

순환식 유채건조기 개량 연구

김유호 최희석 권진경 조광환 윤홍선 김동선

A Study on the Improvement of the Circulation Dryer for Rapeseed

Y. H. Kim H. S. Choi J. K. Kwon K. H. Cho H. S. Yoon D. S. Kim

Abstract

Current high oil price and the agreement on global climate change prevention have increased worldwide investment and research on renewable energy.

In Korea, development of a rapeseed dryer for bio-diesel production has been started in 2007. Usually, rapeseeds are harvested in early summer, because rice cultivation is followed right after rapeseed harvesting. Early harvest and bad summer results in highly moistured rapeseed and development of artificial drying system is required to dry great amount of rapeseed that couldn't be processed by sun drying alone.

The rapeseed dryer was modified from an existing circulation type grain dryer. Modification of the dryer was performed with the aid of CFD simulation.

Drying test showed that drying rate of rapeseed was 1.51%/h and germination rate reduction was 4.5%p for the drying temperature of 60°C.

Keywords : Rapeseed, Circulation type rapeseed dryer, CFD simulation, Germination rate

1. 서론

세계 각국은 석유자원 고갈에 따른 유가 급등과 수급 불안정, 기후변화 협약 등에 대응하기 위해 신재생 에너지에 관한 기술 개발에 주력하고 있다. 이와 관련하여 우리 정부도 2007년부터 바이오디젤 원료용 유채 대량생산 시범사업(3개소, 1,500 ha)을 추진하는 등 농업부문에 있어서의 신재생에너지 자원 확보를 위해 다각적인 노력을 기울이고 있다. 그 일환으로 바이오디젤 원료용 유채의 대량생산을 위한 유채재배 일관기계화 기술을 중점 개발하여 지금까지 유채파종기, 유채 콤팩트, 정전기 등이 시범사업에 투입 활용되는 등 유채 재배 기계화 일관시스템이 완성되어 가고 있다.

그러나 유채는 함수율 10%(wb) 이하가 되어야 장기간 안전하게 저장할 수 있고, 품질저하도 방지할 수 있어 수확후

빠른 기간 내에 건조시켜야만 한다. 유채의 저장기간은 함수율이 13%(wb)이고 온도가 15°C일 때 최고 50일까지 저장이 가능하다고 한다(NDSU, 2008).

또 유채의 수확시기가 벼 이앙시기와 중복되기 때문에 노동력이 매우 집중되고 단기간에 처리해야 하는 어려움도 문제점으로 남아 있다.

특히, 후작으로 벼를 이앙해야 하기 때문에 농가에서는 유채를 조기 수확하는 경우가 많아 함수율이 매우 높고, 수확시기에 일기도 불순한 경우가 많아 자연건조방법으로는 유채를 안정적으로 건조시키기에는 한계가 있어 유채 건조작업의 기계화가 절실히 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 벼, 보리 등의 곡물에 비해 종자가 작은 유채에도 적용 가능한 건조기의 개발을 위하여 1) CFD 시뮬레이션을 통한 건조실 곡물층 내에서의 기류해석을 하였

The article was submitted for publication on 2008-09-26, reviewed on 2008-11-07, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-11-28. The authors are You Ho Kim, Hi Seok Choi, Kwang Hwan Cho, Hong Sun Yoon, Senior Researcher, Jin Kyung Kwon, Post doctor, Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, and Dong Sun Kim, Han Sung Ltd. Co., Corresponding author: H. S. Choi, Senior Researcher, National Academy of Agricultural Science, Suwon, 441-707, Korea; E-mail: <chs1472@ rda.go.kr>.

고, 2) 시뮬레이션 결과를 근거로 기존 순환식 곡물건조기를 개량하여 유채 건조시험을 실시하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 시험에서 사용한 유채는 2008년산 장흥, 영광지역에서 수확한 선망 품종이다. 수확 당시 함수율은 표 1에서 보는바와 같이 25.9~33.2%(wb)로 수확시기에 따라 함수율의 변화가 컸다. 공시재료의 함수율은 130℃ - 4 h - 10 g(ASAE standard, 2001) 드라이 오븐법으로 측정하였으며, 건조기에 투입한 유채의량은 건조전의 무게이다.

나. 공시 건조기

시험에 사용된 건조기는 순환식 곡물건조기로서 순환부, 건조부, 템퍼링부 등으로 구분된다(Fig. 1). 본 연구에서는 템퍼링부(저장부)와 순환부는 기존의 모델을 그대로 사용하고, 건조부를 유채 건조가 가능하도록 개량하였다.

현재 사용하고 있는 순환식 곡물건조기가 유채건조에 적합하지 않은 이유는 건조실 다공판의 타공 직경이 너무 커서 유

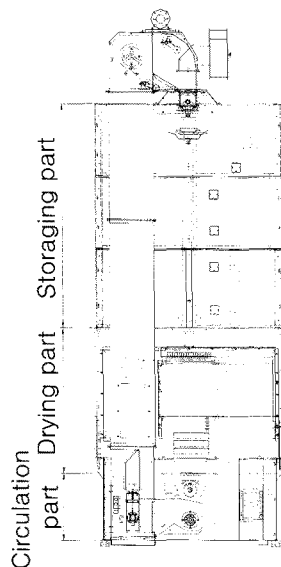


Fig. 1 Schematic diagram of a circulation grain dryer.

채가 순환하면서 다공판으로 빠져 열풍공기에 노출이 되지 않아 건조속도가 떨어지는 것과 배기팬의 흡입력으로 인해 밖으로 날아가는 손실 때문이다. 이를 해결하기 위하여 건조실의 다공판의 구멍 직경을 2.3 mm에서 1.5 mm로 줄이는 반면, 개공률은 32%에서 35%로 확대하여 열풍공기의 유동을 원활하도록 개량하였다.

또한 건조중 함수율을 측정할 수 있는 수분측정기에 유채 수분측정 기능을 추가하여 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 하였다. 개량 모델로 선정된 순환식 곡물건조기는 한성공업주식회사 HSD3.2톤 용량의 건조기였다.

다. 시험방법

1) CFD시뮬레이션을 통한 기류해석

건조실 내의 유채층을 통과하는 열풍 기류의 속도분포를 확인하기 위해 전산유체역학을 적용하였다. 건조실 형상의 좌우 대칭성을 고려하여 전 영역의 1/2만을 대상으로 하였으며, 가열부에 연결된 입구에는 대기압 조건을 주었고, 배기팬에 연결된 출구에는 속도 경계조건을 주었다. 건조기 내부의 기류는 정상, 비압축성의 3차원 난류로 간주하여 난류모델로는 RSM을 적용하였다. 위의 가정에 기초하여 수치해석에 적용된 시간평균 Navier-Stokes 방정식과 레이놀즈응력 수송방정식을 텐서형식으로 나타내면 다음 식 (1), (2)와 같다(FLUENT 6.2(2005); Ergun, 1952).

개공률이 35%인 다공판은 Porous jump 모델, 다공판 사이의 32%의 공극률을 가지는 유채층은 Porous media로 모델링하였다. 지배방정식은 모두 유한체적법(FVM) 기반의 범용 수치해석 코드인 FLUENT 6.2(2005)를 사용하여 계산하였다.

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + S_i \quad (1)$$

$$U_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\overline{u_i u_j u_k} + \frac{p}{\rho} (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j) \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial (\overline{u_i u_j})}{\partial x_k} \right] - \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right) + \frac{p}{\rho} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - 2\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \quad (2)$$

Table 1 Experimental materials

Variety	Region	Harvest date	Initial MC (%wb)	Capacity (ton)	Drying temp. (°C)	Remarks
SUNMANG	Jangheung	6. 2	33.20	3	60	◦ Before drying weight ◦ Bulk density: 712 kg/m ³
SUNMANG	Jangheung	6. 9	25.90	3	55	
SUNMANG	Yeonggwang	6. 17	30.42	3	50	

그림 2는 이 CFD시뮬레이션에 대한 검증용 속도데이터를 얻기 위해 실제 건조실의 내부에 속도센서(HD403TS4, Delta Ohm, Italy)를 설치하여 유속을 측정할 위치 좌표를 보여준다. 가열부에서 공급된 열풍이 유채층을 통과한 후 유입되는 외측 공간에 대해 전/중/후단 및 상/중/하층 등 9점의 유속을 측정하여 CFD 예측치와 비교하여 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하였다.

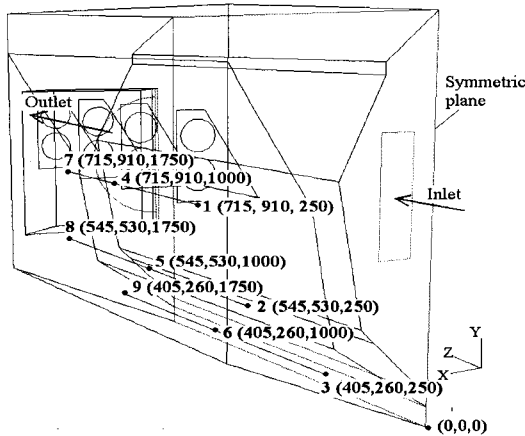


Fig. 2 Measuring positions for airflow velocity.

2) 건조시험

가) 유채시료 온도변화

건조과정중 탭퍼링실, 건조실에서의 유채시료 온도 및 배풍실의 온도분포를 측정하여 유채 건조중에 유채시료 온도의 변화를 측정하였다. 측정방법은 건조실 상단 중앙부와 하단 중앙부에 온도센서(Pt 100 Ω)를 설치하여 다점온도기록계(DAQ32 Plus Historical Viewer, YOKOGAWA, Japan)로 기록하여 PC로 전송된 자료를 파일로 저장하였다. 이때 외기 온과 외기 습도를 동시에 기록하여 외부환경에 따른 온도변화도 분석하였다.

나) 건조특성곡선

건조온도를 50℃, 55℃, 60℃로 설정하여 건조시간 및 건조중 함수율 변화를 분석하였다. 건조중 함수율은 초기함수율 측정방법과 동일한 방법을 사용하여 1~2시간 간격으로 측정하였고, 건조 수매기준 함수율인 10% 부근에서 건조를 종료하였다.

건조속도는 함수율비로 표시하였고, 유채의 평형함수율 모델은 수정 Henderson Model를 적용하여 구한 Kim et al. (2007)의 연구결과를 사용하였다(ASAE standard, 2001; Koh et al., 1997).

$$RH = 1 - \exp[-K(T+C)(100Me)^N] \tag{3}$$

$$Me = 0.01 \left[\frac{\ln(1-RH)}{-K(T+C)} \right]^{1/N} \tag{4}$$

여기서,

RH : 평형상대습도(소수, db)

Me : 평형함수율(소수)

T : 온도(℃)

K=0.00028, C=38.3729, N=1.7844

다) 발아율

종자용으로 사용하고자 하는 유채의 적정 건조온도를 구명하기 위하여 건조온도에 따라 유채시료 발아율을 측정하였다. 유채시료 발아율 시험은 직경 210 mm 원형 사래에 흡습지를 깔고 수분을 충분히 적신 다음 무작위로 채취한 유채를 100립씩 넣은 시료 3세트를 준비하였다. 발아율은 미리 준비된 시료를 25℃로 설정한 항온기(한국제작소) 챔버에 넣어두었다가 4일후에 발아립수를 세어 백분율로 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

가. CFD시뮬레이션 결과

1) 건조기 내부 유동장 해석

그림 3은 건조실 내부 기류의 유선분포를 나타내고 있다. 가열부측에서 공급된 기류는 열풍실, 내측 다공판, 유채층, 외측 다공판, 배풍실을 차례로 통과한 후 배기팬에 의해 외기로 배출된다. 유선의 분포로부터 유채층의 상/중/하층에 걸쳐 기류의 속도가 균일함을 알 수 있었다.

그림 4는 건조실 내부의 등속선과 등압선 분포를 나타내고 있다. 그림 5(a)의 속도분포는 가열부측에서 유입된 건조공기가 다공판 사이의 유채층을 통과하면서 감속되고, 이때 유채

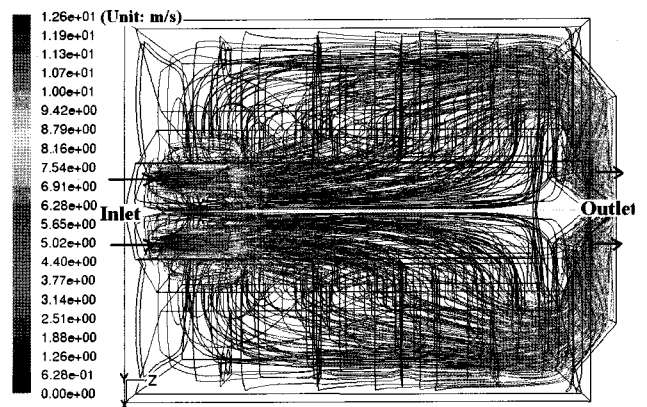


Fig. 3 Top view of airflow streamline in the dryer.

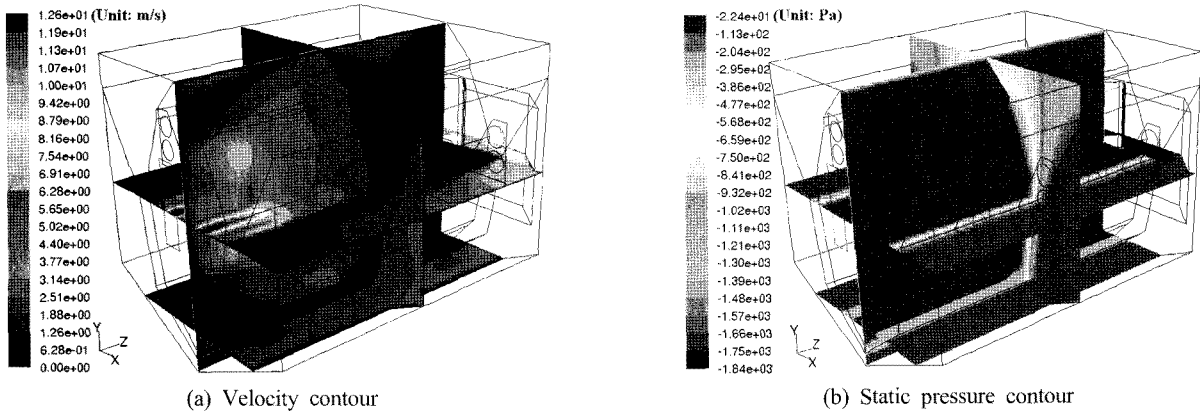


Fig. 4 Airflow velocity and static pressure contours at $y=0.26, 0.91$ m, $z=1.0$ m and symmetric planes.

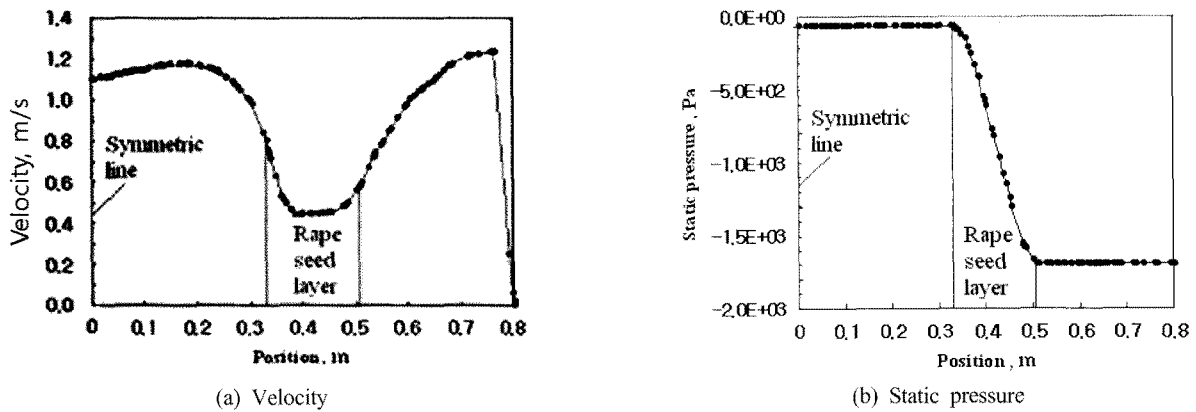


Fig. 5 Airflow velocity and static pressure profiles along x-direction at the center location ($y=0.91$ m, $z=1.0$ m).

층 내부에서 공기속도는 전/중/후단 및 상/중/하층에 걸쳐 균일하게 나타났다. 그림 5(b)의 정압분포는 건조실 내부의 압력이 배기팬의 작동에 의해 전체적으로 부압 상태로 나타나고 있다. 대기압 상태의 가열부층에서 유입된 건조 공기는 유체층을 통과하면서 압력이 점진적으로 감소하며, 통과 후 배기팬의 영향을 직접적으로 받아 낮은 부압 상태를 유지하였다.

그림 5는 하류방향($y=0.91$ m) 중간지점($z=1.0$ m)에서 x방향으로의 유속과 정압분포를 표시한 것이다. 그림 5(a)의 속도분포를 통해 건조공기는 유체층에 유입되기 직전에 급속히 감속되며, 유체층의 중심부에서 최저 유속상태가 되었다가 점진적으로 가속되며 유체층을 빠져나감을 알 수 있었다. 이때 유체층 중심부에서 최저 유속은 겉보기 속도 기준으로 약 0.4 m/s 이상이 유지되었다. 그림 5(b)의 정압분포를 보면, 가열부층에서 공급된 대기압보다 약간 낮은 유동이 유체층을 통과하면서 점차적으로 감압되며, 유체층을 통과한 후에는 상당히 낮은 부압 상태가 유지되었다.

이상의 건조실 내부기류에 대한 CFD 해석 결과, 유체층을 통과하는 유동은 전/중/후단 및 상/중/하층에 걸쳐 거의 균일하게 분포하며, 유체층을 통과하는 실제 공극유속도 최소 약 1.3 m/s 이상 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

2) CFD시뮬레이션 검증

그림 6에 그림 2의 측정 위치에서 실측된 속도와 CFD시뮬레이션을 통해 예측된 속도의 비교결과를 나타냈다. 예측치가 실측치에 비해 전반적으로 약간 낮게 나타났지만 평균오차는 약 0.3 m/s로 작았으며, 배기팬에 연결된 출구 쪽으로 갈수록 유속이 증가하는 전/중/후단 방향으로의 경향성과 상/중/하층의 높이 방향으로의 경향성은 실측치와 동일하게 나타났다. 따라서 본 CFD시뮬레이션은 건조실 내부의 실제 유동장을 비교적 정확히 예측하고 있다고 판단된다.

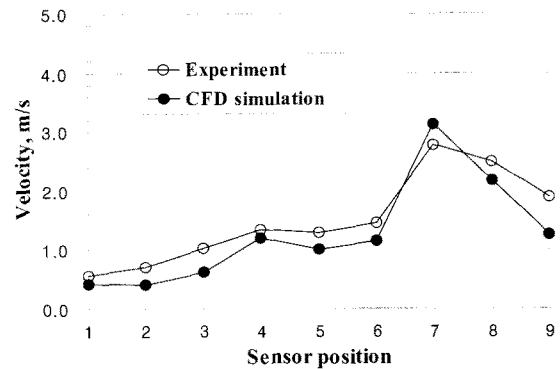


Fig. 6 Comparison between measured and predicted airflow velocity.

나. 건조시험

1) 유채시료 곡온변화

그림 7~9는 건조온도에 따라 건조중 건조실 상·하단의 유채 시료온도의 변화를 측정한 것이다. 그림 7은 건조온도 50°C 일 때 유채시료 온도 분포를 나타낸 것으로 건조 초기에는 건조실 상하단 모두 30°C까지 미미하게 상승하는 경향이었고, 건조시간 17시간 이후부터 유채시료 온도는 완만하게 약 33°C까지 상승하였으며, 이 온도는 건조가 종료되는 시점까지 유지되는 것을 알 수 있었다.

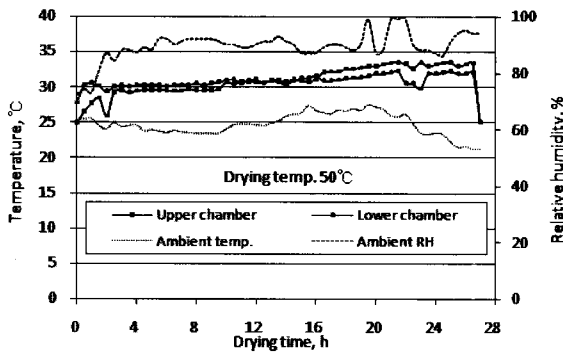


Fig. 7 Changes in rapeseed temperature at upper and lower drying chamber and ambient conditions (drying temp. 50°C).

그림 8은 건조온도 55°C일 때 유채시료 온도의 변화를 나타낸 것으로서 유채시료 온도의 상승 경향은 건조온도 50°C일 때와 유사하였으나, 유채시료 온도가 상승하는 시간은 좀 더 빠르게 나타났다. 이때 건조 종료시점에서의 유채시료 온도는 건조온도 50°C일 때 보다 약간 높은 약 34.5°C까지 상승하는 것으로 나타났다.

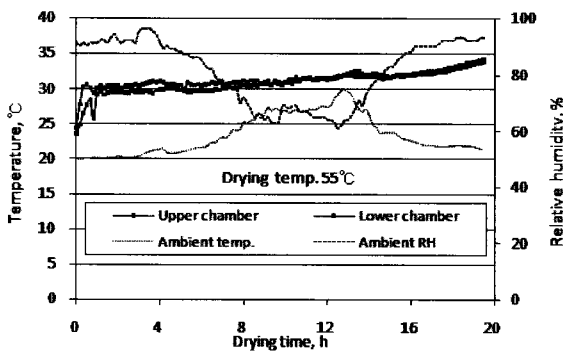


Fig. 8 Changes in rapeseed temperature at upper and lower drying chamber and ambient conditions (drying temp. 55°C).

그림 9는 건조온도 60°C일 때 유채시료 온도의 변화를 나타낸 것으로 이때 유채시료 온도는 건조초기부터 다른 조건

에서보다 더 높게 나타났고, 건조 8시간부터는 35°C까지 올라가 건조완료시까지 35°C를 유지하였다.

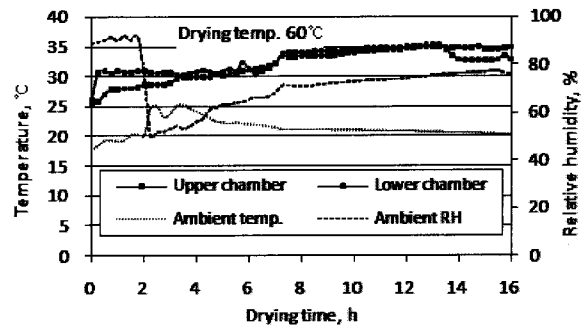


Fig. 9 Changes in rapeseed temperature at upper and lower drying chamber and ambient conditions (drying temp. 60°C).

결과적으로 건조온도 50, 55°C일 때 유채시료 온도는 건조말기에 이르러서야 유채시료 온도 상승효과가 있었으나, 건조온도 60°C에서는 건조중기부터 유채시료 온도의 상승이 두드러져 건조속도를 단축시키는데 영향을 미쳤다고 판단된다.

2) 건조특성곡선

그림 10은 건조온도에 따른 건조특성곡선을 나타내고 있다. 모든 건조온도에서 건조초기부터 일정한 속도로 건조가 이루어지면서 건조말기에는 약간 둔화되었다. 이것은 농산물 건조의 일반적인 특성이라고 할 수 있다. 건조온도별로 분석하면 건조온도 50°C에서는 건조 시작부터 7.5시간까지 함수율비의 시간당 감소속도는 평균 0.023, 7.5~23시간 범위에서는 0.044, 23시간부터 건조 종료까지는 0.031이었다. 건조온도 55°C에서 함수율비 감소속도는 건조시작부터 1시간까지는 0.04로 작았고, 이후 건조종료 1.5시간 전까지 평균 0.054

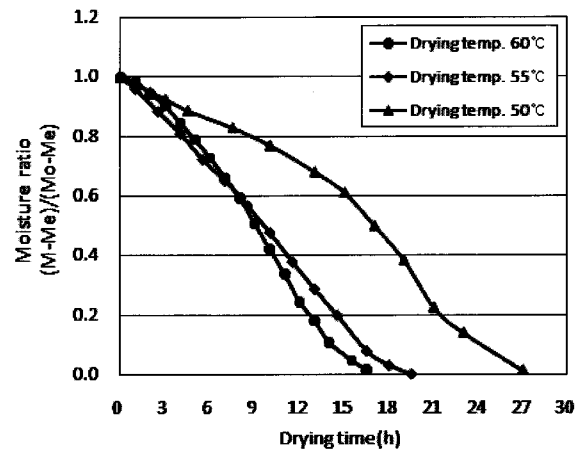


Fig. 10 Drying characteristic Curve.

로 큰 폭으로 함수율이 감소하였다. 건조온도 60°C에서 함수율비 감소속도는 건조 초기부터 2 h 동안 평균 0.030, 2~16 시간 동안은 0.066이었다. 건감률을 계산한 결과 건조온도 50, 55, 60°C일 때의 값은 각각 0.73, 0.93, 1.51%(wb)/h이었다. 한편 전체 건조기간 동안의 평균 함수율비 감소속도는 건조온도 60°C일 때 0.066/h으로 건조온도 50°C일 때의 0.044/h보다 0.022/h 더 높았다. 또한 건조초기 짧은 시간동안 함수율비 감소속도가 작은 것은 건조초기에 유체시료 온도가 상승하는 예열기간 동안에는 수분이동이 거의 일어나지 않았기 때문으로 사료된다.

3) 발아율

일반적으로 곡물의 유체시료 발아율 시험은 건조한 곡물의 품질을 평가하는 지표로 사용되고 있다. 본 연구에서는 종자용으로 사용하고자 하는 유체를 건조하는데 적합한 건조 온도를 구명하기 위하여 건조전후 유체시료 발아율 시험을 실시하였다. 그림 11은 건조온도에 따라 유체시료 발아율을 나타낸 것으로 건조하기 전의 유체시료의 발아율은 82.0%이었고, 건조온도 50, 55, 60°C일 때의 유체시료 발아율은 각각 78.7%, 73.3%, 73.3%로 나타나 건조 유무에 따른 유체시료 발아율 차이는 3.3~4.7%p이었으며, 유의성(LSD 5%) 검정결과 건조온도 간에는 유의차가 없는 것으로 나타났다. 그러나 가공용으로 사용하고자 하는 유체를 건조할 때에는 건조온도를 높게 설정해도 상관없으나, 종자용으로 사용하고자 하는 유체의 건조온도는 50°C이하가 안전하다고 판단된다. 한편 외국에서는 종자용으로 사용하고자 하는 유체의 건조온도는 45°C이하가 적합하고, 오일용으로 사용하는 유체를 건조할 때 건조온도는 80°C까지 설정하여 건조하고 있다(NDSU, 2008).

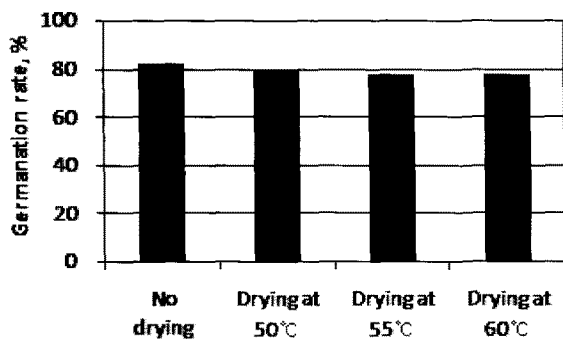


Fig. 11 Germinating rate of rapeseeds for each drying temperature.

4. 결론 및 요약

순환식 곡물건조기를 유체 건조에 적합하도록 개량하여 건

조 온도별로 시험하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 순환식 곡물건조기로 유체를 건조하기 위하여 건조실 다공판의 구멍 직경을 2.3 mm에서 1.5 mm로 줄이는 반면에 개공율은 32%에서 35%로 확대하였다.
- (2) 건조기 내부의 기류에 대한 CFD 해석 결과, 유체층을 통과하는 유동은 상하류에 걸쳐 거의 균일하게 분포하며, 유체층을 통과하는 실제 공극 유속도 최소 약 1.3 m/s 이상을 유지하는 것으로 나타났다.
- (3) 건조중 유체시료 온도변화를 분석한 결과, 건조온도가 50, 55°C일 때 유체시료 온도는 건조 말기에 이르러 유체시료 온도 상승효과가 있었으나, 건조온도 60°C에서는 건조 중기부터 유체시료 온도의 상승이 두드러져 건조속도를 단축시키는데 영향을 미쳤다고 생각된다.
- (4) 모든 건조온도에서 건조초기부터 일정한 속도로 건조가 이루어지면서 건조말기에는 약간 둔화되었다. 함수율비 감소 폭은 건조온도 60°C일 때 0.066/h으로 건조온도 50°C일 때의 0.044/h보다 0.022/h 더 높았다. 건감률은 건조온도 50, 55, 60°C일 때 각각 0.73, 0.93, 1.51%(wb)/h이었다.
- (5) 건조온도에 따른 유체시료 발아율은 건조 전의 유체의 유체시료 발아율은 82.0%이었으나, 건조온도 50, 55, 60°C일 때의 유체시료 발아율은 각각 78.7%, 73.3%, 73.3%로 약 3.3~8.7%p 낮게 나타났고, 유의성(LSD 5%)검정 결과 건조온도 간에는 유의차가 없는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. ASAE standard. 2001. Moisture Measurement-Unground Grain and Seeds. p.557.
2. Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progresses 48. pp.89-94.
3. FLUENT 6.2. 2005. User's Guide FLUENT Inc. New Hampshire, USA.
4. Kim, Y. H., J. W. Han and D. H. Keum. 2007. Desorption EMC models for rapeseed. Journal of Biosystems Engineering 32(6): 403-407. (In Korean)
5. Koh, H. K., D. H. Keum, M. S. Kim, S. H. Noh, S. H. Moon, K. K. Park and D. I. Chang. 1997. Agricultural Process Machinery. pp.97-101, 236-253. Whang Mun Publishing Co., Seoul. (In Korean)
6. NDSU (North Dakota State University). 2008. Drying and Sorting Canola. <http://www.ag.ndsu.edu/procrop/rps/drysto09.htm>