

보조 외부 증발기를 이용한 히트펌프 건조기 성능 향상에 관한 연구

이 영 림[†], 박 상 준*, 황 일 선*

공주대학교 기계자동차공학부, *공주대학교 대학원 기계공학과

A Study on Performance Improvement of a Heat Pump Dryer with an Extra Evaporator Outside

Young Lim Lee[†], Sang Jun Park*, Il Sun Hwang*

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea
*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

(Received May 11, 2012; revision received August 29, 2012)

ABSTRACT: A heat pump dryer for the frozen food needs to preheat the air to a certain temperature where condensation can efficiently occur. In this study, an analysis of a heat pump dryer performance with operating conditions, an analysis of supplying heat with internal and external evaporators and a warm-up experiment with the evaporators have been performed. The results showed that the external evaporator can significantly accelerate the warm-up time of the dryer, so that it can reduce power consumption greatly. The use of the external evaporator is more efficient for higher ambient temperature. In addition, it was found that COP decreases and the range of evaporating pressure for the evaporator becomes narrower as the condensing temperature of the condenser increases.

Key words: Heat pump(히트펌프), Dryer(건조기), Evaporator(증발기), Cycle(사이클)

기 호 설 명

<i>COP</i>	: 성적계수	<i>air</i>	: 공기
<i>a, β</i>	: effectiveness-capacitance rate product	<i>sat</i>	: 포화
<i>ε</i>	: heat exchanger effectiveness	<i>comp</i>	: 압축기
<i>m</i>	: 냉매 질량유량 [kg/s]	<i>cond</i>	: 응축기
<i>T</i>	: 온도 [°C]	<i>eva</i>	: 증발기
<i>c</i>	: 비열 [kW/K]	<i>in</i>	: 건조기 내부
		<i>suc</i>	: 흡입

하첨자

amb : 대기

1. 서 론

식품 및 가공분야에서 건조공정은 최종공정으로 많은 열에너지가 필요하다.⁽¹⁾ 히트 펌프(heat pump) 방식의 건조기는 1단 압축 사이클을 보편적으로 널리 사용하고 있다. 건조공정은 건조물보다 건조기 내부 공기의 습도를 낮게 유지하여 건조물로부터 증발을

[†] Corresponding author

Tel.: +82-41-521-9261; fax: +82-41-555-9123

E-mail address: ylee@kongju.ac.kr

유도하는 방식이다. 건조물보다 낮은 습도를 얻기 위해서는 건조실 내부에 증발기와 응축기를 설치하여 냉매의 증발과 응축의 반복적인 과정을 통하여 수증기의 응축으로 얻어진 수분을 외부로 배출시켜 건조실 내부 습도를 낮게 유지하여 건조물을 건조한다.

히트펌프 건조기는 1970년대부터 목재 및 식품 건조 분야에서 사용되어 왔다.⁽²⁾ 목재 건조에 사용되는 초기 히트펌프 건조기의 경우 석탄과 가스를 이용하는 건조기에 비해 42~45% 정도 에너지 절감 효과가 있었으나 일반적으로 기존 열풍식 건조기에 비해 에너지 효율이 약 80% 이상 좋은 것으로 알려져 있다.^(3,4) 이러한 히트펌프 건조기의 에너지 효율을 높이기 위해 현재도 많은 연구가 보고되고 있다.

Cho et al.⁽⁵⁾은 추가 팽창기를 적용하여 기본사이클에 비하여 약 25% 정도 효율이 증가하는 것을 수치해석을 통해 예측하였으며, Lee⁽⁶⁾는 두 개의 증발기를 가진 냉동 사이클에서 수동 팽창밸브와 증발압력조절기의 개도 변화를 통해 최적의 운전상태를 도출하였다. Bivens et al.⁽⁷⁾은 내부 열교환기를 적용함에 따라 시스템 성능이 약 6~7% 정도 향상됨을 증명하였고, 건조기의 효율을 높이기 위해 태양에너지를 곡물 건조기에 적용하는 방법에 관한 연구 등^(8,9)도 이루어지고 있다. Yoon et al.⁽¹⁰⁾등은 건조방법이 고추의 품질에 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 실시한 결과 60°C에서 건조할시 건조시간 대비 적절한 수분함량을 보였다.

냉동 농산물용 히트펌프 건조기는 초기 가동시 전기히터를 사용하여 건조실 내부의 온도를 일정 온도 이상으로 상승시킨 후 히트펌프 사이클을 가동하게 된다. 일정 온도까지 가열하기 위한 시간은 히트펌프 건조기의 시스템이나 건조물 종류에 따라 다르지만 약 12톤의 냉동 고추 건조기 기준으로 5시간 정도 소요된다. 이는 건조기의 에너지 효율을 저해하는 주요한 요소이다.

따라서 본 연구에서는 건조실 내부 승온을 더욱 가속화하기 위하여 외부 증발기를 장착하고 승온시간 단축이 얼마나 효율적으로 이루어 질 수 있는지에 대하여 알아보았다. 이를 위하여 수치해석과 실험을 통하여 승온시간 및 건조기 성능을 검증하였고 다양한 운전 환경에서의 건조기 특성을 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용한 히트펌프 건조기의 개략

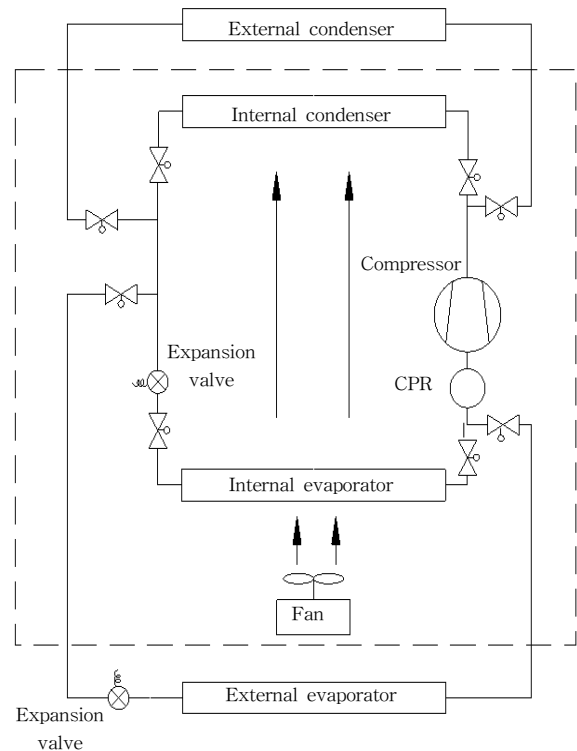


Fig. 1 Schematic of a dryer system for frozen food.

도를 나타냈다. 점선은 건조실 내부를 의미하며 내·외부 증발기와 내·외부 응축기의 전환은 수동으로 전환할 수 있게 하였다. 본 시스템은 건조 초기의 승온과정에는 외부증발기를 사용하고 승온과정 이후에는 내부 증발기를 사용하게 된다. 이는 건조 초기에 내부 증발기를 사용하지 않아 승온시간을 단축시키기 위함이다. 또한, 건조기실 내부의 온도가 설정온도보다 상승하게 되면 외부응축기를 사용하여 과열을 방지하게 하였다. 외부응축기 작동여부는 압축기 토출압력 21 bar를 기준으로 하였다. 한편, 필요시 압축기 입구의 압력을 강제적으로 일정하게 유지하기위한 CPR(Crankcase Pressure Regulator)도 장착하였다.

실험에 사용된 냉매는 R134a이며 건조실 체원은 2.5×1.6×0.9 m, 송풍기 날개 지름은 0.18 m, 풍량은 1,300 m³/h, 응축기와 증발기는 0.5×0.47×0.14 m이며 압축기는 Copeland사의 ZB21 모델이다.

3. 해석방법 및 조건

건조기 히트펌프 사이클 성능 해석을 위하여 상용 공학 프로그램인 EES⁽¹¹⁾ 와 내장 열물성 자료를

Table 1 Cycle analysis conditions

Compressor Type	Scroll Type
Volume Flow Rate	$2.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
Efficiency of compressor	0.55
Refrigerant	R134a
Supercooled degree	$T_{sh} = 5^\circ\text{C}$
Subcooled degree	$T_{sc} = 5^\circ\text{C}$
α, β	0.5 kW/K

Table 2 Specification of CPR

Pressure range	0~5.5 bar
Maximum pressure range	14 bar
Maximum fluid temperature	60°C
Design pressure	2.5 bar

이용하였다. Table 1은 해석에 사용한 조건을 보여 준다. 압축기는 스크롤 타입으로 $2.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 의 체적 유량을 발생시키고 등엔트로피 효율은 약 0.55를 사용하였고 압력 및 온도 손실은 무시하였다. 한편, 증발기에서 전달된 총 열량은 식(1)과 같이 단순화하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{eva} &= \alpha(T_{sat,eva} - T_{air,eva}) \\ &= \epsilon m_{air,eva} c_{air,eva} (T_{sat,eva} - T_{air,eva}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 α 는 증발기의 유용도 및 증발기를 통과하는 공기의 질량유량, 비열을 각각 곱한 것으로 0.5 kW/K로 가정하였다.

또한, 응축기에서 전달된 총 열량은 식(2)와 같이 가정하였고 β 는 0.5 kW/K로 가정하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{cond} &= \beta(T_{sat,cond} - T_{air,cond}) \\ &= \epsilon m_{air,cond} c_{air,cond} (T_{sat,cond} - T_{air,cond}) \end{aligned} \quad (2)$$

또한, 압축기의 과열을 방지하기 위한 CPR의 영향을 알아보기 위하여 CPR의 유무에 따른 사이클 변화를 해석하였다. CPR의 제원은 Table 2에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 증발온도 및 응축온도에 따른 히트펌프 성능 변화 해석

본 연구에서 고려한 압축기의 성능 데이터로부터

Fig. 2와 같이 증발온도 및 응축온도에 따른 히트펌프 건조기의 COP 변화를 나타냈다. 증발온도가 증가하면 상대적으로 압축일이 적어지므로 COP가 증가하고, 응축온도가 높아지면 압축일이 많아지므로 감소하게 된다. 냉동고추의 건조를 위하여 응축온도를 65°C 로 고정하게 되면 허용 증발기의 온도 범위는 $-5 \sim 10^\circ\text{C}$ 정도가 된다. 이 때 COP는 약 2.2~3.2사이에서 변화하게 된다.

Fig. 3은 증발온도 및 응축온도에 따른 히트펌프 건조기의 압축일 변화를 보여준다. 압축일은 증발온도에 따라서는 거의 변화하지 않고 일정하나 응축온도가 높아지면 압축일도 증가한다. 이는 증발압력이 1.6~4.1 bar 변화할 때 응축압력은 7.7~23.7 bar로 변화하여 변동 폭이 상대적으로 크다는 것에 기인한다. 한편, 응축온도가 65°C 일 때 $-5 \sim 10^\circ\text{C}$ 의 증발온도 범위에서 압축일은 약 2.7 kW이다.

한편, 냉동고추 건조를 위한 건조기 내부 온도를 설정하기 위해 Fig. 4와 같이 내부 공기온도에 따른 응축수 질량유량을 예측하여 보았다. 이 때, 증발기 열교환량은 4 kW로 가정하였다. 먼저, 건조기 내부 온도가 증가하면 응축수량은 비례하여 증가한다. 또한 증발기 전면 공기의 상대습도가 클수록 응축이 활성화된다. 증발기 전면 공기온도가 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ 일 때 응축이 발생하기 위해서는 상대습도가 적어도 약 72% 보다 커야함을 알 수 있다. 본 연구에서는 COP 값을 2 이상 유지함과 동시에 최대 건조 성능을 확보하기 위해 건조기 내부 온도를 60°C 로 결정하였다.

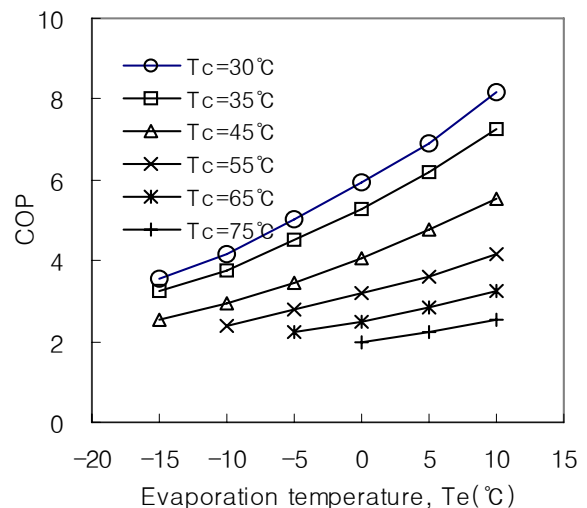


Fig. 2 Variation of COP with condensing and evaporating temperature.

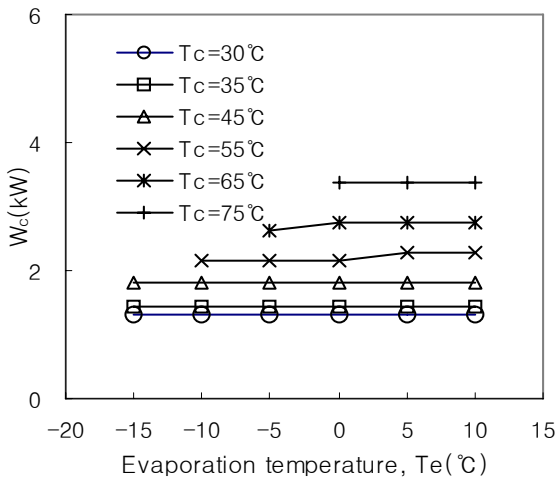


Fig. 3 Variation of compressor work with condensing and evaporating temperature.

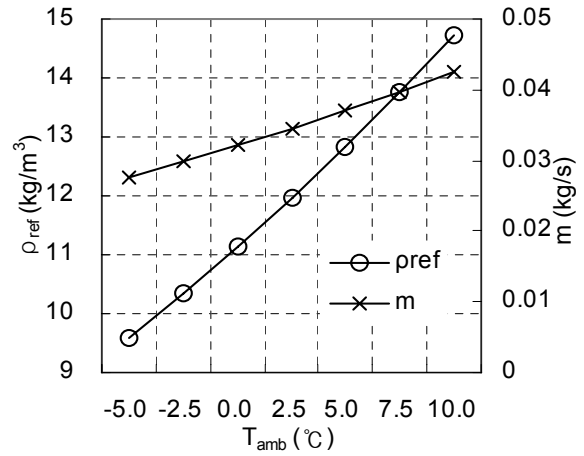


Fig. 6 Variation of refrigerant density and mass flow rate with ambient temperature.

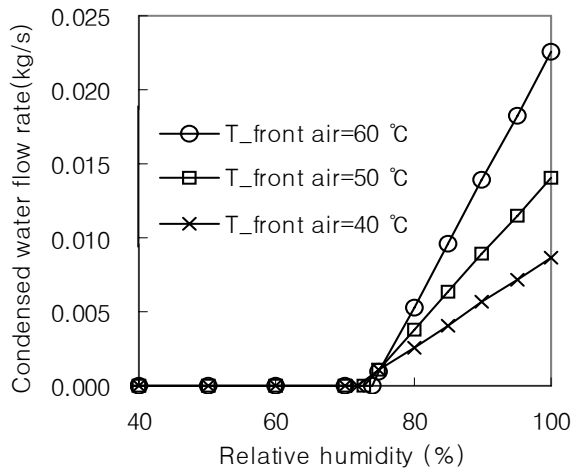


Fig. 4 Variation of condensed water mass flow rate with relative humidity.

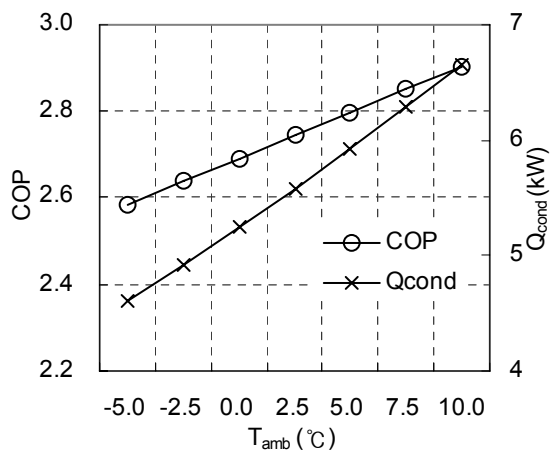


Fig. 5 Variation of COP and condenser heat release rate with ambient temperature.

4.2 외기온도 변화에 따른 건조기 사이클 성능 해석

외부 증발기 사용시 외기온도 변화에 따른 히트펌프 건조기의 성능 변화를 알아보기 위하여 응축기 전면 공기온도를 60°C로 고정시키고 사이클 해석을 수행하였다. Fig. 5에 외기온도에 따른 응축기 방열량 및 COP의 변화를 나타내었고, Fig. 6에 외기온도에 따른 냉매의 밀도 및 유량의 변화를 나타냈다. 외기온도가 감소함에 따라 응축기 방열량은 감소하는데 이는 질량유량 감소에 기인한다. 질량유량이 감소하는 이유는 외기온도가 낮아짐에 따라 응축기 포화압력이 낮아지게 되고 이는 응축기 입구에서의 냉매밀도를 감소시키게 된다. 따라서 압축기의 체적유량은 일정한데 냉매의 밀도가 감소하게 되면 당연히 질량유량은 감소하게 된다. 응축기 방열량의 감소는 결국 히트펌프 건조기의 COP를 감소시킨다.

4.3 내·외부증발기 사용시 건조기 공급열량 해석

Fig. 7은 건조실 내부의 증발기와 응축기를 사용했을 경우 건조실 내부 온도 변화에 따른 건조기 공급열량을 보여준다. 이 때, 내부 공기가 증발기를 지나면서 5°C 감소하고 공급열량은 응축기 방열량에서 증발기 흡열량의 차로 정의하였다. 건조실 내부 온도가 감소함에 따라 건조기에 공급되는 열량 또한 감소하므로 건조 초기에 냉동 고추와 같은 농산물

을 일정온도까지 가열시키기 위한 히트펌프 가동은 비효율적이라 사료된다.

Fig. 8은 건조기 공급열량을 증대시키기 위하여 내부 증발기 대신 외부증발기를 사용할 경우, 외기 온도에 따른 건조기 공급열량을 나타낸다.

외기온도가 증가함에 따라 증발기가 외기에서 가져오는 열량 증가로 인하여 건조실 공급열량은 비례하여 증가한다. 건조실 온도 10℃ 기준으로 외부 증발기 사용할 때 공급열량은 약 7.5 kW로써 내부 증발기 0.86 kW에 비해 약 8.6배 정도 많다. 이는 냉동 농산물 초기 승온시 훨씬 효율적임을 의미한다. 한편, 건조실 내부온도가 0~30℃로 변화할 때 공급열량의 변화는 약 3% 이내로써 고려된 온도 범위에서 상대적으로 변화량이 크지 않고 일정함을 알 수 있다.

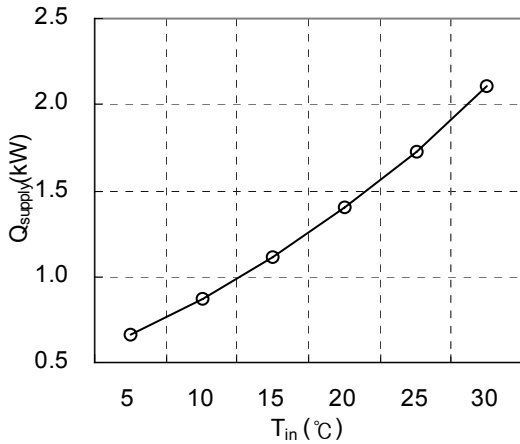


Fig. 7 Variation of heat supplying rate with air temperature in a dryer.

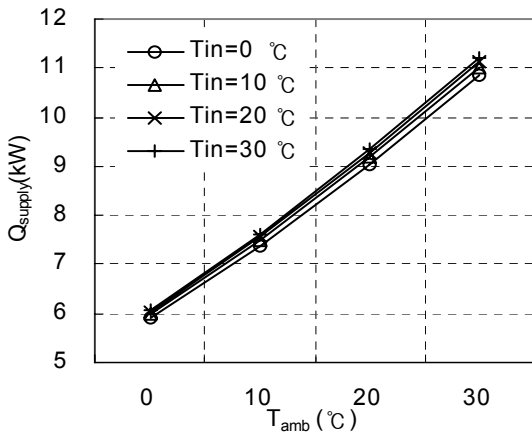


Fig. 8 Variation of heat supplying rate with ambient temperature.

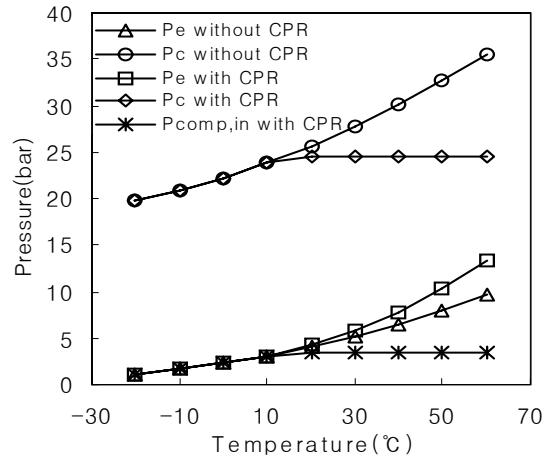


Fig. 9 Variation of evaporator and condenser pressures with air temperature in front of evaporator.

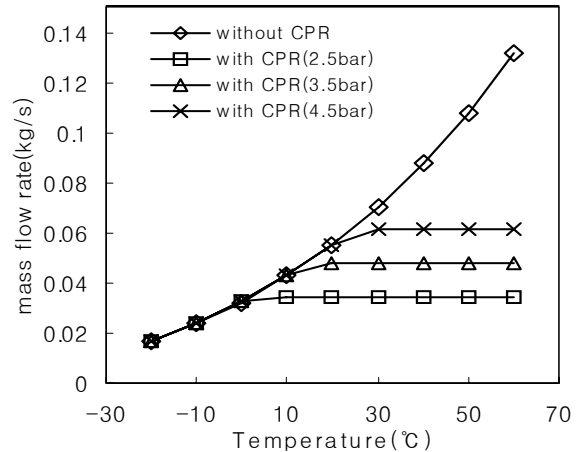


Fig. 10 Variation of mass flow rate with air temperature in front of an evaporator.

4.4 CPR 장착여부에 따른 히트펌프 특성 해석

증발기 통과풍의 온도 변화에 따라 시스템이 과열 될 수 있어 CPR 장착 여부에 따른 히트펌프 사이클의 특성을 알아보았다. Fig. 9는 응축기 전면 공기 온도가 60℃일 때 증발기 전면 공기온도에 따른 증발 압력 및 응축압력 변화를 보여준다. CPR을 적용하지 않은 모델의 경우 증발기 전면공기 온도 약 20℃ 이상에서는 증발압력이 제조사 허용압력 2.5~5 bar를 초과하게 된다. 한편 CPR을 3.5 bar로 고정시키면 압축기 흡입관의 압력을 강제적으로 낮춰 압력을 유지하게 되는데 이로 인하여 응축기의 응축압력이 일정하게 된다. 증발압력은 CPR로 인해 질량유량

이 감소하게 되므로 CPR을 적용하지 않을 때보다 상승하게 된다.

Fig. 10은 응축기 전면 공기온도가 60℃일 때 증발기 전면부의 공기온도에 따른 냉매의 질량유량을 나타낸다. CPR을 적용하지 않았을 경우 증발기 전면 공기온도가 증가하여 증발기 온도 또한 상승하게 된다. 이 때 이러한 온도 상승을 감지한 팽창밸브의 개도량이 증가하여 냉매의 질량유량이 상승하게 된다. 하지만 CPR을 장착할 경우 냉매의 질량유량은 설정된 압력까지 증가하다 설정된 압력에 도달하면 제한된 압력으로 인해 질량유량이 일정하게 된다.

Fig. 11은 증발기 전면부의 공기온도에 따른 COP의 변화를 나타낸다. CPR이 없는 경우 증발기 전면 공기온도가 증가함에 따라 증발기의 압력 및 온도가 증가하게 되고 이로 인해 압축기의 일량이 감소해 COP가 상승하게 된다. 하지만 CPR을 적용하면 고정된 압력과 온도로 COP가 증가하지 않는다.

CPR을 적용하면 압축기의 과부하 및 과손을 방지 할 수 있지만 냉매 질량유량 감소로 인하여 증발 압력이 상승해도 COP가 증가하지 않고 오히려 건조기의 효율은 감소하게 된다.

4.5 내 · 외부 증발기 사용 승온 실험

건조실 내부 공기온도를 승온할 때 내부 증발기와 외부 증발기가 승온시간에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 12는 건조실 내부에 채반이 없는 상태에서 시간에 따른 건조실 내부 공기온도를 보여준다. 먼저, 내부 증발기를 사용하면 60℃까지 약 25분 걸린

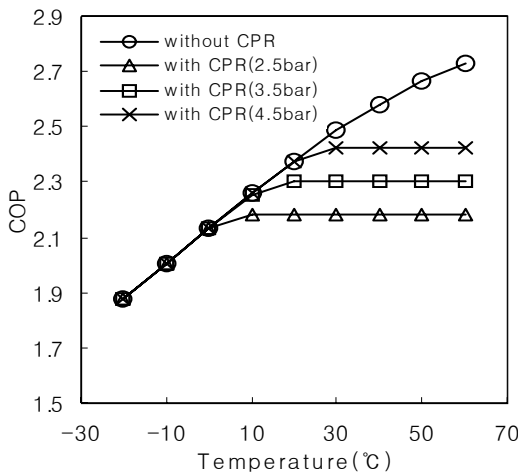


Fig. 11 Variation of COP with air temperature in front of evaporator.

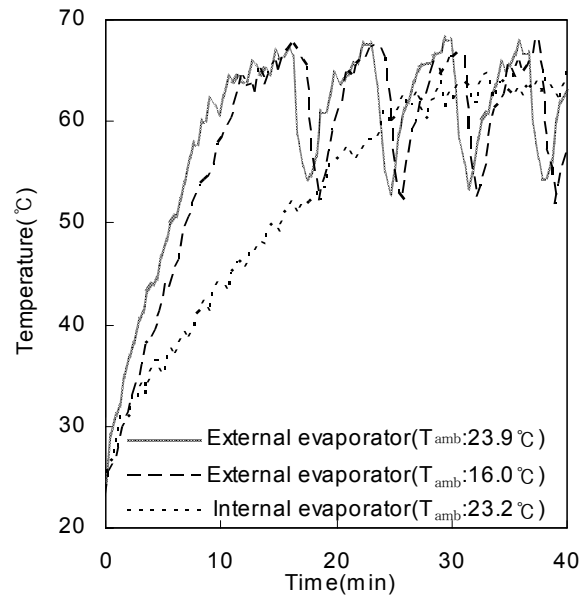


Fig. 12 Variation of heat supplying rate for the dryer with inside air temperature.

다. 하지만 외부 증발기를 사용하면 외기온도 23.9℃에서 약 8분으로 측정되었고, 외기온도 16.0℃에서는 약 11분으로 측정되었다. 이는 외기온도가 높아지면 상대적으로 외부 증발기 흡열량이 많아지는 것에 기인한다. Fig. 8의 해석결과에서는 실험결과보다 훨씬 빠른 승온이 예측되었으나 해석에서는 건조기 내부 공기가 저온일 때를 고려하여 외부 증발기 효과가 극대화되었고 CPR 또한 고려하지 않았기 때문이다. 결과적으로 외부 증발기를 사용하여 전체 건조과정에서 수분 응축이 본격적으로 일어나는 약 40℃까지 초기 승온시간을 단축한다면 획기적인 예

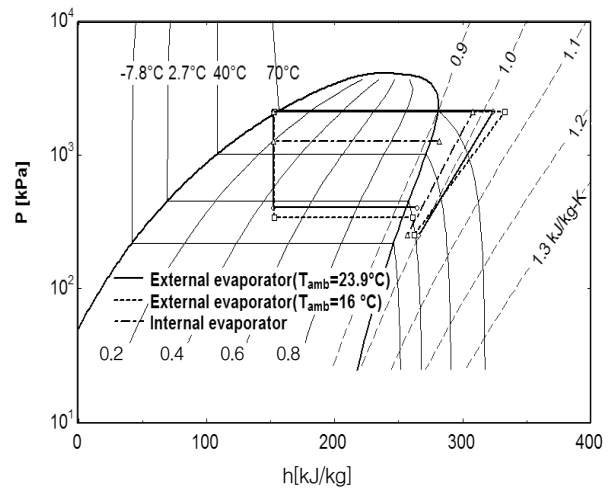


Fig. 13 Variation of P-h diagram of the heat pump dryer with evaporator.

너지 저감이 가능하다.

Fig. 13은 건조기 내부 공기온도가 60℃에 도달하였을 때 내·외부 증발기 사용에 따른 P-h 선도를 보여준다. 외부 증발기 사용시에는 외기 온도가 높아지면 증발압력 역시 상승하였고, 내부 증발기 사용시에는 증발압력이 약 10 bar 이상까지 상승하여 압축기 토출부에서 이상 고압현상으로 인해 압축기 손상 우려가 있다. 따라서 건조부하가 없거나 경미할 때 건조기 사용시 압축기 과열로 인해 CPR을 작동시켜 압축기를 보호 할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 히트펌프 건조기의 운전조건에 따른 건조기 성능변화 해석, 내·외부 증발기 사용시 공급열량 해석, 내·외부 증발기 사용 승온실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 냉동고추와 같은 농산물 건조를 위하여 응축온도를 높게 설정할수록 COP는 줄어들며 사용 증발압력 범위도 좁아지게 된다.

(2) 외부 증발기 사용시 외기온도가 낮아지면 그에 따라 냉매 유량, 응축기 방열량 및 COP 감소하므로 외부 증발기 사용은 외기 온도가 높을수록 유리하다.

(3) CPR을 사용하게 되면 건조기 효율은 하강하나 압축기 입구 압력을 안정적으로 유지할 수 있어 압축기 내구성에는 유리하다.

(4) 건조 초기에 외부 증발기 사용은 내부 증발기 사용 대비 상당한 승온시간 단축이 가능하다. 따라서 냉동고추와 같은 농산물을 해빙하고 응축수가 본격적으로 발생하는 온도까지 승온시킬 때 내부 증발기 대신 외부 증발기를 사용하고 그 이후에 내부 증발기를 가동하여 응축수를 배출하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 2010년도 한국에너지기술평가원의 일부 지원(20102020100430-12-2-100) 및 교육과학기술부 한국연구재단의 일부 지원(2011-0024805)를 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Mujumdar, A. S., 1995, Handbook of Industrial

Drying, Marcel Dekker, Inc., New York.

2. 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.
3. Bannister, P., Chen, G., Grey, A., Carrington, C. G., and Sun, Z. F., 1997, Economic Reduction of Greenhouse Gas Emission Through Enhanced Dehumidifier Timber Drying, Proc. of 19th Int. Congress of Refrigeration, pp. 241-249.
4. Wijesighe, B., 1997, Low Temperature Drying of Food Materials Using Energy-Efficient Heat Pump Dryers, CADDET Newsletter, No. 7, pp. 4-5.
5. Cho, H. H., Baek, C. H., Ryu, C. G., and Kim, Y. C., 2007, Simulation Study on the Performance Characteristics of a CO₂ Cooling System with an Expander, Korean Journal of Air-conditioning and refrigeration Engineering, pp. 630-639.
6. Lee, J. S., 2008, Performance Analysis of a Refrigeration System with Parallel Control of Evaporation Pressure, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B., Vol. 32, No. 8, pp. 567-573.
7. Bivens, D. B., Allgood, C. C., Shiflett, M. B., Patron, D. M., Chisolm, T. C., Shely, G. S., Yokozeki, A., Wells, W. D., and Geiger, K. A., 1994, HCFC-22 alternative for air conditioners and heat pumps, ASHRAE Transactions, Vol. 100, No. 2, pp. 566-572.
8. Hall, C. W., 1980, Drying and Storage of Agricultural Crops, AVIP Publishing Co., Inc.
9. Buelow, F. H., 1958, Drying Grain with Solar Energy, Michigan State University, Agri. Exp. Stn, Q. Bull, Vol. 41.
10. Yoon, W. M. and Lee, J. Y., 2004, Effect of Drying method on the Quality of Red pepper, Journal of Natural Sciences, Vol. 14, No. 1, pp. 139-149.
11. EES, 2012, F-chart Software LLC., V9.100-3D.