한국지열에너지학회논문집
Korea Society of Geothermal Energy Engineers
Vol. 14, No. 4, pp. 7~12 (2018) https://doi.org/10.17664/ksgee.2018.14.4.007

전기히터식 및 지열원 히트펌프식 농산물 열풍건조기의 에너지 성능 비교

양원석 · 김영일*† · 박승태**
서울과학기술대학교 일반대학원, *서울과학기술대학교 건축학부, **㈜에이티이엔지 기술연구소

Energy Performance Comparison of Electric Heater and Geothermal Source Heat Pump type Agricultural Hot Air Dryers

Won Suk Yang, Young Il Kim*†, and Seung Tae Park**
Graduate School, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
**School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea*
***ATENG, 14, Emtibeuibuk-ro 193beon-gil, Siheung-si, Gyeonggi-do 15118, Korea*

Abstract

Energy performance of electric heater and geothermal source heat pump type hot air dryers are compared in this study. For set temperatures of 30℃, 35℃ and 40℃, radish is dried from initial mass 60 kg until it gets 5 kg, where the difference equals the amount of water removed. As set temperature is increased, drying time is shortened for both electric heater and heat pump types, however energy efficiency is decreased due to increasing electricity consumption. Moisture extraction rate(MER) of electric heater is 2.58~2.84 kg/h, and for heat pump type 2.56~2.71 kg/h, showing little difference between the two types. Specific moisture extraction rate (SMER) of electric heater is 0.94~0.96 kg/kWh, and for heat pump type 1.72~2.21 kg/kWh. SMER of heat pump type is greater by 0.78~1.25 kg/kWh than the electric heater hot air dryer, which is 1.8~2.3 times better in terms of energy efficiency.

Key words: Agricultural product(농수산물), Electric heater(전기히터), Heat pump(히트펌프), Hot air dryer(열풍건조기), Specific moisture extraction rate(비제습률)

기호 설명

m : 시료의 질량 [kg]
MER : 제습률 [kg/h]
SMER : 비제습률 [kg/kWh]
w : 시료의 함수율 [%]
W : 공급 전력량 [kWh]

그리스 문자

τ : 건조시간 [h]

하첨자

d : 건조 상태
f : 종료
i : 초기
w : 시료의 수분

†Corrresponding author
Tel: +82-2-970-6557
E-mail: yikim@seoultech.ac.kr
접수일: 2018년 08월 28일
심사일: 1차:2018년 10월 10일, 2차:2018년 11월 13일
채택일: 2018년 11월 22일

1. 서 론

건조기는 건조대상물 내의 수분을 제거하여 건조시키는 장치로 열을 발생시키는 다양한 제품들이 있다. 농산물 건조기는 사용이 편리한 전기히터를 발열체로 한 제품들이 주류를 이루고 있다[1]. 그러나 전기히터를 사용한 건조기는 고급 에너지인 전기를 많이 소모하므로 에너지 효율이 좋지 않은 단점을 가지고 있다. 이에 Bannister는 에너지 효율을 높이기 위한 수단으로 히트펌프식 건조기의 특성을 소개하였는데, 히트펌프식 건조기는 전기히터식 건조기보다 에너지 효율을 약 80% 이상 높일 수 있으므로 에너지 절약 효과가 크다고 기술하고 있다[2].

히트펌프는 열원으로 외부공기 또는 지열을 이용하여 소비되는 전기에너지의 3~5배의 열에너지를 발생시키는 매우 효율적인 장치이다[3]. 그러나 열원으로 외부공기를 사용하였을 때 외기의 온도가 낮아질 경우 히트펌프의 효율이 낮아지는 단점이 있다. 반면 열원으로 지열을 사용할 경우 외부 온도의 영향을 직접 받지 않기 때문에 연간 온도변화의 폭이 크지 않아 히트펌프의 안정적인 운용이 가능한 장점이 있다[4].

건조기의 효율을 나타내는 지표는 시간당 수분감소량인 제습율(MER, moisture extraction rate, 단위 kg/h)과 소비전력당 수분감소량인 제습률(SMER, specific moisture extraction rate, 단위 kg/kWh)을 사용한다. 일반적으로 전기히터식 건조기의 SMER은 0.5~1 kg/kWh 인 반면 히트펌프식 건조기의 SMER은 3 kg/kWh 정도이지만 특수한 경우에는 8~10 kg/kWh까지 나타난다는 보고도 있다[5].

본 연구에서는 건조 시료인 무를 전기히터 및 지열원 히트펌프 열풍건조를 통하여 초기질량 60 kg를 5 kg가 될 때까지 건조하고, 각각의 MER과 SMER 그리고 히트펌프의 성능계수를 분석하여 에너지 성능을 비교하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 건조기 개요

Fig. 1은 전기히터와 히트펌프 시스템이 함께 구성된 건조용량 100 kg의 열풍건조기로 전기히터, 압축기, 냉각코일, 응축코일, 팬 등으로 이루어져 있다. 운전 모드에 따라 전기히터식 열풍건조 또는 지열원 히트펌프식 열풍건조를 선택할 수 있도록 하였다. 그리고 각각의 실험을 통해 에너지절약에 대해 비교분석을 할 수 있도록 하였다. Fig. 2와 Table 1은 각각 히트펌프 열풍건조기의 구성 및 건조실 내 공기흐름도와 재원을 나타낸다. 건조기의 호칭 규격은 3형(내부용적 3 초과 5 m^3 이하)이며 각 건조실에 최대 10개의 채반 수용이 가능하다. 건조 방법은 건조실 내부의 공기를 전기히터 또는 히트펌프의 응축기로 가열하여 순환팬을 통해 건조물에 가열된 공기를 공급하는 방식이다. 이때 건조물에서 발생하는 수분에 의해 건조실 내부의 수분량이 증가되는데 이를 감소시키기 위해 일정 공기를 건조실 외부로 배출시키고, 상대적으로 수분량이 적은 외부 공기를 인입시킨다. 건조 성능시험은 농수산물 건조기 시험방법 KS B 7944 : 2012를 적용하였다[6].

Fig. 1. Hot air dryer for testing both electric heater and geothermal source heat pump.

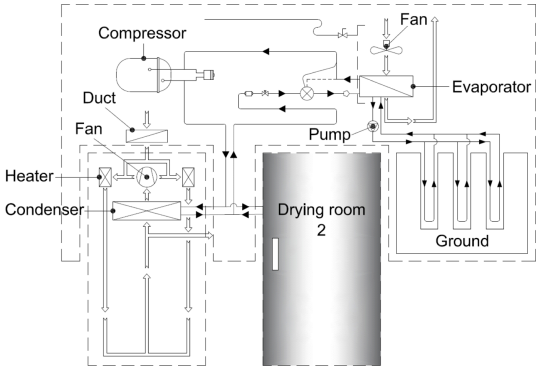

Fig. 2. Electric heater, heat pump type hot air dryer diagram.

Table 1. Hot air dryer specification

Component	Unit	Capacity	Specification
Electric heater	kW	1.9×2EA=3.8	Electric type
Compressor	kW	0.75	R-134a
Heating capacity	kW	2.5	Condenser heat
Plate heat exchanger	kW	1.2	
Circulation fan	kW	0.225×2EA=0.45	Air foil
Circulation pump	L/h (HP)	10,000 (1/3)	Low noise
Tray	EA	645×450×45(mm)	10×2 rows (Plastic)
Electric heater power	kW	4.38	220 V×1 Ø×60 Hz
Heat pump power	kW	1.76	220 V×1 Ø×60 Hz

2.2 건조실험 방법

건조실험을 위하여 먼저 건조시료인 무를 야채 절단기를 사용하여 크기 10×10×100(mm)로 가공하였다. 1개의 건조실에는 10개의 채반이 있으므로, 2개의 건조실의 20개의 채반 각각에 3 kg씩 무를 담아 총 60 kg의 무 건조시료를 초기조건으로 하였다. 그리고 전기히터식 및 지열원 히트펌프 열풍건조를 각각 진행하여 무 질량이 약 5 kg일 때 건조를 종료하였다.

제습률(MER)과 비제습률(SMER)을 확인하기 위하여 무 시료의 초기함수율과 종료함수율을 측정하였다. 측정 방법은 건조실 내부의 상, 중, 하의 채반에서 무작위로 10 g의 무 시료를 채취하여 수분측정기(Ohaus사, MB35)를 사용하여 5회 분석하였다. 식 (1)과 (2)는 시료의 초기함수율과 건조질량의 정의, 식 (3)과 (4)는 제습률(MER)과 비제습률(SMER)의 정의이다[7].

$$w_i = 1 - \frac{m_d}{m_i} \tag{1}$$

$$m_f = \frac{1 - w_i}{1 - w_f} m_i \tag{2}$$

$$\mathrm{MER} = \frac{m_{w,d}}{\tau} \tag{3}$$

$$\mathrm{SMER} = \frac{m_{w,d}}{W} \tag{4}$$

$$m_{w,d} = m_{w,i} - m_{w,f} \tag{5}$$

건조를 위한 온도조건은 전기히터식 및 지열원 히트펌프 열풍건조기 모두 동일하게 35, 40, 45℃로 설정하여 진행하였다.

2.3 실험 운전조건 및 측정기기

건조실험은 건조기 댐퍼를 닫고 온도 35, 40, 45℃에 도달한 상태에서 2시간 건조를 진행하고, 그 후 댐퍼를 개방하고 온도를 유지하여 건조 종료까지 운전하였다.

건조기 성능을 측정하고 분석하기 위하여 전기히터 및 히트펌프 각각의 요소기기에 대한 전력량, 온습도, 압력, 유량 및 시료의 질량을 측정하였다. 전력량은 LG사의 LD1210DR 전력량계(오차범위 전력량: ±1.0%), 온도는 열전대 T type(오차범위 온도: ±0.5℃), 온습도는 Vaisala사의 HMT330(오차범위 온도: ±0.2℃, 상대습도: ±1.0%), 유량은 Rheonik사의 RHM04GNT/RHE07(오차범위 질량유량: ±0.16%), 압력은 Setra사의 Pressure transmitter(오차범위 압력: ±0.13%), 시료의 질량은 G-Tech international사의 GI-830(오차범위 질량유량: 0.1%)을 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 지열원 히트펌프 시스템 성능

Table 2는 지열원 히트펌프 열풍건조기 지중열교환기와 지중특성을 나타낸 것이다. 이때 EWT와 LWT는 건조실험에서 측정된 평균 데이터를 나타낸다.

Table 2. Heat pump hot air dryer underground heat exchanger and underground specification

Component	Value	Component	Value
Pipe type	SDR 11	Hole length [m]	50
Pipe outsied diameter [mm]	42.2	Hole thermal resistance [m·K/W]	0.174
Pipe inside diameter [mm]	34.5	Thermal conductivity [W/m·K]	2.44
Pipe thermal resistance [m·K/W]	0.061	Thermal dispersion [m^3/day]	0.055
Entering water temperature [℃]	17.07	Cyclic water mass flow [kg/s]	0.41
Leaving water temperature [℃]	11.12	Grouting material	Bentonite
Ambient temperature [℃]	21.3	Grouting Thermal conductivity [W/m·K]	1.088

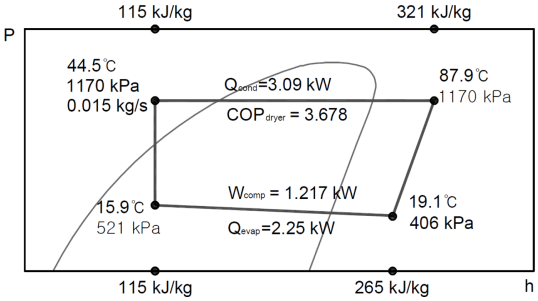

Fig. 3. Geothermal source heat pump performance data.

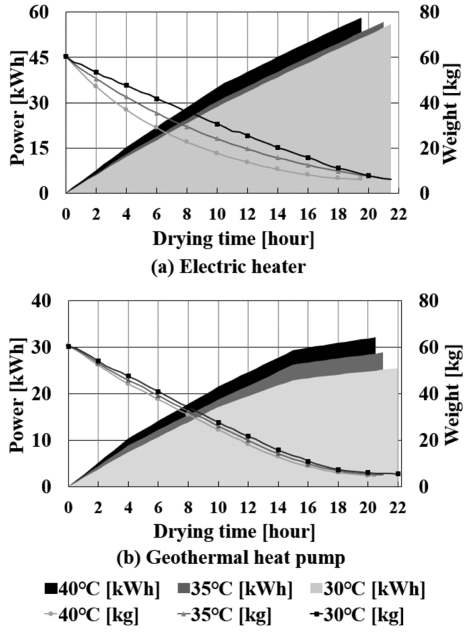

Fig. 4. Measured power consumption and mass.

건조실험 결과에 따라 건조기 설정온도 중 가장 높은 40℃에 대한 지열원 히트펌프 시스템 성능을 EES[8]를 이용한 사이클 해석으로 분석하였다. 히트펌프 시스템 성능 해석방법은 많이 알려져 있으므로 이는 생략하였다[9]. Fig. 3은 건조 과정에서 측정된 냉매의 압력, 온도, 질량유량 등을 이용하여 지열원 히트펌프 사이클 성능을 분석한 결과이다. 이때 냉매의 질량유량은 0.015 kg/s, 압축기의 전력은 1.217 kW로 측정되었다. 지열원 히트펌프의 응축열량은 3.09 kW(11,124 kJ/kg), 증발열량은 2.25 kW (8,100 kJ/kg), COP는 3.678로 나타났다.

3.2 전기히터식 열풍건조기

Fig. 4(a)는 전기히터식 열풍건조기의 실험결과를 나타낸다. 건조시료 초기질량 60 kg에서 5 kg이 될 때까지 건조 실험한 결과 총 건조시간 및 전력사용량은 설정온도 30℃에서 21시간 33분간 57.82 kWh, 35℃에서 21시간 6분간 58.54 kWh, 40℃에서 19시간 38분간 58.99 kWh를 사용한 것으로 나타났다. 설정온도 40℃에 비해 35℃의 건조시간은 1시간 28분(7.5%) 증가하였으며, 전력사용량은 0.45 kWh (0.8%) 절감된 것으로 나타났다. 30℃에서는 40℃ 대비 건조시간이 1시간 55분(9.8%) 증가하였으며, 전력사용량은 1.17 kWh(2.0%) 절감된 것으로 나타났다. 제습률(MER)은 건조온도 30℃, 35℃, 40℃에서 각각 2.58 kg/h, 2.67 kg/h, 2.84 kg/h로 30℃에 비해 35℃일 때 0.09 kg/h (3.5%) 증가, 40℃ 일 때 0.26 kg/h(10.1%) 증가하였다. 비제습률(SMER)은 건조온도 30℃, 35℃, 40℃에서 각각 0.96 kg/kWh, 0.95 kg/kWh, 0.94 kg/kWh로 각각 큰 차이 없이 온도가 올라갈수록 0.01 kg/kWh(1.0%) 감소하는 것으로 나타났다. 건조온도가 증가할수록 총 전력사용량은 증가하였으나 건조시간 단축에는 효과가 있는 것으로 나타났다.

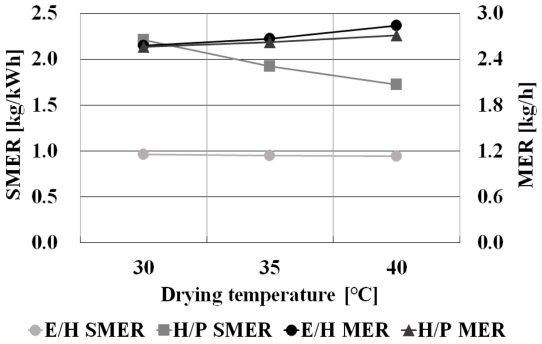

Fig. 5. SMER and MER.

3.3 지열원 히트펌프식 열풍건조기

Fig. 4(b)는 지열원 히트펌프식 열풍건조기의 실험결과를 나타낸다. 건조시료 초기질량 60 kg에서 5 kg이 될 때 까지 건조 실험한 결과 총 건조시간 및 전력사용량은 설정온도 30℃에서 21시간 50분간 25.24 kWh, 35℃에서 21시간 8분간 28.76 kWh, 40℃에서 20시간 28분간 32.16 kWh를 사용한 것으로 나타났다. 설정온도 40℃에 비해 35℃의 건조시간은 40분(3.3%) 증가하였으며, 전력사용량은 3.4 kWh(10.6%) 절감된 것으로 나타났다. 30℃에서는 40℃ 대비 건조시간이 1시간 22분(6.7%) 증가하였으며, 전력사용량은 6.92 kWh(21.5%) 절감된 것으로 나타났다. 제습률(MER)은 건조온도 30℃, 35℃, 40℃에서 각각 2.56 kg/h, 2.62 kg/h, 2.71 kg/h로 30℃에 비해 35℃일 때 0.06 kg/h(2.3%) 증가, 40℃ 일때 0.15 kg/h(5.9%) 증가하였다. 비제습률(SMER)은 건조온도 30℃, 35℃, 40℃에서 각각 2.21 kg/kWh, 1.92 kg/kWh, 1.72 kg/kWh로 30℃ 대비 35℃의 경우 0.29 kg/kWh(13.1%), 40℃의 경우 0.49 kg/kWh (22.2%) 감소하는 것으로 나타났다. 전기히터식 열풍건조기와 마찬가지로 건조온도가 증가할수록 총 전력사용량은 증가하였으나 건조시간 단축에는 효과가 있는 것으로 나타났다.

3.4 건조실험 결과

Table 3은 무 건조실험 결과를 종합적으로 나타낸 것이다. 초기 건조시료의 질량 60 kg을 건조하여 5 kg이 될 때까지 건조를 진행하였다. 전기히터 및 지열원 히트펌프 열풍건조기 모두 건조실의 구조는 동일하다. 총 채반 20개 각각에 3 kg의 무 시료를 올려놓고 건조 전 후로 채반 상, 중, 하에서 무 시료 10 g을 채취한 후 함수율 측정기로 초기 및 종료 함수율을 5회 이상 측정하였다. 무 시료의 초기함수율은 93.43~93.98%, 종료함수율은 13.61~14.54%로 나타

Table 3. Drying test results of electric heat and geothermal source heat pump type hot air dryers

Content		Unit	Electric heater			Geothermal heat pump		
			30℃	35℃	40℃	30℃	35℃	40℃
60 kg	Initial sample mass	g	10.03	10.01	10.02	10.04	10.03	10.01
	Final sample mass	g	0.66	0.64	0.65	0.64	0.63	0.63
	Initial moisture content	%	93.75	93.59	93.78	93.98	93.50	93.43
5 kg	Initial sample mass	g	10.02	10.02	10.01	10.02	10.01	10.01
	Final sample mass	g	8.64	8.33	8.81	8.67	8.62	8.49
	Final moisture content	%	14.54	14.12	13.80	14.10	14.22	13.61
Drying time		h, m	21h 33m	21h 06m	19h 38m	21h 50m	21h 08m	20h 28m
Electric heater power		kWh	49.22	50.36	51.03	-	-	-
Compressor power		kWh	-	-	-	13.59	15.44	17.62
Circulation fan power		kWh	8.60	8.18	7.96	8.51	8.38	8.25
Circulation pump power		kWh	-	-	-	3.14	4.94	6.29
Total power		kWh	57.82	58.54	58.99	25.24	28.76	32.16
MER		kg/h	2.58	2.67	2.84	2.56	2.62	2.71
SMER		kg/kWh	0.96	0.95	0.94	2.21	1.92	1.72

났다.

전기히터 열풍건조기의 전력사용량은 57.82~58.99 kWh로 나타났다. 지열원 히트펌프 열풍건조기의 총 전력사용량은 25.54~32.16 kWh이며, 그 중 13.59~17.62 kWh (53.2~54.8%)는 압축기의 전력사용량으로 나타났다.

제습률(MER)은 시간당 수분 감소량을 나타내는 지표[2]로 건조온도가 증가 할수록 높아지는 것을 확인하였다. 전기히터 열풍건조기는 2.58~2.84 kg/h, 지열원 히트펌프 열풍건조기는 2.56~2.71 kg/h로 큰 차이를 보이지 않았다.

비제습률(SMER)은 건조시료를 건조함에 있어 투입된 전력량 대비 시료의 수분 감소량을 나타내는 지표로 건조에너지 효율을 의미한다[2]. 전기히터 열풍건조기의 SMER은 0.94~0.96 kg/kWh, 지열원 히트펌프 열풍건조기는 1.72~2.21 kg/kWh로 나타났다. 전기히터식 열풍건조기에 비해 지열원 히트펌프식 열풍건조기의 SMER이 0.78~1.25 kg/kWh 높아 약 1.8~2.3배 에너지 효율이 더 좋은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기히터식 및 지열원 히트펌프식 열풍건조기의 건조실험을 통한 에너지 성능을 비교 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1) 전기히터 열풍건조기는 설정온도 30℃, 35℃, 40℃에서 건조시간 및 전력사용량은 각각 21시간 33분간 57.82 kWh, 21시간 6분간 58.54 kWh, 19시간 38분간 58.99 kWh로 나타났다. 지열원 히트펌프 열풍건조기는 설정온도 30℃, 35℃, 40℃에서 건조시간 및 전력사용량은 21시간 50분간 25.54 kWh, 21시간 8분간 28.76 kWh, 20시간 28분간 32.16 kWh로 나타났다. 전기히터식 및 지열원 히트펌프 열풍건조기 모두 설정온도가 높아질수록 건조시간은 줄어드는 반면 전력사용량은 높아지는 것을 확인하였다.

2) 제습률(MER)은 전기히터 열풍건조기의 경우 2.58~2.84 kg/h, 지열원 히트펌프 열풍건조기의 경우 2.56~2.71 kg/h로 나타났다. 두 열풍건조기의 제습률(MER)은 큰 차이를 보이지 않았다.

3) 비제습률(SMER)은 전기히터 열풍건조기의 경우 0.94~0.96 kg/kWh, 지열원 히트펌프 열풍건조기의 경우 1.72~2.21 kg/kWh로 나타났다. 전기히터식 열풍건조기에 비해 지열원 히트펌프식 열풍건조기의 SMER이 0.78~1.25 kg/kWh 높아 약 1.8~2.3배 에너지 효율이 더 좋은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20163030111210).

References

1. Foodnews, 2015, Agricultural Products and Dryers Market, www.foodnews.co.kr.
2. Yu, Young Woo, Kim, Young Il, and Park, Seung Tae, 2015, Energy Performance Analysis of Electric Heater and Heat pump Food Dryer, Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 1-6.
3. Kang, Hyeong Gyu, 2012, A Study on the Parameter of Ground Source Heat Pump System and Optimal Design Condition, University of Seoul, pp. 11-12.
4. Bae, Sang Mu, 2018, Feasibility Analysis and Performance Prediction of Ground Source Heat Pump System using Deep Ground Heat Exchanger, Master's degree thesis, Department of Architectural Engineering The Graduate School, Busan National University.
5. Kudra, T. and Mujumdar, A. S., 2002, Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker. Inc., New York.
6. KS, 2012, KS B 7944 Agricultural Products dryer, pp. 3-4.
7. Lee, Min Jae, 2008, An experimental study on the performance of clothes dryer using thermoelectric module, Master's degree thesis, Department of Refrigeration Engineering, Bukyong National University.
8. F-chart Software, EES, 2012, V9.100-3D.
9. 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.