

## 전기히터식 및 히트펌프식 식품 건조기의 에너지 성능 비교

유영우 · 김영일\*<sup>†</sup> · 박승태\*\*

서울과학기술대학교 에너지환경대학원, \*서울과학기술대학교 건축학부, \*\*㈜에이티이앤지

### Energy Performance Analysis of Electric Heater and Heat Pump Food Dryers

Young Woo Yu, Young Il Kim\*<sup>†</sup>, and Seungtae Park\*\*

Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

\*School of Architecture, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 139-743, Korea

\*\*ATENG, Seongnam-si, Gyeonggi-do 462-737, Korea

---

#### Abstract

In this study, energy performance of two types of food dryers which are electric heater and heat pump is studied experimentally. With drying chamber temperatures controlled at 45, 50 and 55°C, sliced radish is dried from an initial mass of 90 to final 7 kg. Moisture content, drying time, total power consumption, MER (moisture extraction rate, kg/h) and SMER (specific moisture extraction rate, kg/kWh) are measured and analyzed. As the drying chamber temperature is increased, drying time is shortened but energy efficiency is reduced for both types. For an electric heater dryer, the effect of chamber temperature on drying time is significant but less significant on energy efficiency. For a heat pump dryer, the dependence of chamber temperature on drying time is weak but strong on energy efficiency. Temperature levels have little effect on electric heater dryer performance but strong effect on heat pump dryer which operates on a vapor compression refrigeration cycle. The energy performance of the heat pump dryer is superior with an average SMER of 2.175 kg/kWh which is 2.22 times greater than that of the electric heater dryer with SMER of 1.224 kg/kWh.

**Key words:** Food dryer(식품 건조기), Electric heater(전기히터), Heat pump(히트펌프), Hot air dryer(열풍 건조기), MER(제습률), SMER(비제습률)

---

#### 기호설명

$h$  : 엔탈피 [kJ/kg]

$m$  : 시료 함수율 [-]

$\dot{m}$  : 냉매 질량유량 [kg/s]

$w$  : 시료의 질량 [kg]

#### 하첨자

comp : 압축기

cond : 응축기

d : 건조 상태

f : 종료

i : 초기

---

<sup>†</sup>Corresponding author

Tel: +82-2-970-6557, Fax: +82-2-970-1480

E-mail: yikim@seoultech.ac.kr

접수일: 2015년 07월 27일

심사일: 2015년 08월 07일 1차:2015.08.26, 2차:2015.09.16

채택일: 2015년 09월 25일

in : 입구  
out : 출구

## 1. 연구의 배경 및 목적

식품 건조기는 식품 내에 함유된 수분을 제거하여 건조시키는 장치로 건조된 식품은 장시간 신선도가 유지되며 부피와 중량이 작아져 보관이 용이하다. 그러나 식품 건조기는 수분의 잠열을 처리해야 하므로 많은 에너지 소비가 요구된다. Bannister[1]은 에너지 효율을 높이기 위한 수단으로 히트펌프식 건조기의 특성을 소개하였다. Wijesinghe[2]와 Bannister[3]은 히트펌프식 건조기는 기존의 열풍식 건조기에 비하여 에너지 효율이 약 80% 이상 높일 수 있어 큰 에너지 절약 효과가 있다고 기술하고 있다.

전기히터식 및 히트펌프식 건조기는 편리성은 우수하나 단가가 높은 전기에너지를 사용하므로 전기 에너지 사용량을 줄이는 것이 중요한 목표가 된다. 건조기의 효율을 나타내는 지표로 제습률(MER, moisture extraction rate, 단위 kg/h)은 시간당 제습량, 비제습률(SMER, specific moisture extraction rate, 단위 kg/kWh)은 단위 전기에너지소비량 당 제습량으로 정의되며, COP는 단위전기입력 당 응축열량으로 정의된다. Kudra[4]은 일반적인 열풍 건조기의 SMER은 0.5~1 kg/kWh, 히트펌프 건조기는 3 kg/kWh 정도이고, 특수한 경우에는 8~10 kg/kWh까지 이른다고 보고하고 있다. 히트펌프 건조기는 에너지 효율과 건조 용량과 같은 성능은 높으나 실제 운용 결과는 만족스럽지 못한 부분이 많이 존재한다. 응축기의 방열을 건조 열로 활용하는 히트펌프식 건조기의 원리는 간단하지만 Bannister[5] and Carrington

[6]은 효율적이고 신뢰성이 높은 히트펌프 건조기를 개발하는 것은 쉽지 않기 때문에 현재까지도 지속적으로 연구가 필요하다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 무(radish) 시료를 초기질량 90 kg를 건조질량 7 kg까지 전기히터식과 히트펌프식의 2 방식의 건조기에서 건조실 1차 설정온도를 변경하여 건조기의 성능지표인 제습률(MER)과 비제습률(SMER) 그리고 히트펌프의 성능계수(COP, coefficient of performance)를 측정하여 비교 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 건조기 개요

Fig. 1과 Table 1은 실험에 사용된 건조기의 열원 구성과 제원을 보여준다. 1단 히트펌프 시스템과 순환팬, 전기히터 등으로 구성되어 있어, 운전자 설정에 따라 전기히터 또는 히트펌프로 열원을 선택할 수 있다. 건조실 당 10개의 채반을 넣을 수 있는 본 건조기는 호칭 규격에 의해 3형(건조실 내부용적 3.0 m<sup>3</sup> 초과, 5.0 m<sup>3</sup> 이하)으로 분류된다. 시험은 KS

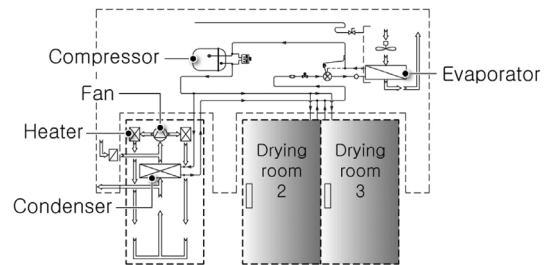


Fig. 1. Schematic of a dryer.

Table 1. Specification of a hot air dryer (150 kg)

Component	Unit	Capacity	Model/type
Circulation fan	kW	0.125 kW×3=0.375 kW	Air foil
Heating capacity (heat pump)	kW	6.3	Condenser heat
Electric heater	kW	1.9 kW×3=5.7 kW	Electric type
Compressor	kW	2.4	R-134a
Tray	EA	645 mm×450 mm×45 mm	10×3 rows
Outdoor fan	kW	0.18	Air foil
Heat pump type power	kW	2.955	1Ø×220V×60 Hz
Elec. heater type power	kW	6.075	1Ø×220V×60 Hz

농수산물 건조기 시험방법 KS B 7944 : 2007를 따른다[7].

히트펌프 시스템은 R-134a 냉매를 사용하는 1단 (single stage) 사이클로 구성되어 있고, 응축기는 0.4×0.407×0.07(m), 증발기는 0.6×0.356×0.07(m), 압축기는 Copeland사의 ZB15KQE 모델이다.

전기히터 모드 설정 시 순환팬 모터(circulation fan motor) 양쪽으로 전기히터가 설치되어 건조실 내 공기 온도를 가열한다.

건조 과정은 순환 공기를 응축기 또는 전기히터로 가열하여 밀폐된 내부공간에서 공기의 온도를 높이고 이것은 시료 내의 수증기분압을 증가시켜 시료와 공기의 수증기분압 차에 의해 건조물로부터 수분증발을 유도하는 방식이다.

## 2.2 건조 실험 재료 및 방법

무 시료의 함수율 측정 방법은[7] 상, 중, 하의 채반에서 약 10 g의 시료를 무작위로 채취하여 Ohaus사의 MB35 수분측정기(Moisture analyzer)를 이용하여 5회 이상 분석하였고, 시료의 초기함수율과 건조질량은 다음과 같이 정의된다.

$$m_i = \frac{w_i - w_d}{w_i} \quad (1)$$

$$w_f = \frac{1 - m_i}{1 - m_f} w_i \quad (2)$$

건조실 1차 온도 조건을 45, 50, 55°C로 변경하여 무 시료를 건조하였다. 건조 시료는 제주 월동무를 사용하여 야채 절단기로 크기 10×10(mm)로 가공하고, 한 채반 당 3 kg씩 무를 담고 30개의 채반을 건조실에 넣어 90 kg의 질량을 초기 조건으로 하였다. 전체 무 질량이 7 kg로 이하로 도달하였을 때 건조를 종료하였다.

건조과정 과정에서의 시간과 전력량은 건조단가를 절약할 수 있는 중요한 인자이다. 제습률(MER)과 비제습률(SMER)은 다음과 같이 정의 된다.

$$MER = \frac{\text{건조수분질량}}{\text{건조시간}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad (3)$$

$$SMER = \frac{\text{건조수분질량}}{\text{건조시간} \times \text{전력량}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] \quad (4)$$

**Table 2.** Dryer operating conditions

Content	Case 1	Case 2	Case 3
Air temperature setting (primary)	55°C	50°C	45°C
Damper closed time	2 h		
Air temperature setting (open damper)	40°C		

## 2.3 실험장치 및 운전조건

Table 2은 전기히터식과 히트펌프식의 건조 운전 조건을 나타내었다. Lee[8]은 무 시료를 천일 건조와 냉풍 건조(10~26°C), 열풍 건조(60~80°C)에서 실험을 하여 무 시료의 품질특성을 연구하였다.

본 연구는 건조 운전 시작 시 댐퍼가 닫힌 상태에서 건조실 내부 온도가 1차 온도 조건(55, 50, 45°C)에 도달하면 2시간 동안 밀폐 공간에서의 건조가 진행되며, 그 이후 댐퍼가 개방되어 2차 온도조건 40°C로 건조 종료 시까지 운전하였다. 건조실 내부의 온도편차는 ±2°C로 설정하였다.

히트펌프 성능(COP)을 분석하기 위해 냉매 측의 온도, 압력, 유량, 공기 측은 온도, 습도, 그리고 압축기 전력을 측정하였고, 건조성능(SMER)을 분석하기 위해 시료의 질량과 건조기의 전체 소비전력을 측정하였다.

전력 측정은 Yokogawa사의 CW-240 종합전력계, 온습도 센서는 Vaisala사의 HMT330, 냉매 측 온도 센서는 열전대 T type, 데이터로거는 Graphtec사의 GL820, 유량 측정은 Flomec사의 OM008S 용적식 유량계, 냉매 압력은 Setra사의 pressure transmitter 206, 시료 질량 측정은 Cas사에 주문 제작하여 사용하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 히트펌프 시스템 성능

히트펌프식 건조기의 건조실 1차 측 온도를 55°C로 설정하여 무 시료 건조 과정의 정상상태 구간을 상용 공학 프로그램인 EES[9]를 이용하여 성능을 분석하였다.

히트펌프 사이클의 기본적인 해석 방법은 많이 알려져 있으므로 상세한 해석 방법은 생략한다[10].

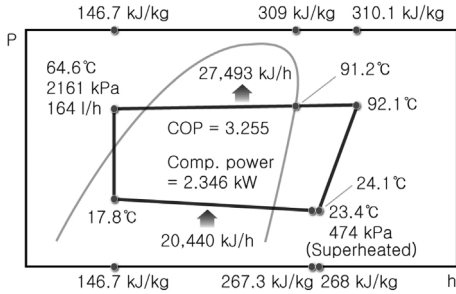


Fig. 2. Measured heat pump performance data (temperature set = 55°C).

응축열을 사용하는 히트펌프의 성능은 COP로 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\text{COP} = \frac{h_{\text{cond,in}} - h_{\text{cond,out}}}{h_{\text{comp,out}} - h_{\text{comp,in}}} \quad (5)$$

Fig. 2는 냉매 측의 온도, 압력, 유량을 측정하여 히트펌프 사이클의 성능을 분석한 결과이다. 냉매 유량은 응축기의 출구와 팽창밸브 사이에서 0.04705 kg/s로 측정되었고, 압축기 전력은 2.346 kW이다. 해석 결과 히트펌프 COP는 3.255, 응축기의 열량은 7.637 kW (27,493 kJ/h), 증발기 흡열량은 5.678 kW (20,440 kJ/h)로 나타났다.

### 3.2 전기히터식 건조기 측정 결과

Fig. 3(a)는 전기히터식 건조기의 성능을 보여준다. 시간과 전력사용량은 55°C에서 13시간 39분 동안 68.2 kWh, 50°C에서 14시간 50분 동안 67.7 kWh, 45°C에서 16시간 53분 동안 67.5 kWh로 측정되었다. 50°C에서 건조시간은 55°C 대비 1시간 11분 증가되었으며(8.7%), 전력사용량은 0.73% 절약되었고, 45°C에서 건조시간은 3시간 14분 증가하여(23.7%), 전력사용량은 1.0% 절약되었다. 건조실 1차 온도가 55°C, 50°C, 45°C이면 제습률(MER)은 각각 6.081, 5.596, 4.916 kg/h이 되어 55°C 대비 50°C이면 8.0%, 45°C이면 19.2%로 감소한다. 비제습률(SMER)은 그 값이 1.217 kg/kWh인 55°C 기준 50°C이면 0.74%, 45°C이면 1.1% 증가한다. 전기히터식은 건조실 온도변화에 따라 피건조물과 주변 수증기분압의 차이가 민감하게 반응하였다. 따라서 건조 시간을 단축하려면 높은 온도가 유리하고, 소비동력

을 감소시키려면 그 차는 적지만 낮은 온도가 유리하다.

### 3.3 히트펌프식 건조기 측정 결과

Fig. 3(b)는 히트펌프식 건조기의 성능을 보여준다. 전기히터 실험과 같이 히트펌프 실험에서도 동일한 조건으로 무 건조 실험을 하였다. 55°C에서 15시간 56분 동안 압축기 18.9 kWh, 전체 32.4 kWh, 50°C에서 16시간 4분 동안 압축기 17.1 kWh, 전체 30.6 kWh, 45°C에서 16시간 15분 동안 압축기 15.3 kWh, 전체 28.9 kWh의 시간과 전력사용량이 측정되었다. 55°C 대비 50°C에서 건조시간이 8분 증가되었으며(0.84%), 전력사용량은 5.56% 절약되고, 45°C에서는 건조시간이 19분 증가되었으며(1.99%), 전력사용량은 10.8% 절약되는 것으로 나타났다. 건조실 1차 온도가 55°C, 50°C, 45°C이면 제습률(MER)은 각각 5.209, 5.166, 5.108 kg/h로 되어 55°C 대비 50°C이면 0.83%, 45°C이면 1.94%로 감소한다. 비제습률(SMER)은 그 값이 2.562 kg/kWh인 55°C 기준 50°C이면 5.86%, 45°C이면 12.1%로 증가한다. 전기히터식과 유사하게 건조 시간을 단축하려면 1차 설정온도는 높을수록 유리하고, 소비동력을 감소시키려면 낮은 온도가 유리하다. 그러나 히트펌프식은 전기히터식 대비 건조 시 1차 온도의 영향에 대

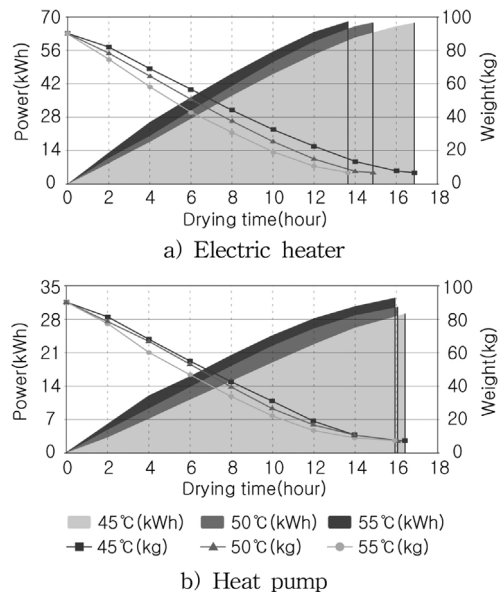


Fig. 3. Measured power consumption and weight

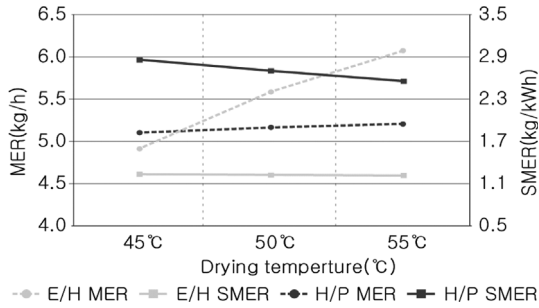


Fig. 4. MER and SMER.

해 다른 특성을 보여주고 있다. 55°C 대비 45°C의 건조 특성을 보면 전기히터식의 MER은 19.2%로 감소, SMER은 1.1%로 증가 하는데, 히트펌프식의 경우 MER은 1.9%로 감소, SMER은 12.1%로 증가한다.

### 3.4 무 시료 건조실험 결과

Table 3은 무 시료 상태와 실험에 대한 종합적인 결과를 나타냈다. 한 채반 당 3 kg의 무 시료를 건조실에 30개의 채반을 넣어 90 kg에서 7 kg까지 건조하였다. 건조 전·후의 상, 중, 하 채반에서 10 g의 무를 채취하여 5회 이상 함수율을 측정한 무 샘플

플 90 kg의 종료 질량의 평균 결과 0.53~0.76 g로 함수율은 92.43~94.69%로 나타났다. 건조 후 동일한 조건으로 측정한 결과 최종함수율은 17.35~21.76%로 나타났다.

전기히터 건조 시 전력은 67.5~68.2 kWh를 사용하였고, 히트펌프의 경우 전체전력 28.9~32.4 kWh 중, 15.3~18.9 kWh는 압축기 전력으로 사용되어 4개의 팬과 기타 전력이 약 13.5 kWh가 사용 되는 것으로 나타났다. 히트펌프의 건조 실험결과 1차 설정 온도 55~45°C의 조건 변화에 따라 약 19분 지연되어 전체 건조시간이 1.99%로 차이가 나타났고, 전기히터의 경우 3시간 14분이 지연되어 23.69%의 차이로 건조실 내부 온도조건에 따라 민감하게 반응하였다.

MER은 시간당 수분 감소량을 나타내는 지표로서 온도 변화에 의한 수분 제거량은 거의 동일하지만, 온도가 낮아지면 피건조물의 수증기분압이 낮아져 주변 수증기분압과의 차가 감소하므로 수증기 제거량이 낮아져 55°C 보다 45°C에서의 건조시간이 증가한다. 히트펌프 건조 시 5.209~5.108 kg/h로 1.95%의 미미한 차이를 보였고, 전기히터 건조 시 6.081~4.916 kg/h로 19.15%의 큰 차이를 보여 건조실 온도에 민감하게 반응하였다.

Table 3. Drying experiment of sliced radish with electric heater and heat pump dryers

Content	Unit	Electric heater			Heat pump			
		55°C	50°C	45°C	55°C	50°C	45°C	
90 kg	Initial sample mass	g	10.01	10.10	10.01	10.00	10.02	10.02
	Final sample mass	g	0.660	0.620	0.757	0.620	0.621	0.532
	Initial moisture content	%	93.40	93.87	92.43	93.80	93.80	94.69
7 kg	Initial sample mass	g	10.03	10.01	10.02	10.01	10.02	10.01
	Final sample mass	g	8.002	7.832	7.899	8.276	8.187	7.894
	Final moisture content	%	20.16	21.76	21.14	17.35	18.15	21.15
Compressor power	kWh	-	-	-	18.9	17.1	15.3	
Total power	kWh	68.2	67.7	67.5	32.4	30.6	28.9	
Drying time	h, m	13h 39m	14h 50m	16h 53m	15h 56m	16h 04m	16h 15m	
MER	kg/h	6.081	5.596	4.916	5.209	5.166	5.108	
SMER	kg/kWh	1.217	1.226	1.230	2.562	2.712	2.872	

SMER은 건조시료를 건조함에 있어 투입된 전력량 대비 시료의 수분 감소량을 나타내는 지표로서 건조에너지 효율을 의미하고 있다. 전기히터는 1.217~1.230 kg/kWh, 히트펌프의 경우 2.562~2.872 kg/kWh로 SMER이 나타났다. 이러한 특성은 온도가 낮아지면 응축기의 고압이 낮아지므로 히트펌프의 COP가 증가하여 동일 응축열 발생 시 소비전력량은 감소한다. 결과적으로 전기히터식 대비 히트펌프식 건조가 SMER은 평균 2.22배 에너지 효율이 높음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 전기에너지를 사용하는 전기히터식 및 히트펌프식 건조기의 건조 특성과 에너지 절감효과를 실험을 통하여 연구하였다. 이를 위하여 건조 성능 분석에 필요한 각종 데이터를 측정하고 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 무 건조실험 결과 비제습률(SMER)이 전기히터식의 경우 평균 1.224 kg/kWh, 55°C도 건조에서의 COP 성능이 3.255로 나타나는 히트펌프식은 2.715 kg/kWh로 히트펌프식의 에너지 효율이 2.2배 높다.

(2) 전기히터식의 경우 비제습률(SMER)과 전력량(kWh)은 약 1%의 경미한 차로 나타났고, 건조실 온도변화에 따라 피건조물과 수증기분압과의 차이에 큰 영향을 받아 건조시간은 23.7%로 증가하여, 제습률(MER)의 경우 55°C 대비 45°C에서 19.2%로 대폭 감소하였다.

(3) 히트펌프식 건조의 경우 건조실 온도가 55°C에서 45°C로 낮아지면 응축기의 고압이 낮아지므로 히트펌프의 COP가 증가하여 전력량은 10.8%로 감소하였다. 그러므로 건조시간이 1.99%로 증가되어 제습률(MER)은 1.94%로 감소하였지만, SMER은 12.1%로 증가하므로 건조실 설정온도가 낮을수록 비제습률(SMER)은 대폭 증가하였다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 · 한국에너지기술평가원의 에너지 · 자원 기술개발 사업 연구과제인 “농수산물 건조용 열펌프 및 데시칸트 하이브리드건조기 개발”에 따른 결과물입니다(과제번호 20122020100100).

#### References

1. Bannister, P., Carrington, G., and Chen, G., 2002, Heat Pump Dehumidifier Drying Technology Status, Potential and Prospects, Proc. of 7th IEA Heat Pump Conference, Vol. 1, pp. 219-230.
2. Wijesinghe, B., 1997, Low Temperature Drying of Food Materials Using Energy Efficient Heat Pump Dryers, CADDET Newsletter, No. 7, pp. 4-5.
3. Bannister, P., Chen G., Grey, A., Carrington, C. G., and Sun, Z. F., 1997, Emission Through Enhanced Dehumidifier Timber Drying, Proc. of 19th Int. Congress of Refrigeration, pp. 241-249.
4. Kudra, T. and Mujumdar, A. S., 2002, Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker. Inc., New York.
5. Bannister, P., Carrington, G. and Chen, G., 2002, Heat Pump Dehumidifier Drying Technology Status, Potential and Prospects, Proc. of 7th IEA Heat Pump Conference, Vol. 1, pp. 219-230.
6. Carrington, G., Hewitt, N., Bannister, P., and Anderson, J., 2003, Opportunities for Heat Pump Drying in Industrial Processes, Proc. of Int. Congress on Refrigeration, ICR0540.
7. KS B 7944, 2007, Agricultural products dryer, pp. 3-4.
8. Lee, H.-Y., 2006, Quality Characteristic of Dried Radish (*Raphanus sativus*) by Drying Methods, Sangju National University.
9. EES, 2012, F-chart Software LLC., V9.100-3D.
10. Lee, K. H. and Kim, O. J., 2007, Drying Performance Simulation for Basic Design of a Heat Pump Dryer, Transaction of KSMEB, Vol. 31, No. 10, pp. 860-867.