

열펌프 성능향상을 위한 공기 열교환기 특성

Characteristics of the Air Heat Exchanger for the Improvement of the Heat Pump COP

노정근* 송현갑* 박용규**
정회원 정회원 정회원

1. 서론

화석에너지 절약방법으로 자연에너지, 특히 외기 공기 중에 잠재되어있는 저온 열에너지를 열원으로 하는 냉난방 겸용 열펌프 시스템의 실용화 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 열원으로 이용되고 있는 외기 공기온도가 영하로 강하함에 따라, 증발기에서 저온 열에너지의 흡수저하로 인해 가열 목적 열펌프 시스템의 성능이 급속히 떨어질 뿐만 아니라, 압축기 입구에서 냉매온도가 급격히 저하됨에 따라 압축에 무리가 오게 된다. 또한 겨울철 눈으로 인한 공기 중 수분증가로 증발기에 성애가 자주 형성되어 제상의 어려움이 있게 된다. 이와 같은 현상은 열공급량을 감소시키기 때문에 난방부하를 감당할 수 없게 되어 저온 열원으로서의 공기 대 공기 또는 공기 대 물 열펌프를 극한 추위에서는 사용할 수 없게 된다.

열펌프 시스템은 응축기에서 얻은 열에너지를 난방에 사용하게 되는데 그중 일부는 남아서 응축기로 다시 회귀하게 된다. 이와 같은 잉여에너지는 응축기의 기능을 저하시키는 역할을 할 뿐, 열펌프 성능향상에 도움이 되지 않는다. 또한 냉매 순환 회로 내에서도 응축기의 잉여 열을 회수하고, 압축기 입구에서의 냉매온도를 높여 압축기의 작동을 원활하게 하기 위하여 AVACTHE (Automatic Variable Area Capillary Type Heat Exchanger)를 설치하였으나, 이 요소를 지난 후에도 잔여 열이 있게 된다. 실내의 상부측에 있는 난방에너지와 냉매 내에 남아있는 잔여 열을 증발기 쪽으로 보내어 재 흡수시키면, 증발기 내를 흐르는 냉매의 증발효과를 높여 냉 공기로부터 열흡수를 증진할 뿐만 아니라, 겨울철 열교환기 증발기 표면의 성애를 제거하는 효과도 얻게 된다. 하지만 잉여에너지를 재흡수 이용하기 위해서는 새로운 시스템의 개발이 선행되어야 한다. 그러나 이와 관련된 연구가 일부 이루어지고 있으나, 연구 결과가 미진한 실정이다.

따라서, 본 연구의 목적은 냉온 공기 열교환기(Heat Exchanger for the Evaporator, 이하 HEEVA라 한다) 개발을 통하여, 열펌프 성능향상을 공기 열교환기의 특성을 분석하고, 성능향상 실용화 열펌프 시스템을 개발하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 이론분석

* 충북대학교 농업기계공학과

** 충북대학교 대학원 농업기계공학과

(1) 전열량과 총합열전달계수

그림 1의 HEEVA에 대한 이론치와 실험치의 전열량을 식 (1)과 식 (2)로 나타내었으며, 총합열전달계수는 식 (3)으로 표현하였다.

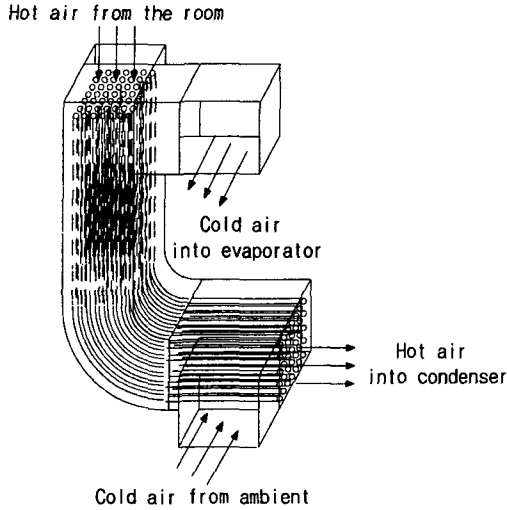


Fig. 1. Two-stream counterflow.

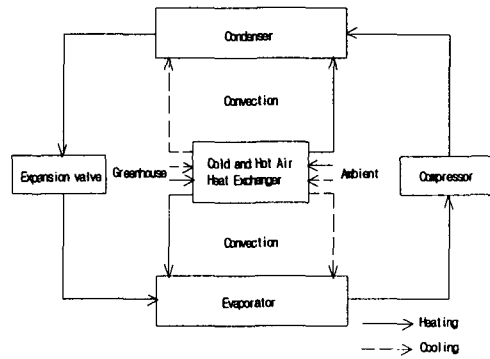


Fig. 2. Block diagram of heat pump.

$$\dot{Q}_{the} = U A_T \Delta T_{LMTD} \quad \text{----- (1)}$$

$$\dot{Q}_{exp} = \dot{m}_H C_{p,H} (T_{H,inlet} - T_{H,outlet}) = \dot{m}_C C_{p,C} (T_{C,outlet} - T_{C,inlet}) \quad \text{----- (2)}$$

$$U = \frac{\dot{Q}_{exp}}{A_T \Delta T_{LMTD}} \quad \text{----- (3)}$$

(2) 대류 열전달 계수

HEEVA 더운 공기의 열전달 계수를 구하기 위하여 식 (4)를 사용하였으며, 여기서 Nusselts수는 Petukhov 상관식 식 (5)를 이용하였다.

$$h_H = \frac{\overline{Nu}_D k}{D} \quad \text{----- (4)} \quad \overline{Nu}_H = \frac{(f/8) Re_D Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{-- (5)}$$

HEEVA 찬 공기의 대류열전달 계수는 식 (6)을 사용하였으며, 여기서 Nusselt수는 식 (7)을 이용하였다.

$$h_C = \frac{\overline{Nu}_D k}{D_h} \quad \text{----- (6)} \quad \overline{Nu}_C = 3.66 \quad \text{----- (7)}$$

(3) 총합열전달계수

HEEVA에서 더운 공기와 차가운 공기 간 열교환기의 총합열전달 계수를 구하기 위해 식 (8)를 사용하였다.

$$U = \frac{h_c h_H}{h_c + h_H} \text{-----}(8)$$

Table 1. Specifications of the air to air heat pump system

Item	Specification
Compressor	reciprocating(3PS)
Condenser	cross-flow staggered tube heat exchanger finned with both fluids unmixed
Expansion valve	TEV(thermostatic expansion valve)
Evaporator	cross-flow staggered tube heat exchanger finned with both fluids unmixed
AVACTHE	automatic variable area capillary type heat exchanger
Refrigerant	R ₂₂ (CHCLF ₂)

Table 2. Specification of HEEVA

Material	Copper
Heat exchanger size (mm)	200×1900×360
Number of tubes (ea)	8×13
Tube diameter (mm)	20
Tube thickness (mm)	1
Longitudinal tube pitch (mm)	25
Transverse tube pitch (mm)	25
Transverse plane (mm)	5

나. 실험장치

(1) 열펌프 시스템

본 실험에 사용된 공기 대 공기 열펌프 시스템의 압축기는 밀폐형 왕복동식 3마력이고, 응축기와 증발기는 직교류 열교환기로서 냉매와 공기 두 유체가 비혼합되는 환이 있는 열교환기를 사용하였다. 또한 낮은 외기온에서의 성능 저하를 막기 위해 증발기 출구와 응축기 출구사이에 AVACTHE (Automatic Variable Area Capillary Type Heat Exchanger)를 설치하였고, 냉매는 R₂₂(CHCLF₂)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 열펌프 시스템의 사양은 표 1과 같다.

(2) HEEVA

본 실험에 사용한 HEEVA의 개략도는 그림 1과 같으며, 외부커버는 스테인레스로 제작하였고, 튜브는 지름 20mm, 두께 1mm의 동관으로 제작하였으며, 대향류 정렬배열의 튜브 군으로 가로 8배열, 세로 13배열로 구성되어 있다. 주위로의 열손실을 막기 위해 단열을 하였으며, HEEVA on/off 실험을 위해 튜브관군이 없는 더운 공기 덕트를 함께 제작하여 실험을 수행하였다. HEEVA의 사양은 표 2와 같다.

열전달 흐름 블록선도는 그림 2와 같으며, 찬 공기는 실내공기가 지나는 튜브군을 통과하여 가열된 후 열펌프의 증발기에 유입되어 증발기의 냉매증발을 활성화하여 열펌프의 성능을 향상시키고, 성에방지와 제거의 역할을 한다. 튜브군을 통해 열교환된 실내의 더운 공기는 열펌프의 응축기에 유입되며, 잉여에너지로서 다시 HEEVA로 귀환하여 찬 공기에 열량을 공급한다.

다. 실험방법

본 실험은 2001년 1월 12일부터 2001년 4월 28일까지 충청북도 청주시 충북대학교 농과대학에서 수행하였으며, 실험기간중 외기온은 $-5^{\circ}\text{C} \sim 28^{\circ}\text{C}$ 이었고, 외기온의 인위적 조절 없이 실험을 수행하였다. 실험조건으로 열펌프를 bypass로 작동하였고, HEEVA를 on/off 하여 실험을 수행하였으며, HEEVA의 성능분석을 위해 HEEVA 입출구 공기온도를 측정하여 찬공기와 더운 공기간의 전열량 분석과 HEEVA의 효율을 분석하였다.

난방시 HEEVA에 의한 열펌프 성능특성 분석을 위하여 외기온과 더운 공기의 온도에 따라 응축기 출구의 공기풍량을 $542 \sim 747 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 변환시켜가며 실험하였다. 그리고 응축기·증발기 공기 토출 온도를 측정하고, 소비전력은 전력계로 측정하여 열펌프의 성능계수를 분석할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 냉운 공기 열교환기(HEEVA) 성능분석

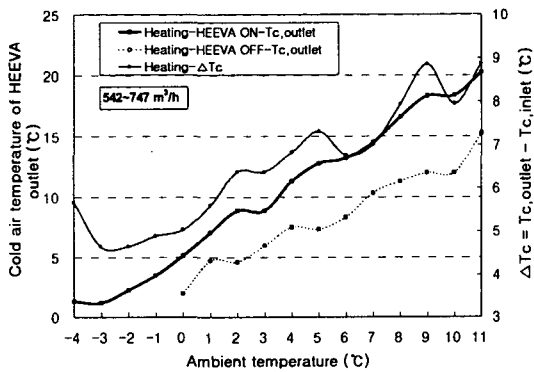


Fig. 3. The outlet temperature variation of cold air from the HEEVA with ambient temperature in case of heating.

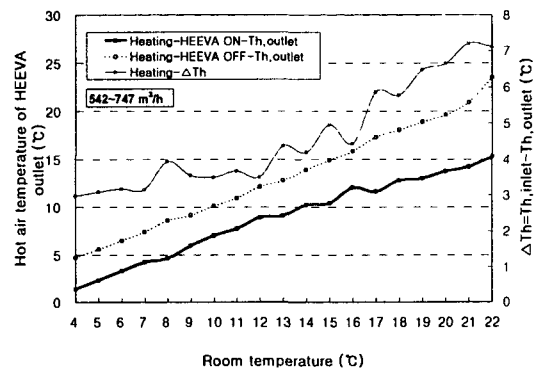


Fig. 4. The outlet temperature variation of hot air from the HEEVA with room temperature in case of heating.

(1) 난방시 HEEVA 입출구 공기온도변화

그림 3은 외기온이 $-4 \sim 11^{\circ}\text{C}$ 로 변할 때 HEEVA의 작동 유무에 따른 찬공기 출구의 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 외기온의 증가에 따른 HEEVA 찬 공기 입출구 온도차 변화는 $4.5 \sim 9^{\circ}\text{C}$ 정도로 증가하였고, 외기온이 $0 \sim 11^{\circ}\text{C}$ 일때 HEEVA에 의한 영향으로 $2 \sim 6^{\circ}\text{C}$ 정도 상승된 공기가 증발기 입구로 유입되는 것으로 나타났다.

그림 4는 Room온도가 $4^{\circ}\text{C} \sim 22^{\circ}\text{C}$ 로 변할 때 HEEVA의 작동유무에 따른 HEEVA 더운 공기 출구의 온도변화를 보여 주고 있다. Room온도가 상승함에 따라 HEEVA 더운 공기 입출구 온도차는 $3 \sim 7^{\circ}\text{C}$ 정도로 증가하였고, HEEVA에 의한 영향으로 응축기 입구 공기온도가 $3 \sim 8^{\circ}\text{C}$ 낮게 유입되는 것으로 나타났다.

(2) 찬 공기와 더운 공기간의 전열량과 HEEVA 효율

그림 5는 HEEVA에서 더운 공기 공급열량에 따른 찬 공기에 실제 전달된 열량과 HEEVA의 효율을 나타낸 것이다. HEEVA에서 열교환을 하여 얻은 열전달매체(공기)의 입출구온도, 풍량을 측정하여 (2)식에 대입하여 얻은 결과이다. 풍량 346m³/h의 찬 공기가 받은 열량과 풍량 747m³/h의 더운 공기가 준 열량간의 차는 50~150kcal/hr로 나타났으며, HEEVA 효율은 더운 공기가 준열량과 찬 공기의 비율로서 83~98% 정도로 나타나 평균 91% 정도의 효율을 보였다. HEEVA 설계시 가정으로서 주위로의 열량손실과 불결계수를 고려하지 않았으나, 실험상 주위로의 열량 손실과 냉은 공기 열교환기 자체의 불결계수를 고려한다면 공기-공기 HEEVA로서 설계상의 목적에 부합한 것으로 나타났다.

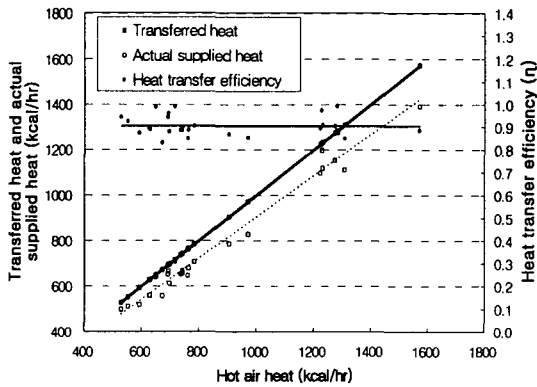


Fig. 5. Transferred heat, actual supplied heat and heat transfer efficiency with the heat in the air.

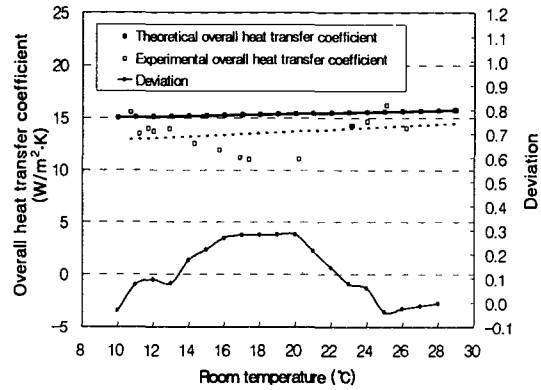


Fig. 6. Comparison between theoretical and experimental overall heat transfer coefficient with room temperature.

(3) HEEVA의 총합열전달계수

그림 6은 더운 공기의 온도변화에 따른 이론상(8)식과 실험상(3)식의 총합열전달계수와 그 편차를 나타낸 것이다. 찬 공기의 경우 속도는 2m/s, 수력지름 0.005m이었으며, 더운 공기의 경우 속도는 6.34m/s, 지름 0.02m로서 공기온도 8~30℃에서 이론값이 실험값보다 1~3W/m²K 크게 나타났으며, 편차는 10% 내·외를 나타냈다. 이것은 Nusselt수를 구하기 위한 Petukhov상관식의 자체오차 15%에 비해 크지 않은 오차범주에 속한다고 사료되며, 이론상의 총합열전달계수 유도식의 타당성을 입증한 것이라 하겠다. 편차의 원인으로서 HEEVA의 효율에 의한 열량차이로 인해 실험상의 총합열전달계수 값이 저하된 주원인이라 판단된다.

나. 난방시 냉은 열교환기(HEEVA)에 의한 열펌프 성능특성

(1) 열펌프의 난방 COP 변화

그림 7은 외기온이 -5~5℃로 변할 때 난방시 HEEVA의 작동유무에 따른 COP변화를 보

여 주고 있다. 난방시 HEEVA가 작동할 때 외기온이 증가함에 따라 COP가 2.9~3.6정도로 증가하여 나타났으며, HEEVA를 작동하지 않을 때 COP가 2.6~3.1정도를 보였다. 즉, HEEVA가 작동할 때가 0.3~0.5정도 높은 결과를 보였다. 저온의 외기온하에서 COP의 감소는 증발기측에서 열흡수율이 낮기 때문이며, 난방시 HEEVA를 작동하여 증발기 유입 찬 공기의 온도를 상승시켜 냉매의 증발효과를 통한 압축기 소비전력 감소가 COP를 향상시킨 것으로 나타났다.

(2) 열펌프의 응축기 출구 공기토출온도 변화

그림 8은 외기온이 -5~5℃로 변할 때 난방시 HEEVA의 작동유무에 따른 응축기 출구 공기토출온도를 보여 주고 있다. 풍량 542m³/h에서 HEEVA가 작동할 때 외기온이 증가함에 따라 공기토출온도가 29~57℃ 정도로 증가하는 것으로 나타났으며, 외기온 -3~1℃에서 공기토출온도가 2~3℃ 정도 낮은 결과를 보여 응축기출구 더운 공기의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 난방시 더운 공기가 찬 공기에 열량을 주어 응축기출구 더운 공기온도가 하강하였으나, 응축기측에서 더운 공기의 입·출구 온도차 상승폭이 HEEVA가 작동하지 않을 때 보다 크게 나타남으로서 응축효과가 상승하여 COP가 상승한 것으로 나타났다.

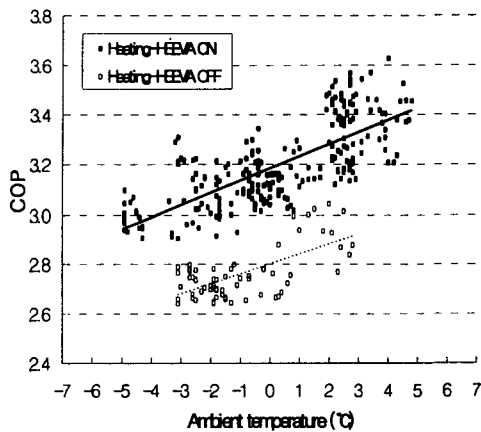


Fig. 7. COP variation with ambient temperature in case of heating.

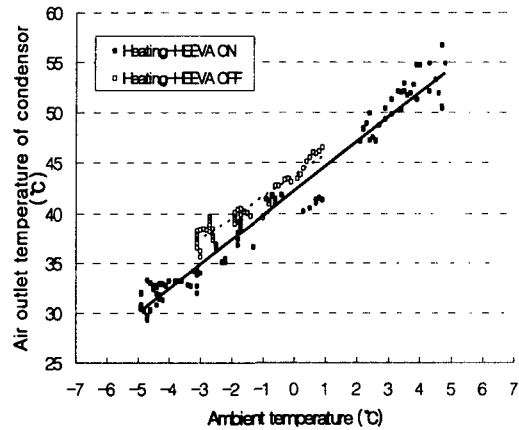


Fig. 8. Air outlet temperature variation in the condenser with ambient temperature in case of heating.

5. 요약 및 결론

화석에너지에 대한 경제적 부담과 환경오염문제를 줄이기 위하여 열펌프의 성능계수향상을 위하여 냉온 공기열교환기(HEEVA)를 고안하였고, 이 열교환기의 열특성과 성능계수향상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 냉·난방 실험을 수행하였다. HEEVA에 의한 찬 공기와 더운 공기의 온도변화, 전열량 및 냉온 공기열교환기 효율, 총열전달계수등을 측정분석하였고, 냉난방시 외기온에 따른 열펌프의 성능계수, 소비전력, 응축기·증발기 출구 공기토출 온도 변화를 측정 분석함으로써 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 외기온이 -4~11℃로 변할 때 열펌프의 난방과정에서 HEEVA 찬공기 입출구 온도차는

- 4.5℃에서9.0℃로 증가하였으며, HEEVA에 의한 영향으로 2~6℃ 상승된 공기가 증발기 입구로 유입되어 냉매증발을 촉진하였다.
2. 실온이 4~22℃일 때 HEEVA 더운공기 입출구 온도차는3℃에서7℃로 증가하였으며, 응축기에 유입되는 공기온도를 3~8℃ 낮게 함으로서 압축기 소모전력을 감소시켜 COP 상승 효과를 나타냈다.
3. 외기온과 실온변화에 따라 풍량 346m³/hr의 찬 공기가 받은 열량과 풍량 747m³/hr의 더운 공기가 준 열량간의 차는 50~150kcal/hr로 나타났으며, 더운 공기가 준열량과 찬 공기가 받은 열량의 비가 83~98% 이었으므로 HEEVA의 열교환율은 91% 을 보였다.
4. 총합열전달계수는 이론값이 실험값보다 1~3W/m²K 크게 나타났으며, 이 결과는 두 값 사이에 10% 내·외의 편차로서 Nusselt수를 구하기 위한 Petukhov상관식의 자체오차 15%에 비해 크지 않은 오차범주에 속하며, 이론상의 총합열전달계수 유도식의 타당성을 입증한 것이라 하겠다.
5. HEEVA를 작동함으로서 난방시 COP가 HEEVA를 작동하지 않았을 경우보다 0.3~0.5 향상된 것으로 나타났다. 이것은 HEEVA가 겨울철 난방에 효율을 높일수 있는 것으로 판단 된다.

5. 참고문헌

1. 김현철, (1999)열펌프를 이용한 온돌 시스템, 석사학위논문, 충북대학교 대학원.
2. 류제창, 이주배, 정규현, (1997)폐열회수 장치를 갖춘 축사용 입-배기 환풍기에 관한 연구, 건국대학교, 제1차년도 최종보고서.
3. 이상천, 조영우, 남상철, (1997)원통다관형 열교환기에서 배플인자가 열전달에 미치는 영향, 대한기계학회논문집(B) 제 21권 제 1호, pp. 185~194.
4. 정동운, (1999)습증기를 포함한 연소가스의 폐열회수를 위한 열교환기 성능예측, 석사학위 논문, 한국과학기술원.
5. 조명제, 이기우, 박병식, (1984)열교환기 전열면 선택 및 평가 방법에 관한 고찰, Energy R&D Vol.6, No. 2.
6. Bell, K. J., (1986)Delaware Method for Shell Side Design, Heat Exchanger Sourcebook, Hemisphere pub., pp. 140~162.
7. Pucci, P.f., and C.P., Howard, C.H, Jr., Piersall, (1967)The sing blow transient technique for compact heat exchanger surface, ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 89, pp 29~40.
8. Snyder, M. E., and M. P., Case, S. Johns, R., Caron, (1992) Performance of a Condensing Heat Exchanger System at Lake City Army Ammunition Plant, Independence, MO, AD-A256356.