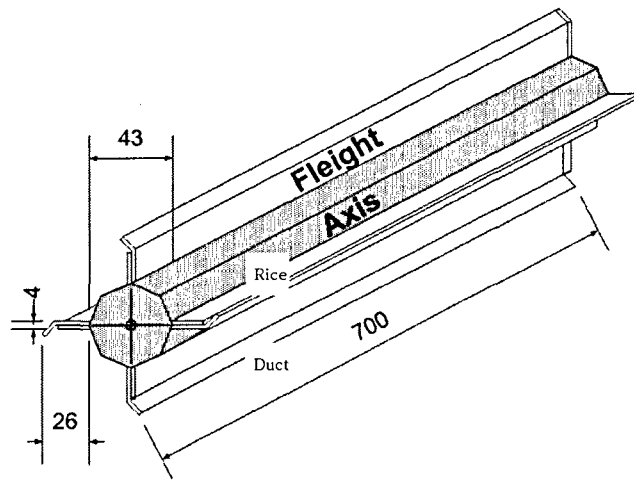


Fig. 5 Schematic diagram of exhaust rice roller.

곡물의 균일한 배출을 위해 그림 5와 같이 직경 43mm의 축에 높이 26mm, 폭 4mm의 플라이트를 4개를 설치한 배출장치로 1회전에 약 5.5kg의 벼가 배출된다. 이러한 배출장치를 2열로 설치하였다.

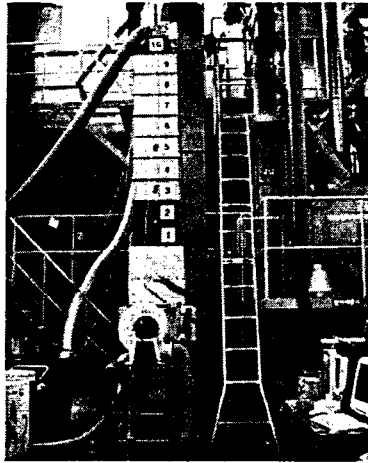


Fig. 6 View of rice circulating concurrent-flow dryer.

나. 실험방법

실험에 사용한 벼는 2004년 10월에 경기 화성지역에서 수확한 추정벼이며, 초기함수율은 23.0%(w.b.)였다. 수확한 벼를 정선한 후 함수율 변화를 최소화하기 위하여 1℃의 저온저장고에 보관하였다. 실험시작 24시간 전에 벼를 저온저장고에서 꺼내 상온에서 주위 공기온도와 평형을 이루도록 한 후 실험에 사용하였다.

표 1은 건조 실험조건을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 열풍온도는 3수준, 송풍량은 2수준으로 조절하였다. 건조 시작후 매 30분 간격으로 약 500g 시료를 채취하여 함수율과 동할율을 측정하였다. 함수율이 19.0%(d.b.)에 도달할 때 실험을 종료하였다. 함수율은 10g-135℃-24hr 상압건조법으로 측정한 후 105℃건조법으로 환산하였으며, 3회 반복 측정하였다. 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.

Table 1 Drying conditions for the drying tests

Test No.	Drying air temperature (℃)	Air flow rate (cmm/m ²)	Grain flow rate (m/hr)	Resident time/pass (min)	Tempering time/pass (min)
Test-1	98	28.5	4.5	6.27	37.00
Test-2	114	28.5	4.5	6.27	37.00
Test-3	126	57.1	4.5	6.27	37.00

건조 중 외기조건을 측정하기 위해 외부 2지점, 열풍온도를 측정하기 위하여 열풍유입부 9지점 및 배기부 6지점, 곡온을 측정하기 위하여 템퍼링실내의 높이별 4지점, 건조실의 폭방향 12지점, 깊이방향 7지점 및 배풍덕트하단에 6지점에 대하여 열전대(T TYPE, OMEGA, USA)를 설치하고 자료 수집장치(7327, DATASCAN, UK)로 30초 간격으로 온도를 측정하

여 PC에 저장하였다. 또한 외기 및 배기부에 습도계(TR-72,TAND-D, JAPAN)를 이용하여 측정하였다. 소요전력은 적산전력계(3166, HIOKI, JAPAN)을 이용하여 측정하였으며, 송풍량은 Hot-wire-anemometer(VELOCICALC-PLUS, TSI, USA)를 이용하여 배풍부에서 측정하였다. 연료소비량은 전자저울(A-200, CASS, KOREA)을 이용하여 사용된 연료량을 30분 간격으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 외기온습도

표 2는 2005년 2월말부터 3월초까지 실시한 건조실험중의 외기온습도를 나타낸 것이다. 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%로 나타났다.

Table 2 Ambient air temperatures and relative humidity during drying tests

Test No.	Ambient air temperature(℃)	Ambient relative humidity(%)
Test-1	7.1(5.5~8.3)	46.0(39.0~56.0)
Test-2	4.5(3.2~5.8)	35.0(28.0~43.0)
Test-3	13.4(12.6~14.2)	28.5(23.0~33.0)

나. 건조온도 및 곡온변화

그림 7은 건조실에 유입되는 열풍온도의 변화를 나타낸 것이다. 초기에 설정 열풍온도에 도달하는 시간은 약 30분이었으며, Test-1의 열풍온도는 평균 98.2℃(83.5~113.5℃), Test-2 열풍온도 평균 113.6℃(97.9~131.6℃), Test-3은 열풍은 평균 126.4℃(146.4~111.8℃)로 나타났다. 고열의 열풍온도는 버너의 On/Off시 변화가 크게 나타나 온도편차가 비교적 크게 나타났다.

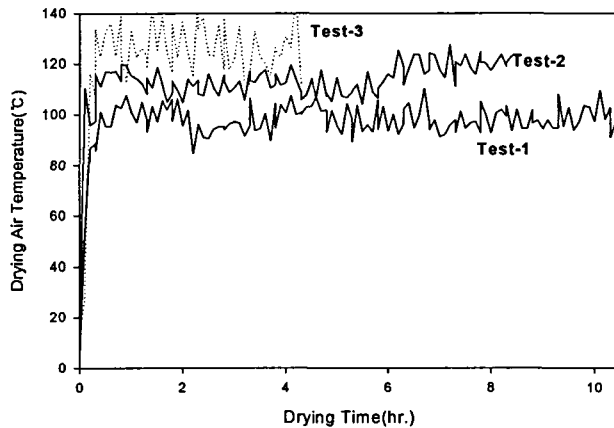


Fig. 7 Changes of drying air temperature during drying.

그림 8은 순환시 건조실의 높이별 곡온 변화를 나타낸 것이다. Test-1에서 열풍유입부에서 평균 76.8℃까지 상승한 후 건조실을 유하하면서 하강하여 배출시 평균 32.3℃를 유지하였다. Test-2는 평균 87.3℃로 상승한 후 배출시 평균 35.3℃로 유지하였다. Test-3은 평균 96.3℃로 상승한 후 배출시 평균 23.1℃로 유지하였다. 모든 실험에서 곡온이 평균 35.0℃이하로 품질에 영향을 주는 온도 이하로 배출되었다.

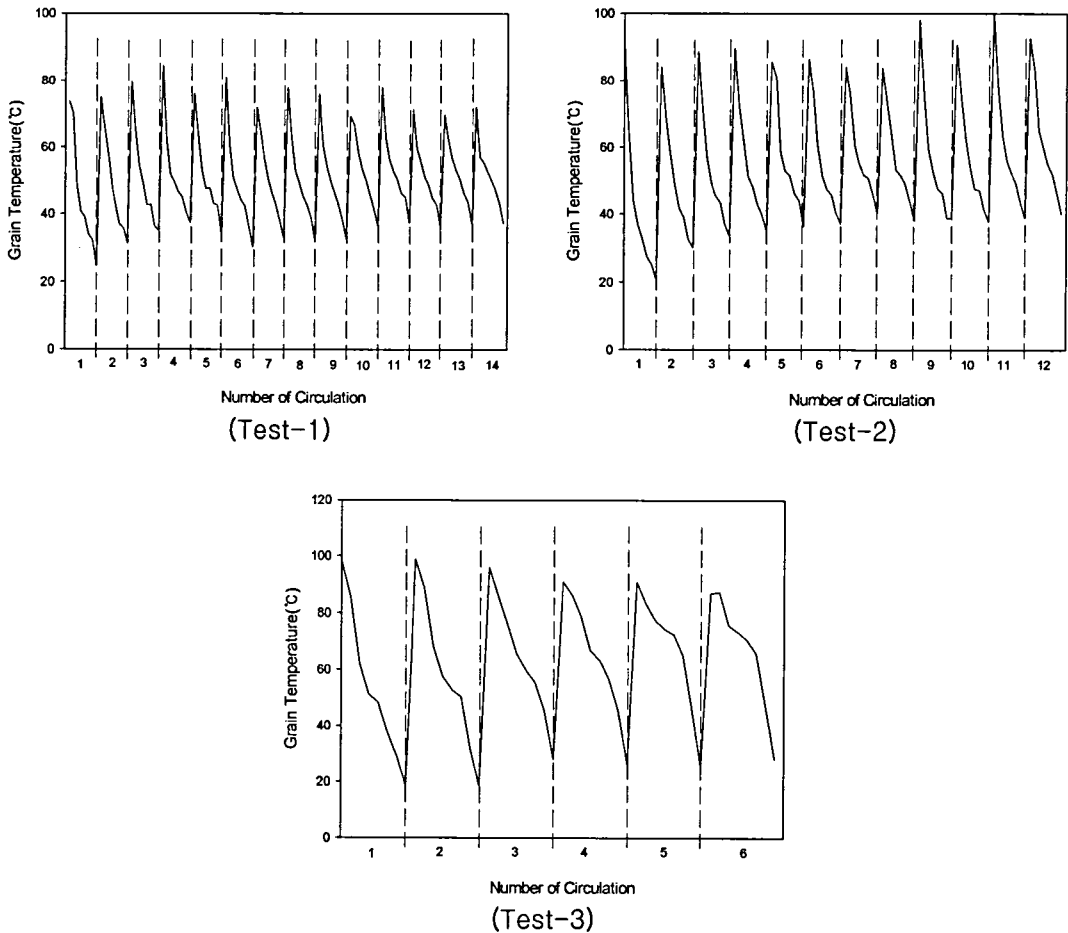


Fig. 8 Changes of Grain Temperature.

그림 9은 배기 상대 습도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Test-1, Test-2는 배기구의 상대습도가 초기에 90%이상으로 나타났으며, 이후 점차 감소하여 50%이하로 낮아지는 것으로 나타났으며, Test-3은 초기 87%에서 점차 감소하여 56%까지 낮아지는 것으로 나타났다. 유입공기의 Test-1의 절대습도 0.0029kg-H₂O/kg-dryair, Test-2는 절대습도 0.0018 kg-H₂O /kg-dryair 및 Test-3은 0.0027kg-H₂O/kg-dryair 였으며, 배풍구 절대습도

는 Test-1, Test-2의 절대습도는 0.0327kg-H₂O/kg-dryair, Test-3은 0.0216 kg-H₂O/kg-dryair로 증가하였다.

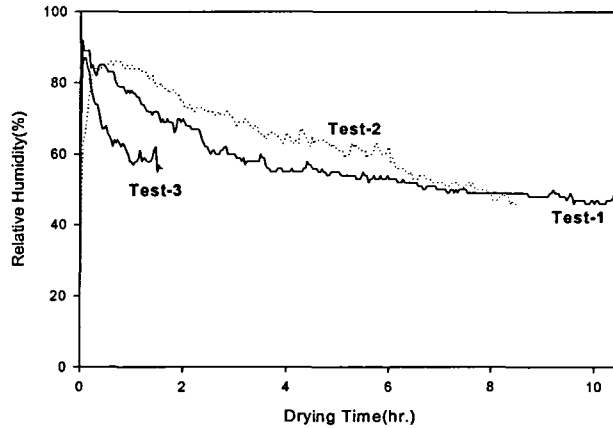


Fig. 9 Changes of relative humidities at outlet.

다. 건조속도

표 3은 건조온도 및 송풍량에 따른 건조속도를 나타낸 것이다. Test-1의 건감율은 1.09%,d.b/hr, Test-2는 건감율은 1.12%,d.b/hr, Test-3은 건감율은 2.2%,d.b/hr으로 Test-1 및 Test-2는 건감율은 Test-3와 비교시 2배에 가까운 차이를 보였다. Test-1, Test-2는 열풍온도가 낮고 송풍량이 작아 설계목표 1.0~1.2%,w.b/hr보다 낮게 나왔다. Test-3은 설계목표를 충족하며, 건조온도는 약 120℃가 적정하였다.

Table 3 Drying rates and drying times

Test No.	Initial moisture content (%d.b.)	Final moisture content (%d.b.)	Drying time (hr)	Drying rate		Number of circulation
				(%d.b./hr)	(%w.b./hr)	
Test-1	29.2	17.7	10.5	1.09	0.79	14.5
Test-2	28.5	18.9	8.5	1.12	0.9	12.0
Test-3	27.0	18.2	4.0	2.20	1.46	5.5

라. 에너지소비량

표 4는 건조온도 및 송풍량에 따른 에너지소비량을 나타냈다. Test-1은 총에너지소비량이 6,224kJ/kg-water, Test-2는 총에너지소비량이 6,898kJ/kg-water, Test-3의 총에너지소비량은 6,992kJ/kg-water나타났다. 에너지소비량이 비교적 큰 값을 나타낸 것은 건조실험 중 외기온도가 2~5℃로 매우 낮아 연료에너지소비량이 많았기 때문이다.

Table 4 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

마. 품질특성

그림 10는 건조 중의 동할증가율을 나타낸 것이다. Test-1의 최종동할증가율은 2.4%이었으며, 건조 초기 4시간 동안에는 (함수율 24.0%(d.b.)) 동할이 1%미만으로 증가하였으며, 이후 6.5시간동안 1.4%증가 하였다. Test-2는 최종동할증가율은 3.6%로 초기 3시간동안 동할증가율이 Test-1과 비슷하였으나 이후 빠른 증가를 나타내었다. Test-3은 최종동할증가율이 8.4%로 초기부터 빠른 동할증가율을 나타내었다. Test-1, Test-2는 설계목표 5%미만이나, Test-3는 5%를 초과하여 나타났다. 이는 높은 송풍량으로 인해 고온의 노출시간이 많은 결과로 판단된다.

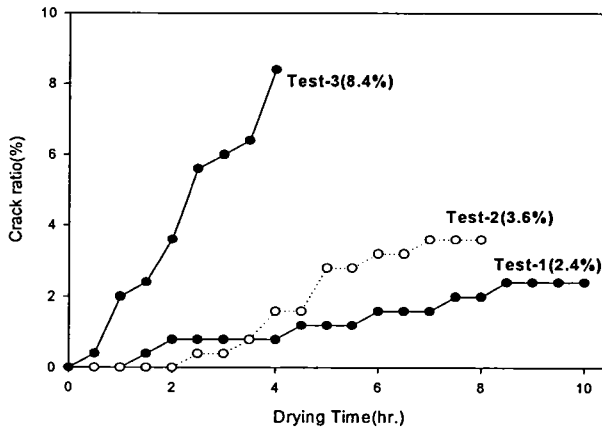


Fig. 10 Variations of crack ratio of brown rice by drying tests.

4. 요약 및 결론

본 연구는 10톤 용량의 농가용 순환식 병류형 곡물건조기를 개발하기 위하여 수행하게 되었으며, 예비 실험으로 용량 700kg의 시작기를 개발하여 건조속도(설계목표 1.0~1.2% ,w.b./hr), 동할율(5%이하) 및 소요에너지(5,000kJ/kg-water이하)가 설계목표에 적합한지를 평가하고, 본기 설계의 기초자료를 얻기 위하여 수행되었다.

가. 초기 함수율 23.0%(w.b.)의 벼를 건조하여 목표함수율 16%(w.b.)까지 Test-1(100℃, 28.5cmm/m³), Test-2(120℃, 28.5cmm/m³) 및 Test-3(120℃, 57.1cmm/m³) 3수준의 실험을 수행하였다.

나. 건감율은 Test-1은 0.73%,w.b./hr, Test-2는 0.9%,w.b./hr 및 Test-3은 1.46%,d.b./hr로 나타났다. Test-1, Test-2는 열풍온도가 낮고 송풍량이 작아 설계목표 1.0~1.2%,w.b./hr보다 낮게 나왔다. Test-3은 설계목표를 충족하며, 건조온도는 약 120℃가 적정하였다.

다. 송풍량은 700kg용량을 기준으로 기존 횡류형 건조기 송풍량은 12~14cmm 사용하나 순환식 병류형 곡물건조기는 Test-1, Test-2는 10cmm으로 20~31%의 절감을 보였다. 최종 동할증가율은 2.4%, 3.6% 및 8.4%로 나타났으며. Test-1, Test-2는 설계목표 동할율 5%이하였고 Test-3는 고온의 열풍과 많은 송풍량으로 건조속도는 높으나, 동할율이 많이 증가하였다. 소요에너지는 6,224.51kJ/kg, 6,898.28kJ/kg 및 6,992.57kJ/kg이 소비되었으며. 실험중 설계 온도보다 낮은 외기에 의해 에너지 소비량이 높았다.

위의 결과를 토대로 건조속도는 기존 순환식 횡류형 곡물건조기보다 건조속도, 동할은 매우 만족한 수준을 보였다. 실험용 순환식 병류형 곡물건조기의 성능은 우수한 것으로 판단된다. 따라서, 대용량 순환식 병류형 곡물건조기로 개발 가능성이 있다고 판단된다.

5. 참고문헌

1. 금동혁, 1986. 시뮬레이션에 의한 순환식 곡물건조기의 성능분석. 성균관대학교논문집 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 Adna dnia. 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