

# 농산물건조기의 배풍열 재이용 기술에 관한 연구

## Heat Recovery System from Chamber of Agricul Products Dryer

백 이\*    김영중\*    강금준\*    유영선\*  
정회원    정회원    정회원    정회원

Y. Paek    Y. J. Kim    G. C. Kang    Y. S. Ryou

### 1. 서    론

농수산물의 건조는 대부분 태양열을 이용한 자연건조가 대부분이었으나<sup>4)</sup> 최근 농업의 기계화가 급속히 진행되면서 화석에너지를 사용하는 열풍건조 시스템<sup>6)</sup>이 급속히 개발 보급되었다. 농림부의 통계현황을 보면 농산물건조기는 145,650대('98)에서 164,532대('00)로 증가되었다.(농림부,2000). 농산물건조기의 보급으로 유류의 소비량이 증가하여 큰 부담을 가지게 되었으며, 이로 인하여 에너지 절약기술은 모든 농수산, 축산 및 산업분야의 생산 및 경제성 분야에 지대한 영향을 미치는 것으로 에너지 절약기술개발이 절실히 요구되고 있다. 특히 농산물건조기의 농산물을 건조할 때 배풍구를 통하여 손실되는 배풍열이 전 투입에너지의 70~80%에 달하고 있어, 배풍열을 회수하여 재 이용할 필요성이 증대되고 있다. 배풍구를 통하여 고온의 열을 대기중으로 방출함으로써 에너지 손실로 인한 막대한 유류의 소비를 가져오고 있다. 이러한 손실되는 폐열을 회수하여 재활용함으로써 연료 절감 및 건조효율의 향상을 가져오리라는 판단이 된다. 이제까지 농산물 건조에 관한 연구<sup>2)</sup>는 많으나 농산물 건조기의 열이용에 관한 연구는 그다지 많지 않다. 먼저 건조에 관한 연구 및 배풍열회수에 관한 연구는 살펴보면 다음과 같다.

강(1991)은<sup>1)</sup> 분말고추의 열 및 물질전달에 관한 연구에서 각 열원에 대한 온도변화의 경우 온도가 낮을수록 건조소요시간이 길어졌으며, 분말입자가 작을수록 건조소요시간이 단축되는 것으로 보고하였다. 조(1991)는<sup>7)</sup> 고추의 건조과정의 모형화 및 최적화에 관한 연구로서 건조과정 중 가장 적합한 함수율 모형<sup>8)</sup> 및 온도모형을 개발하기 위하여 기본 모형을 설정한 후 그 타당성을 실험적 분석으로 검증하여 기본모형의 타당성을 확인하였다. Henderson(1952)은 농산물의 평형함수율에 대한 Gibbs의 흡습이론을 사용하여 온도와 상대습도의 함수로서 평형함수율 곡선의 이론식을 제시하였다<sup>3)</sup>. 서(1985)등은 농용기관의 배기가스 폐열을 회수하여 농산물을 건조하였으며<sup>5)</sup>, 열매체유를 사용한 열교환기의 열교환은 전량을 회수 가능하다고 보고되었고 (Stahl,1983). 회수된 열에너지를 저장할 수 있는 축열조를 이용하는 방법에 관한 연구가 발표되었다.(Sliwinski,1980)

본 연구는 건조에 대한 연구로써 주변의 열환경 및 건조과정 중 에너지절감을 위하여 건조시스템의 이론적 열수지 모델을 구명하고, 기존 농산물건조기에 부착형 배풍열 회수장치를 개발하여 연료절감 효과 분석 및 열회수장치의 성능분석 및 연료절감을 구명하고자 하였다.

\* 농업기계화연구소

## 2. 재료 및 방법

농산물건조기의 열 수지 분석을 위한 실험장치는 그림 1과 같이 건조실, 송풍기, 버너, 열회수장치, 순환펌프, 건조상자 등으로 구성되어 있으며, 식(1)과 같이 에너지 평형방정식을 세웠다.

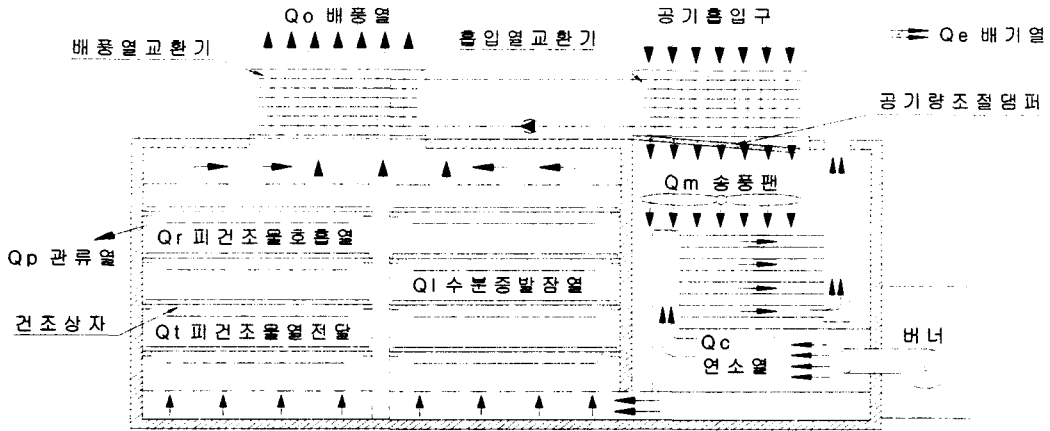


그림 1. 농산물건조기의 열수지 모델

열수지 모델의 에너지 평형방정식은 다음과 같이 나타냈다.

$$Q_c - Q_e + Q_m + (Q_r - Q_t - Q_i) - Q_p - Q_o = 0 \text{-----(1)}$$

여기서,

$$Q_c = \text{연소열(kcal/h)} \quad Q_e = \text{배기열(kcal/h)}$$

$$Q_m = \text{모터열} \frac{860 \cdot P(\text{모터축 출력})}{\eta_F(\text{전동기 효율})} \text{ (kcal/h)}$$

$$Q_r = \text{피건조물 호흡열(kcal/h)}$$

$$Q_i = \text{수분증발잠열(kcal/h)}$$

$$Q_t = \text{피건조물 전열 (kcal/h)}$$

$$Q_p = \text{관류열 (kcal/h)}$$

$$Q_o = \text{배풍열 (kcal/h)}$$

표 1은 공시건조기의 제원이며, 건조기의 형식은 밀바람식, 버너의 연료소비량 2.6-3.3( $\ell$ /h), 송풍기의 송풍량 142( $\text{m}^3/\text{min}$ ) 및 소비전력은 1.01(kW)로 나타났다.

표 1. 공시건조기 제원

구분	제원 및 사양	
건조기 형식	밀바람식	
건조기 크기(L×W×H, mm)	2,580×1,300×1,960	
버너	형식	건타입
	연료소비량( $\ell$ /h)	2.6-3.0(경유)
송풍팬	형식	축류식
	구동방식	모터직결식
	송풍량( $\text{m}^3/\text{min}$ )	142
	소비전력(kW)	1.01
열교환기	형식	1Pass

그림 2은 분리형 열교환장치의 전체적인 구성도이며, 흡입열교환기, 배풍열교환기, 순환펌프, 유량계, 환풍기 및 열매체유 연결관으로 이루어져있으며, 열교환기는 전열면적을 증대, 열교환 효율을 높이기 위해 열전도율이 높은 동관을 여러단으로 직렬 조합하여 구성하였고, 순환펌프로 열매체를 강제 순환시켜 열을 회수할 수 있도록 하였다. 열교환장치의 형식은 분리형 핀-튜브방식, 작동유체는 물, 순환펌프 용량 400 l/h, 배풍구 동관길이 약26m, 흡입구 동관길이 약 50m로 되어 있으며, 표 2는 열교환장치의 제원을 나타내었다.

표 2. 열교환장치 제원

구분	형식 및 제원	
형식	분리형 핀-튜브방식	
작동유체	물	
순환펌프 용량(l/h)	400 l/h	
배풍구	크기(L·W·H,mm)	340×340×250
	전열면적(m <sup>2</sup> )	1.14
흡입구	동관규격(mm)	L:28.600, t : 0.7, ϕ: 12.7
	크기(L·W·H,mm)	800×500×250
배풍구	전열면적(m <sup>2</sup> )	2
	동관규격(mm)	L:50.400, t : 0.7, ϕ: 12.7

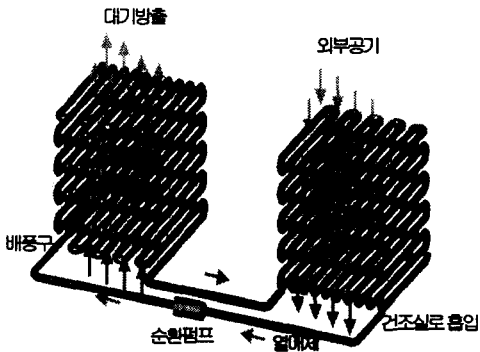


그림 2. 분리형 열교환 장치

계측장치로는 초음파유량계, 다점온도기록계, 로드셀, 온·습도계, 풍량계 등으로 구성되어 있으며, 온도계측은 T타입 열전대를 이용하여 건조실, 배풍구, 흡입구, 건조실내·외부온도 및 연소실 온도를 다점온도기록계로 측정하였으며, 송풍량 142(m<sup>3</sup>/min), 함수율 측정은 로드셀, 초기함수율과 최종함수율 측정은 드라이 오븐을 이용하여 105℃에서 24시간동안 측정하였으며, 본 시험의 공시작물은 고추를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 농산물건조기의 열수지 분석

건조모델 에너지 평형방정식을 이용하여 농산물건조기의 열수지를 분석한 결과 표 3과 같으며, 투입열량은 연소열량과 송풍모터열로 35,906(kcal/h)로 하였을 경우, 배기열은 4,726(kcal/h), 배풍열량 27,891(kcal/h), 관류열량은 3,289(kcal/h)로 나타났으며, 투입열량을 100%로 하였을 경우, 배기열은 13.2%, 배풍열량 77.7%, 관류열량은 9.1%로 나타났다.

표 3. 농산물건조기의 열수지분

구분	열량(비율, %)(kcal/h)	
투입 열량	연소열량	34,458(96)
	송풍 모터열량	1,448(4)
	계	35,906(100)
실 열량	배기열량	4,726(13.2)
	배풍열량	27,891(77.7)
	관류열량	3,289(9.1)
열량	계	35,906(100)

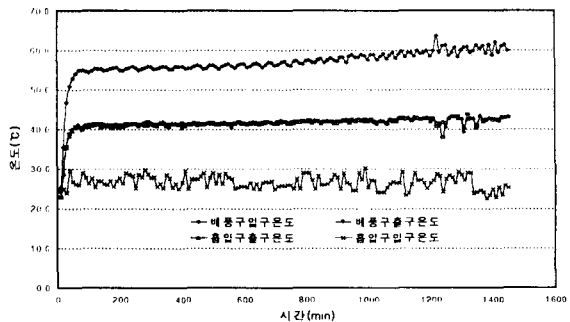


그림 3. 농산물건조기의 입·출구공기온도 변화

나. 열교환기 입출구의 공기온도변화

그림 3은 배풍열 회수장치를 부착한 농산물건조기를 이용하여 고추 100kg을 건조한 결과, 농산물건조기의 온도변화를 나타내고 있다. 농산물건조기의 배풍구 입구온도가 55~60℃일 때 배풍구 출구온도는 41~43℃로 나타났다. 이 때 흡입구 입구온도는 외부온도와 같은 25~28℃일 때 흡입구 출구온도는 41~43℃로 나타나 건조실로 41~43℃의 높은 온도를 투입하므로 연료비를 절감할 수 있는 것으로 판단된다.

다. 단위시간당 배풍열량 및 회수열량

그림 4은 농산물(고추 100kg)건조시 배풍열량에 대한 회수열량을 나타내고 있다. 배풍열량은 단위시간당 4700kcal에서 6000kcal로 증가할때, 흡입열량은 2200kcal에서 3000kcal로 나타났다.

라. 관행건조와 배풍열 회수 건조의 건조특성

그림 5는 고추건조시간에 대한 함수율변화를 나타낸 것이다. 고추의 초기함수율은 80%였으며, 관행건조를 할 경우는 함수율이 15%까지 떨어지는데 약 27시간이 경과했으며, 배풍열 회수건조를 할 경우는 함수율이 15%까지 떨어지는데 약 24시간이 경과했다. 그 결과 배풍열 회수건조가 약 3시간정도 소요시간이 단축되었음을 알 수 있었다.

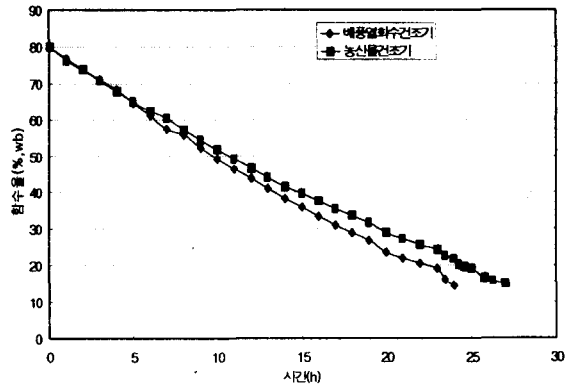
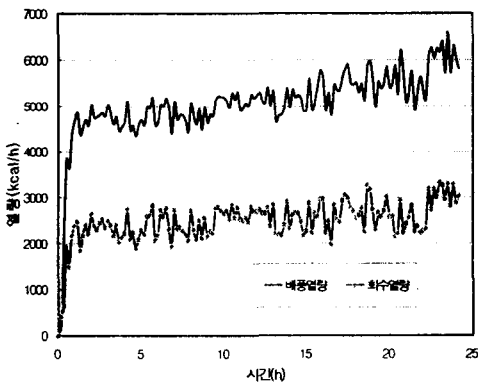


그림 4. 농산물건조기의 배풍열량 및 회수열량      그림 5. 건조시간에 대한 함수율 변화

마. 투입열량에 따른 회수열량

그림 6은 고추건조시에 투입열량에 대한 회수열량을 나타낸 것이다. 투입열량이 166천kcal일 때 배풍열량은 122천kcal이고, 회수열량은 79천kcal으로 나타나, 투입열량이 100%일 때 배풍열량은 74%, 회수열량은 47%를 회수하여 재이용할 수 있었다.

바. 건조방식에 따른 연료소비량

그림 7은 고추건조시에 건조소요시간에 대한 연료소비량을 나타낸 것이다. 고추100kg을 건조할 때 관행건조는 44.3ℓ의 연료를 소비하였으며, 배풍열회수건조시 25.2ℓ를 소비하였다. 이 결과 연료소비량을 약 43% 절감할 수 있었다.

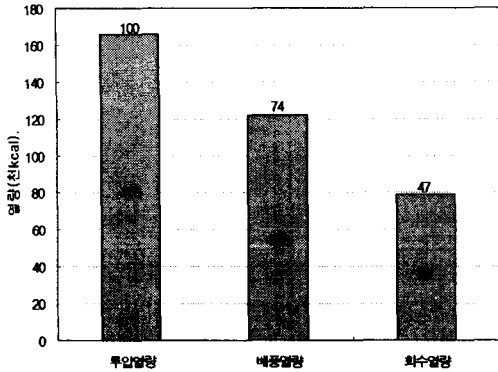


그림 6. 투입열량에 대한 회수열량

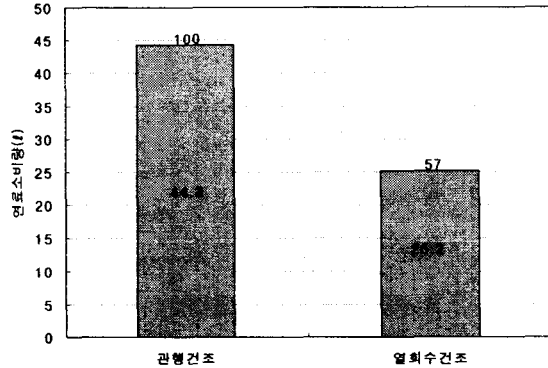


그림 7. 건조방식에 따른 연료소비량

사. 경제성 분석

배풍열회수 농산물건조기를 이용하여 고추(100kg)을 건조를 수행하는 경우와 관행 농산물 건조기를 이용하여 건조하는 경우를 분석한 결과 표 4에서 보는 바와 같이 연료소모량은 43% 절감되는 것으로 나타났으며, 건조소요 비용은 21% 절감되는 것으로 판단되었다. 또한, 배풍열 회수장치를 부착 농산물건조기를 이용할 경우 소요시간의 단축으로 기계이용 효율을 높이고 농가의 소득증대에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 농산물건조기와 배풍열회수 농산물건조기의 경제성

구분	농산물건조기	배풍열회수 농산물건조기
구입가격(원)	2,300,000	2,900,000
내구연한(년)	10	10
연간사용시간(시간/년)	1,000	1,000
연간고정비(원/년)	감가상각비	218,500
	수리비	115,000
	이자	48,300
	소계	381,800
시간당고정비(원/시간)	382	481
시간당유동비 (원/시간)	총연료소모량(l)	44.3(100)
	건조소요시간	27
	시간당연료소모량	1.64
	시간당연료비	597.0
	전기료	38
소계	635	
시간당비용(원/시간)	1017	904.2
총소요비용(원/100kg)	27,459	21,701
지수(%)	100	79

- 농산물건조기 : 1평 ○ 내구년수 : 10년 ○ 폐기가격 : 구입가의 5%
- 수리비계수 : 5% ○ 연이율 : 5% ○ 연료비 : 364원/l (면세경유)
- 고추건조 소요시간 : 농산물건조기 27시간, 배풍열회수건조기 24시간
- 연속운전시 연료소모량(농산물건조기 : 3.2 l/h, 열회수용건조기 : 1.8 l/h)

○ 전기료 : 37.8원/kWh,농사용(병)

#### 4. 적 요

본 연구는 농산물을 건조할 때 배풍구로 버려지는 열을 회수하여 건조열원으로 재이용할 수 있는 배풍열 회수장치를 개발하여 연료절감 및 열회수장치의 성능을 분석한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 농산물건조기의 열수지를 분석한 결과 투입열량을 100%로 하였을 경우, 배기열은 13.2%, 배풍열량 77.7%, 관류열량은 9.1%로 나타났다.
- 나. 고추를 건조시 배풍구입구온도가 55~60℃일 때 배풍구 출구온도 41~43℃, 일때 흡입구 입구온도는 25~28℃, 흡입구 출구온도는 41~43℃로 나타나 건조실로 41~43℃의 높은 온도를 투입할 수 있었다.
- 다. 배풍열량이 단위시간당 4700kcal에서 6000kcal로 증가할때, 흡입열량은 2200kcal에서 3000kcal로 나타났다.
- 라. 고추의 초기함수율이 80%에서 15%까지 떨어지는데 관행건조는 약 27시간이 경과했으며, 배풍열회수건조를 할 경우는 약 24시간이 경과했으며. 그 결과 배풍열 회수건조가 약 3시간정도 소요시간이 단축되었음을 알 수 있었음.
- 마. 배풍열 회수장치를 사용하여 농산물건조기 투입량의 47%, 배풍열량의 64%의 열량을 회수할 수 있었다.
- 바. 배풍열 회수 농산물건조기 성능시험 결과 고추 100kg 건조시 연료소모량은 43%, 건조 소요비용은 21% 감소시킬 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 강석원. 1991. 대류 및 복사에 의한 분말고추의 열 및 물질전달 특성. 석사학위 논문. 서울대학교 대학원
2. 고학균, 조용진, 강석원. 1990. 고추의 건조공정에서 적외선 건조법의 활용에 관한연구. 한국농업기계학회지 15(3)
3. 고학균, 금동혁, 김만수, 노상하, 문성홍, 박경규, 장동일. 1990. 농산가공기계학. 향문사.
4. 백형희, 김동만, 김길환. 1989. 건조방법에 따른 표고버섯의 품질변화. Korean J. Food Sci. Technology. Vol 21(No.1)
5. 서상룡, 유수남. 1987. 농용 내연기관 폐열의 열에너지 회수. 농업기계학회지 12(1).
6. 조덕봉, 김동필, 최춘순. 1981. 표고버섯의 열풍건조속도론에 관한 연구. 한국영양지 10(1).
7. 조용진. 1991. 고추의 건조모형화 및 최적화에 관한 연구. 학사학위논문. 서울대학교 대학원.
8. 최병민. 1992. 인삼의 평형함수율 및 건조모델. 박사학위논문. 전북대학교 대학원.