

외기온 변화에 따른 공기-공기/공기-물 형태로 된 복합형 열펌프 시스템의 성능 특성 분석[†]

Performance Analysis of Hybrid Heat Pump System of the Air-to-Air/Air-to-Water with the Ambient Temperature

송 현 갑*

정희원

H. K. Song

SUMMARY

The hybrid heat pump system of the air to air and / or air to water was composed and its COP was analyzed with the ambient temperature on the opened and closed loop system respectively.

The results could be summarized as follows.

1. It could be indicated by the equation (7) that the COP(Coefficient of Performance) of air-source(air to air and / or air-water) heat pump is effected with the ambient air temperature and AVACTHE.(Automatic Variable Area Capillary Type Heat Exchanger)
2. The COP of air-to-water heat pump without AVACTHE decreased in accordance with the ambient temperature decrease, however in case of the heat pump with AVACTHE the COP was maintained at 2.8 ~3.0 level when the ambient temperature decrease from -5°C to -11°C .
3. The COP of the air-to-water heat pump operated on the open loop was higher 40~58% than that of the heat pump operated on the close loop.
4. The lower ambient temperature air effect on the COP of the air-to-air heat pump operated on the semi closed loop could be controlled using the AVACTHE, and at the high ambient air temperature the COP increased using the Bypass circuit.

주요용어(Key Words) : 성능계수(COP), 공기 대 공기 열펌프(Air to air heat pump), 공기 대 물 열펌프(Air to water heat pump), 외기온(Ambient temperature)

1. 서 론

지구 환경이 화석에너지 과다사용으로 인하여 심각하게 오염되고, 석유에너지 가격이 배럴당 28~29달러까지 급등하는 고유가 시대에 자연열에너지 의존율을 높이려는 연구는 화석에너지 절약과 환경오염을 동시에 해결하려는 바람직한 시도가

다.

자연열에너지(태양에너지, 지하수, 하천, 토양에너지, 공기 중 저온에너지) 이용에는 여러 가지 방법이 있으나, 그 중에서 대기 중 저온 열에너지를 열원으로 유용한 온도수준의 열을 얻을 수 있는 열펌프 시스템이 풍부한 열원을 배경으로 하기 때문에 바람직하다. 그러나 -5°C 이하의 외기온에서

[†] This study was supported by the Development Fund of Chungbuk National University. This article was submitted for review in April 2000 and accepted for publication in June 2000.

* The author is Song, Hyun Kap, Professor, Dept of Agricultural Machinery Engineering, College of Agriculture, Chungbuk National University, Cheongju 361-769, Korea. E-mail: <hksong@cbucc.chungbuk.ac.kr>.

는 그 성능이 급격히 저하하기 때문에 우리 나라와 같은 겨울철 혹한이 심한 기후 조건에서는 이를 극복할 수 있는 새로운 열펌프 시스템을 구성해야 한다.

본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위하여 응축기 출구와 증발기 입구 사이에 AVACTHE (Automatic Variable Area Capillary Type Heat Exchanger)라는 열교환기를 새로 고안하여 설치하고, 외기온 변화에 따라 AVACTHE가 열펌프 성능에 미치는 영향을 개방계와 폐쇄계에서 각각 분석함으로써 새로 구성한 열펌프 시스템의 실용화 가능성을 검증하려 하였다.

2. 열펌프 성능계수(COP)의 이론 분석

열펌프의 성능계수를 이론적으로 분석하기 위하여 그림 1과 같은 P-h선도를 이용하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 점선은 AVACTHE가 없는 경우 열펌프의 냉매 사이클이고, 실선은 AVACTHE가 응축기 출구와 증발기 입구에 설치된 경우의 사이클이다. 과열 현상(①~①')은 압축기 입구 전에서 나타나고, 과냉현상(③~③')은 응축기 출구직전에서 나타나고 있음을 보여주고 있다. 그림 1을 중심으로 히트펌프사이클을 상세히 설명하면, ①~②는 압축과정, ②~③은 응축과정, ③~④는 팽창과정이며 ④~①은 증발과정이다.

가. 압축기의 축동력($P_{comp.}$)과 실제 소모전력($P_{R,comp.}$)

그림 1에 나타내고 있는 열펌프에 관한 P-h선도를 기준으로 열펌프 압축기의 축동력과 손실에너지를 고려하여 실제로 압축기가 소모하고 있는 전력을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$P_{comp} = \frac{\dot{m}_{r,c}(h_2 - h_1)}{\eta_{motor}} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_{R,comp} = (h_2 - h_1) \cdot \left(\frac{n_{s,comp}}{60v_c}\right) \cdot \left(\frac{\pi D_{pl}^2}{4}\right) D_p \cdot Z_{pl} \cdot \frac{\eta_v}{\eta_{comp} \cdot \eta_{me}} \dots\dots\dots (2)$$

나. 열펌프의 성능계수, COP

열펌프가 얻는 열에너지와 시스템이 소모하는

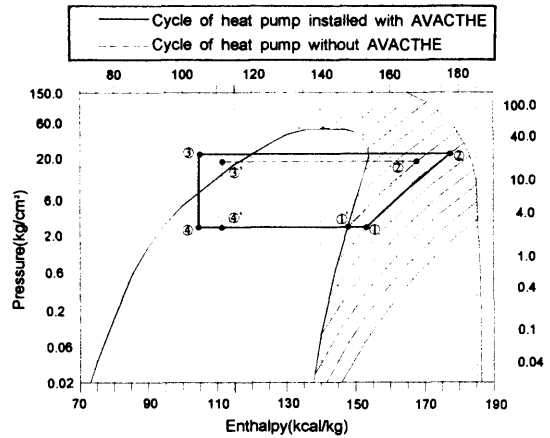


Fig. 1 P-h diagram of the heat pump.

에너지 비로 성능계수를 정의하고 있으며, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$COP = \frac{\text{heat gain}}{\text{power input}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 ; heat gain : $\dot{q}_{cd} = \dot{q}_u$

$$\dot{q}_{cd} = \dot{m}_{r,c}(h_2 - h_3) \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{q}_u = \dot{m}_u \cdot C_{p,u}(T_{u,out} - T_{u,in}) \dots\dots\dots (5)$$

(3)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$COP = \frac{\dot{q}_{cd}}{P_{comp}} = \frac{\dot{q}_u}{P_{R,comp}} \dots\dots\dots (6)$$

(6)식에 (1)식과 (4)식을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$COP = \frac{\dot{q}_{cd}}{P_{comp}} = \frac{\dot{m}_{r,c}(h_2 - h_3)}{\dot{m}_{r,c}(h_2 - h_1)/\eta_{motor}} = \frac{[(h_1 - h_4) + (h_2 - h_1)]}{(1/\eta_{motor})(h_2 - h_1)} = \left[\frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} + 1\right] \cdot \eta_{motor} \dots\dots\dots (7)$$

(6)식에 (2)식과 (5)식을 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있으며, 압축기 소모 전력을 측정하는 경우 실험적으로 분석하는 데 유용한 수식이 된다.

$$COP = \frac{\dot{q}_w}{P_{R, comp}} = [\dot{m}_w \cdot C_{P_w} \cdot (T_{w, out} - T_{w, in})] / [(h_2 - h_1) \cdot \left(\frac{\eta_{s, comp}}{60 v_c} \right) \cdot \left(\frac{\pi D_{pl}^2}{4} \right) \cdot D_p \cdot z_{pl} \cdot \frac{\eta_v}{\eta_{comp} \cdot \eta_{me}}] \dots\dots\dots (8)$$

(7)식에서 $(h_1 - h_4)$ 항은 증발기가 흡수하는 열량을 나타내며, 외기온이 높을 경우에는 과열부분인 $(h_{1'} - h_{1'})$ 이 외기온이 낮을 경우보다 크게 되어 $(h_1 - h_4)$ 항이 증가하기 때문에 COP가 증가하게 된다.

또한 (7)식에서 $(h_2 - h_3)$ 는 응축기가 방출하는 열량을 나타내며, AVACTHE를 설치하는 경우에는 과냉부분인 $(h_{3'} - h_{3'})$ 항이 설치하지 않을 경우보다 크게 되어 $(h_2 - h_3)$ 항이 증가하기 때문에 COP가 증가하게 된다. (그림 1)

결과적으로 COP는 외기온과 본 연구에서 고안한 AVACTHE라는 열교환기에 영향을 받게 될 것으로 예측되며, 본 연구에서 이를 실증하려 하였다.

여기서 ;

- COP : Coefficient of performance.
- P_{COMP} : shaft power of compressor(ps)
- $P_{R, COMP}$: Electric power consumption of compressor (kW)
- $\dot{m}_{r, c}$: mass flow rate of refrigerant in the condenser(kg/sec)
- \dot{m}_w : mass flow rate of water(kg/sec)
- h_1 : Enthalpy of refrigerant at compressor inlet (kJ/kg)
- h_2 : Enthalpy of refrigerant at condenser inlet (kJ/kg)
- h_3 : Enthalpy of refrigerant at condenser outlet (kJ/kg)
- h_4 : Enthalpy of refrigerant at evaporator inlet (kJ/kg)
- \dot{q}_{cd} : Heat transfer from condenser(kJ/sec)

- \dot{q}_w : Heat gain from the water circulating in condenser(kJ/sec)
- $\eta_{s, comp}$: compressor motor speed(RPM)
- D_{pl} : Compressor displacement(m)
- ρ_g : Density of refrigerant in vapor phase(kg/m³)
- Z_{pl} : Number of cylinder(or piston)
- η_v : Volumetric efficiency of compressor
- η_{isen} : Isoentropic(or compressor) efficiency (=0.72, Rice & Eischer)
- η_{comp} : compression efficiency
- η_{me} : Mechanical efficiency
- η_{motor} : Motor efficiency
- V_c : Swept volume of compressor cylinder(m³)
- $T_{w, in}$: Temperature of circulating water at condenser inlet(K)
- $T_{w, out}$: Temperature of circulating water at condenser outlet(K)
- C_{P_w} : Specific heat of water(kJ/kg · K)

3. 실험장치 및 방법

가. 실험장치

본 연구에서 사용한 복합형 열펌프의 회로와 실험장치는 그림 2와 같다.

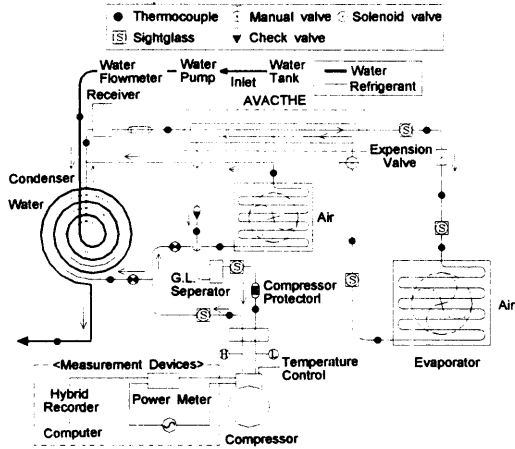


Fig. 2 Combined heat pump circuit and the experimental apparatus.

Table 1 Combination of experimental variables.

Heat source-heat transfer fluid	Air to Water	Air to Air	Air to Water	Air to Air
Type of loop system	Opened loop system		Closed loop system	
Heat exchanger	AVACTHE	Bypass	AVACTHE	Bypass
Item				
Ambient temp.(°C)	-15 ~ 15	-15 ~ 15	-15 ~ 15	-15 ~ 15
Water flow rate (ℓ/hr)	100, 150, 200, 300	100, 150, 200, 300	100, 150, 200, 300	100, 150, 200, 300
Air flow rate (m ³ /hr)	980.2(1154.04kg/hr) 1239.9(1459.81kg/hr) 1357.1(1597.8 kg/hr)	980.2 1239.9 1357.1	980.2 1239.9 1357.1	980.2 1239.9 1357.1

Table 2 Measuring items

Measuring items.
Ambient air temperature
Condenser inlet and outlet temp.
Water or air temperature at the condenser inlet and outlet
Electric power consumption of the heat pump compressor
High and low pressure of R ₂₂ circuit
Evaporator inlet and outlet temperature of R ₂₂ .

열펌프로 공기와 물을 선택적으로 가열 이용하기 위하여 공기-공기/공기-물의 복합형 열펌프를 구성하였으며, -5°C 이하 기온에도 열펌프의 성능계수(COP)가 급격하게 낮아지지 않도록 하기 위하여 열펌프 회로 내에 AVACTHE를 고안 설치하였다.

나. 실험방법

본 실험은 1999년 1월 4일부터 4월 10일까지 충청북도 청주에서 시행하였으며, 실험기간중 외기온은 -15~15°C로 변화하였으며, 외기온 변화에 따른 복합 열펌프 시스템의 성능분석을 위한 실험 변수 조합은 표 1과 같이 하였다.

측정항목은 표 2와 같이 하여 각 점의 온도는 Hybrid recorder로, 소모전력은 Wattmeter로 측정시간 간격을 1분으로 자동 기록되도록 하였다.

4. 결과 및 고찰

대기중에 잠재되어 있는 비교적 낮은 온도의 자

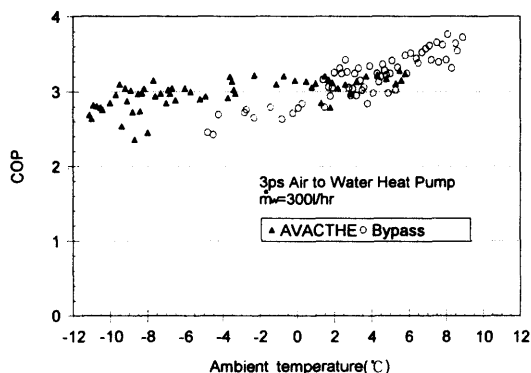


Fig. 3 AVACTHE effect on the COP of air-water heat pump.

연열에너지로 열원으로 하는 공기-물과 공기-공기의 형태로 된 복합 열펌프 시스템의 외기온 변화에 따른 성능특성을 실험적으로 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 외기온이 낮은 경우 AVACTHE가 공기-물 열펌프의 성능 특성에 미치는 영향

그림 3은 외기온 변화에 따른 공기 대 물 열펌프(3PS)의 개방회로에서의 성능 특성을 나타낸 것이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 외기온이 -11°C에서 8°C로 증가함에 따라 성능계수는 2.5에서 3.8 수준으로 증가하였으며, 외기온이 -11~0°C인 범위에서는 AVACTHE를 설치한 경우가 AVACTHE를 설치하지 않은 Bypass 경우보다 성능계수가 높게 나타났으나, 외기온이 0~8°C 범위로 영상인

경우에는 Bypass의 경우가 AVACTHE를 설치 한 경우보다 성능계수가 높게 나타났다.

이와 같은 결과는 외기온이 낮은 경우에 증발기에서 오는 저온냉매와 응축기에서 오는 고온 냉매가 AVACTHE에서 열교환을 하므로써 얻어지는 바람직한 결과로 판단된다.

나. 열전달 매체의 회로 형태(개방계 또는 폐쇄계)가 공기-물 열펌프의 성능에 미치는 영향

그림 4는 공기-물 형태의 3마력 규모의 열펌프에서 열매체 순환을 개방과 밀폐 회로로 하는 경우 외기온에 따른 열펌프의 성능 변화 특성과 응축기에서 흡수하는 열에너지 변화수준을 나타낸 것이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 개방계에서의 성능계수는 외기온이 -5℃에서 6℃까지 상승함에 따라 2.5에서 3.4까지 증가하였으며, 폐쇄계에서의 성능계수는 외기온이 -5℃에서 5℃까지 상승함에 따라 1.0과 2.0 사이에서 증가하는 경향을 보이므로써 폐쇄계의 COP는 개방계의 COP에 40~58% 정도로 낮게 나타났다.

개방계에서의 흡수 열량은 외기온이 -5℃에서 6℃로 상승함에 따라 7,000kcal/hr에서 8,500kcal/hr로 증가하였으며, 폐쇄계에서는 외기온이 -5℃에서 5℃로 상승함에 따라 2,500kcal/hr에서 5,000kcal/hr로 증가하였다. 개방계에서의 성능계수는 밀폐계에서 보다 1.4~1.5 높게 나타났으며, 개방계

에서의 흡수열량은 폐쇄계에서보다 3,500~4,500 kcal/hr 크게 나타났다.

이상과 같은 결과는 개방계의 순환 열매체(물)의 응축기 입구온도가 밀폐계에서의 응축기 입구온도보다 낮아서 개방계에서의 응축기 입·출구 온도차가 밀폐계의 응축기 온도차보다 크기 때문인 것으로 판단된다.

밀폐계에서 성능계수를 높이기 위해서는 응축기 내를 흐르는 열매체(물)의 입·출구 온도차를 크게 하는 것이 중요하다.

그리고 외기온이 낮을 때보다 높을 때 증발기내 냉매 증발량이 크기 때문에 외기온 상승은 흡수열량을 증가시키며, 성능계수는 외기온이 상승함에 따라 높아지는 현상을 보였다.

다. 중간형 밀폐계에서 외기온이 공기-공기 열펌프의 성능에 미치는 영향

공기-공기 열펌프를 온실내에서 실온을 가열하는 경우 가열되고 있는 온실내 공기를 계속해서 가열해 가기 때문에 외형상으로는 밀폐계의 가열과정으로 판단할 수 있으나, 얇은 피복재와 틈새로의 열 손실이 많고 실내공간이 크다는 관점에서 개방계로 볼 수도 있다. 그러므로 본 연구에서는 온실내 공기 가열과정을 중간형 밀폐계로 정의하였다.

그림 5는 중간형 밀폐계로 정의한 온실난방 실험에서 공기-공기 열펌프의 방출열량과 성능계수에 대한 외기온의 영향을 실험적으로 분석한 결과이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 외기온이 -1.5℃이하에서는 AVACTHE로, 외기온이 -1.5℃ 보다 높을 경우에는 Bypass로 열펌프를 가동하였다. 외기온이 -7℃에서 -1.5℃까지 상승함에 따라 COP는 2.8에서 3.0까지 상승하였고 이때 방출열량은 6,200kcal/hr에서 6,500kcal/hr 수준을 유지하였으며, 외기온이 -1.5℃에서 5℃까지 상승함에 따라 COP는 3.0에서 3.6까지 상승하였으나 이때 방출열량은 5,500kcal/hr에서 6,600kcal/hr으로 상승하는 결과를 보였다.

이 그림에서 보는 바와 같이 외기온이 -7℃에서 5℃까지 상승함에 따라 COP는 2.8에서 3.6까지 상승하였으나, 방출열량은 COP에서와 같이 외기온 상승에 비례하여 증가하기 보다는 외기온에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

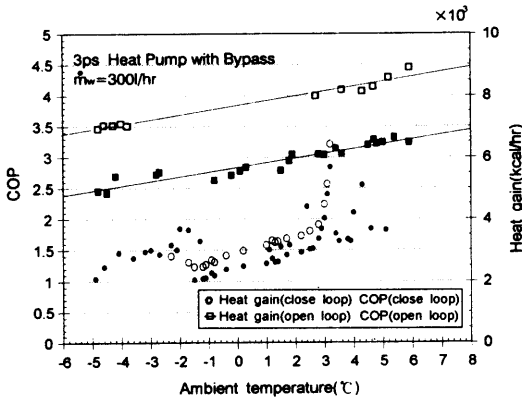


Fig. 4 The COP variation of air-water heat pump with the water circuit mode (close or open loop).

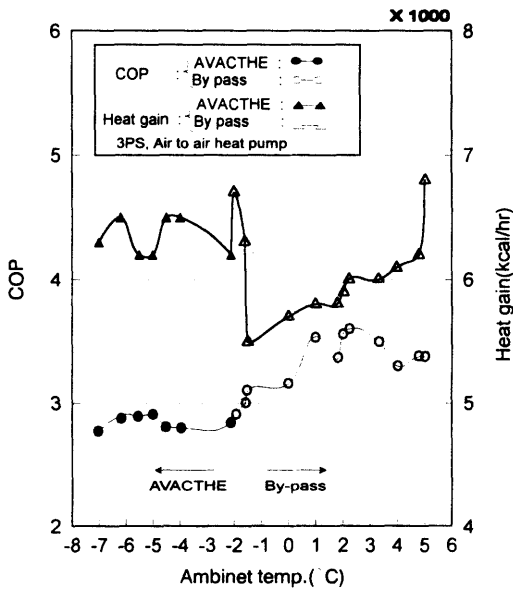


Fig. 5 The variation of the heat gain and the COP of air to air heat pump with ambient temperature.

이 결과는 외기온 상승에 따라 열펌프가 소비하는 전력량이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

공기-물과 공기-공기의 복합형태로 구성된 열펌프 시스템을 각각의 형태별로 개방계와 밀폐계에서 작동시킬 경우 외기온이 그 성능 특성에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

가. COP에 대한 이론식 (7)에서 $(h_1 - h_4)$ 항은 외기온과의 함수 관계를 가지며, $(h_2 - h_3)$ 항은 AVACTHE 유무와 함수관계를 갖는 것을 이론적으로 분석할 수 있었다. 다시 말해서 COP는 외기온 변화와 AVACTHE 유무에 의하여 지배됨을 알 수 있었다.

나. 공기-물 형태에서 AVACTHE를 사용하지 않는 경우, 외기온이 10°C에서 -5°C까지 낮아짐에 따라 COP가 급격히 낮아졌으나, AVACTHE를 사용하므로써 외기온이 -11~-5°C로 비교적 낮은 경우에도 COP를 2.8~3.0으로 유지하면서 외기온 강하에 따른 COP의 급락 현상을 완화 하였다.

다. 공기-물 형태의 열펌프에서 AVACTHE를 사용하는 경우 밀폐계에서의 COP는 개방계의 COP에 40~58% 이었다.

라. 공기-공기 형태의 열펌프에서 외기온 수준에 따라 AVACTHE와 Bypass를 바꾸어 사용하는 중간형 밀폐계에서, 외기온이 -7.0~-1.5°C 수준인 경우 AVACTHE를 사용하므로써 COP에 대한 외기온의 영향을 완화시켰으며, 외기온이 -1.5~5°C 수준에서 Bypass를 사용하므로써 외기온 상승에 따른 COP 증가효과를 얻을 수 있었다.

REFERENCES

1. Falls, R. S. and J. K. Parker. 1990. A Variable-Speed Ground-Source Heat Pump. ASHRAE Trans. 94:1588-1596
2. Rice, C. K. 1992. Benchmark Performance Analysis of an ECM-Modulated Air-to-Air Heat Pump with a Reciprocating Compressor. ASHRAE Trans. 430-450.
3. Stefanuk, N. B. M. 1990. Modeling and Simulation of a Water-to-Water Heat Pump incorporating Superheat Control. M.A.Sc. Thesis, University of Waterloo, Ontario Canada.
4. Rhee, K. J. and H. K. Song. 1999. Effect of the Heat Exchange between low and high Temperature Refrigerant on the Heat Pump Performance, Journal of KSAM 24(4):343-350, Korea.
5. Kim, H. C. and H. K. Song. 1999. Ondol Heating System Using Heat Pump. Journal of KSAM 24(4):351-358, Korea.