

열펌프의 성능 최적화에 관한 연구

최 종민¹⁾, 윤 린²⁾, 김 용찬³⁾

Optimization of Heat Pump Systems

Jong Min Choi, Rin Yun, Yongchan Kim

Key words : Heat pump(열펌프), Expansion device(팽창장치), Charge amount(충전량), Capacity(용량), System matching(시스템 매칭)

Abstract : An expansion device plays an important role in optimizing the heat pumps by controlling refrigerant flow and balancing the system pressures. Conventional expansion devices are being gradually replaced with electronic expansion valves due to increasing focus on comfort, energy conservation, and application of a variable speed compressor. In addition, the amount of refrigerant charge in a heat pump is another primary parameter influencing system performance. In this study, the flow characteristics of the expansion devices are analyzed, and the effects of refrigerant charge amount on the performance of the heat pump are investigated at various operating conditions. Cooling capacity of the heat pump system is strongly dependent on load conditions. The heat pump system is very sensitive with a variation of refrigerant charge amount. But, the performance of it can be optimized by adjusting the flow rate through expansion device to maintain a constant superheat at all test conditions.

1. 서 론

전세계적으로 화석연료 매장량의 제한을 극복하고, 환경 오염을 해결하기 위하여 신·재생에너지 개발 및 이용의 필요성이 급증하고 있다. 신·재생에너지 사용 시스템 중에 지열원 열펌프는 현존하는 냉난방 방식 중에서 가장 효율이 높고 환경 친화적인 시스템으로 그 사용 및 기술 개발이 증가되고 있다.⁽¹⁾

지열원 열펌프는 열펌프 유닛과 지중열교환기로 구성된다. 열펌프 유닛은 압축기, 응축기, 증발기와 팽창장치로 구성되며, 지중열교환기를 통하여 열을 흡수 및 방출하여 냉·난방기능을 수행한다. 열펌프 유닛의 성능을 향상시키려면 각 구성품의 효율이 높아야하고 시스템을 구성하는 부품들이 서로 최적화되어야 하며, 적절한 냉매량을 시스템에 충전하여야 된다.⁽²⁾ 열펌프 유닛의 시스템 매칭 측면에서 팽창장치가 가장 중요한 기능을 수행하며, 팽창장치와 냉매 충전량 사이의 용량 매칭은 열펌프의 최적 설계 및 성능확보를 위한 핵심기술이다.

Choi and Kim⁽²⁾은 충전량 변화에 따른 냉매유량변화가 모세관을 갖는 시스템의 성능 변화에 가장 큰 영향을 준다는 연구 결과를 얻었다. Yavuzturk and Spitler⁽³⁾는 지열원 열펌프와 지

하수 열원 열펌프에 대한 동적 성능 분석에 관한 연구를 수행하였으며, Sohn et al.⁽⁴⁾은 지열원 열펌프와 공기열원 열펌프의 냉난방 성능을 비교 분석하였다. 하지만, 지금까지 수행된 대부분의 지열 열펌프 관련 연구는 지중 온도 변화 및 지중 열교환기를 중심으로 수행되었으며, 열펌프 유닛의 시스템 매칭 측면에서 가장 중요한 기능을 수행하는 팽창장치의 운전특성을 기반으로 냉매 충전량과 연계된 종합적 연구성과는 매우 부족한 실정이다.

본 논문에서는 지열원 열펌프의 핵심 구성품인 열펌프 유닛의 최적화와 신뢰성 향상을 위한 핵심 요소기기인 팽창장치의 유동 특성과 충전량 변화에 따른 열펌프 유닛의 성능 특성을 분석하여 지열 열펌프 시스템의 최적 설계를 위한 기반 기술을 확보하고자 한다.

- 1) 국립 한밭대학교 기계공학과
E-mail : jmchoi@hanbat.ac.kr
Tel : (042)821-1731 Fax : (042)821-1587
- 2) 국립 한밭대학교 기계공학과
E-mail : yunrin@hanbat.ac.kr
Tel : (042)821-1732 Fax : (042)821-1587
- 3) 고려대학교 기계공학과
E-mail : yongckim@korea.ac.kr
Tel : (02)3290-3366 Fax : (02)921-5439

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 팽창장치

Fig. 1은 팽창장치의 성능특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 시험부의 과냉도, 응축압력, 증발압력을 쉽게 조절할 수 있도록 구성하였다. 액체펌프를 이용하여 냉매유량 및 입구압력을 조절하였으며, 펌프의 입구와 시험부의 출구에 바이패스라인을 설치하여 정밀한 운전조건 형성 및 시스템 안정성을 확보하였다. 과냉도는 시험부 입구에 설치한 열교환기를 이용하여 조절하였다. 시험부에서 토출되는 2상 상태의 냉매는 칠러 및 펌프로 구성된 응축 열교환기를 통과하면서 냉각되어 액체펌프로 순환되도록 구성하였다. 냉매유량은 질량유량계를 액체펌프 출구에 설치하여 측정하였으며, 정확도는 측정치의 $\pm 0.2\%$ 이다. 시험부의 입·출구 온도와 압력은 각각 T형 열전대와 압력계를 이용하여 측정하였으며, 정확도는 각각 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 및 $\pm 6.9\text{ kPa}$ 이다. 팽창장치는 일반적으로 모세관, 오리피스, 온도감응팽창밸브, 전자팽창밸브가 있으나, 온도감응팽창밸브와 전자팽창밸브 내부에는 오리피스가 설치되어 있으므로, 본 연구에서는 모세관과 오리피스에 대한 성능 특성 실험을 통하여 팽창장치 유동 특성을 분석하였다. 모세관과 오리피스의 형상 및 실험조건은 일반적인 열펌프에 사용되는 범위⁽⁵⁾에 대하여 수행하였다.

2.2 열펌프 유닛

Fig. 2는 운전 조건 및 냉매 충전량을 변화시키면서 열펌프의 성능을 측정할 수 있는 실험장치의 개략도를 나타낸다. 열펌프 시스템은 R-22를 작동유체로 사용하며, 정격 냉방용량 3.5 kW를 갖도록 설계하였다. 열펌프는 스크롤 압축기, 2개의 이중관식 열교환기 및 팽창장치로 구성하였다. 팽창장치는 쾌적성 향상과 에너지 절약 측면에서 최근 사용이 증가되고 있는 전자팽창밸브를 사용하였다. 물을 증발기와 응축기의 2차 유체로 사용하였으며, 가변속 펌프와 항온조를 사용하여 응축기와 증발기의 부하를 조절하였다.

ARI⁽⁶⁾의 표준조건에서 최대의 COP를 나타내는 충전량을 표준충전량으로 선정하였으며, 표준 충전량의 -20% 부터 $+20\%$ 까지 충전량을 변화시키며 시스템의 성능을 측정하였다. 전자팽창밸브의 개도는 각 운전조건에서 시스템이 최대의 COP를 갖도록 조절하였다. 전자팽창밸브 시스템의 성능 비교를 위하여 모세관 시스템에 대해서도 동일한 조건에서 성능 실험을 실시하였다. ARI⁽⁶⁾ 규격을 기반으로 응축기 부하와 냉매 충전량을 변화시키면서 냉방용량을 측정하였다. 냉방능력의 불확실성은 3.1% 이내로 나타났다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 팽창장치 유동 특성

Fig. 3, 4는 각각 모세관과 오리피스에 대하여 응축압력의 변화에 따른 냉매유량의 변화를 나타낸다. 모세관과 오리피스 모두에서 냉매유량은 응축압력의 증가에 따라 거의 직선적으로 비

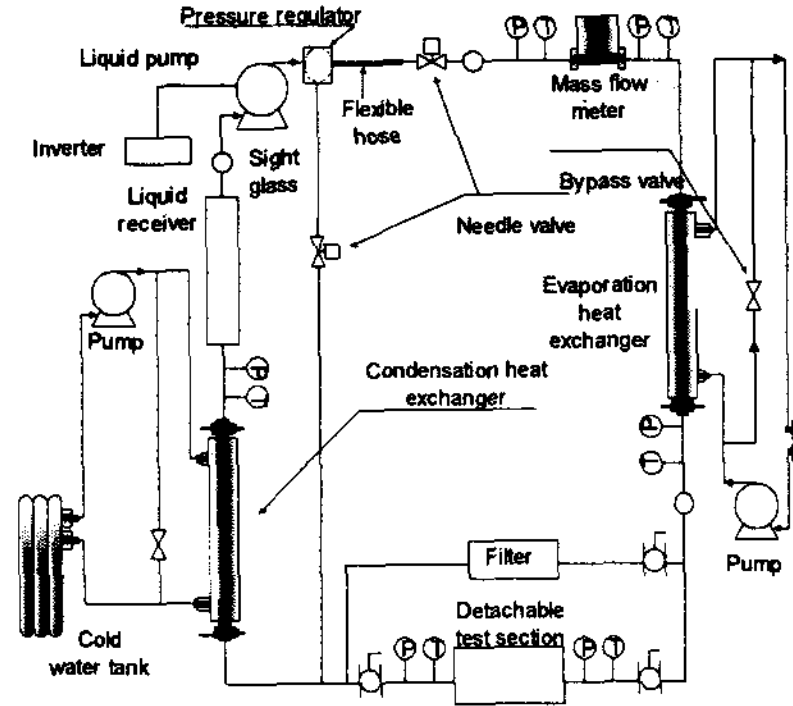


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for expansion device.

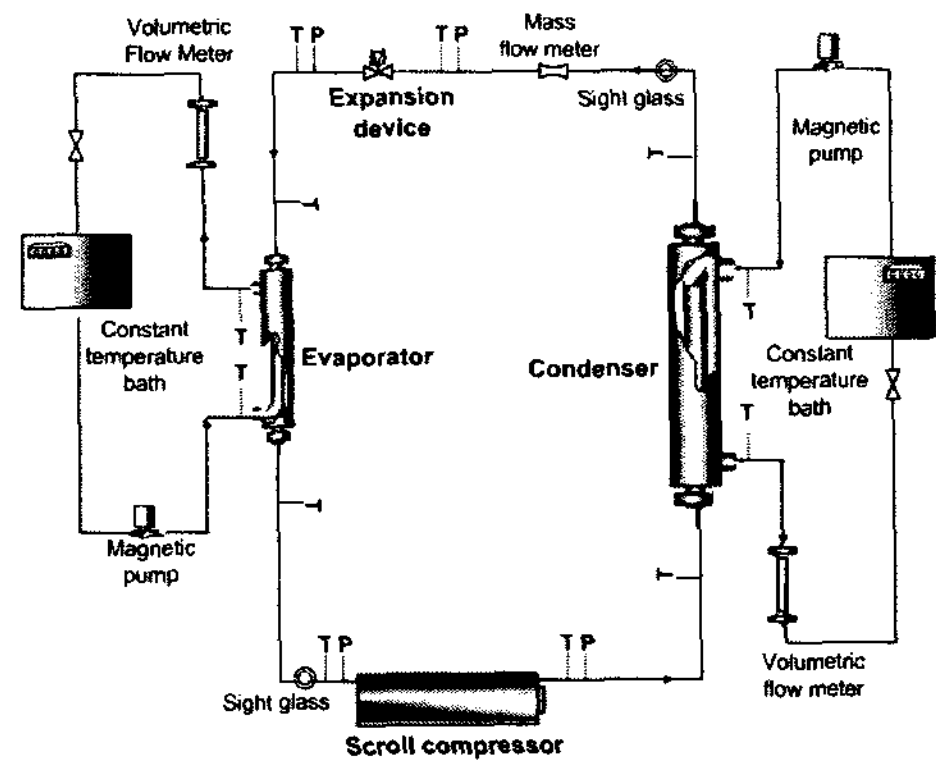


Fig. 2 Schematic diagram of the test setup for a water-to-water heat pump.

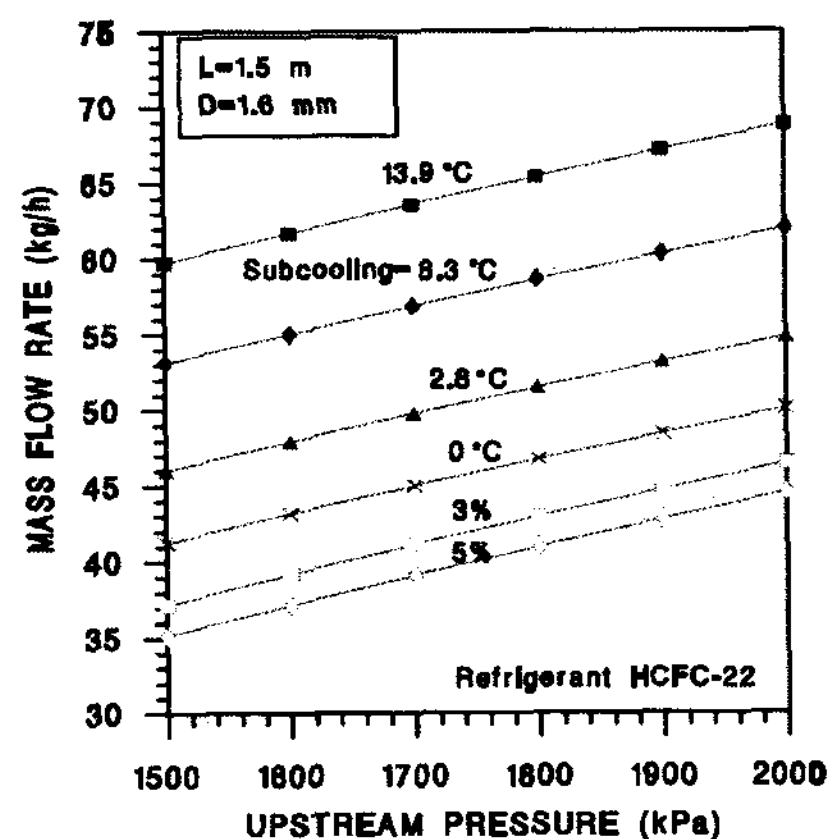


Fig. 3 Flow dependency on upstream pressure for a capillary tube.

례하였다. 응축압력이 증가함에 따라 밀도가 감소하지만, 팽창장치 내부의 단상영역 증가로 냉매 유량은 증가한다. 과냉도의 변화에 따라 모세

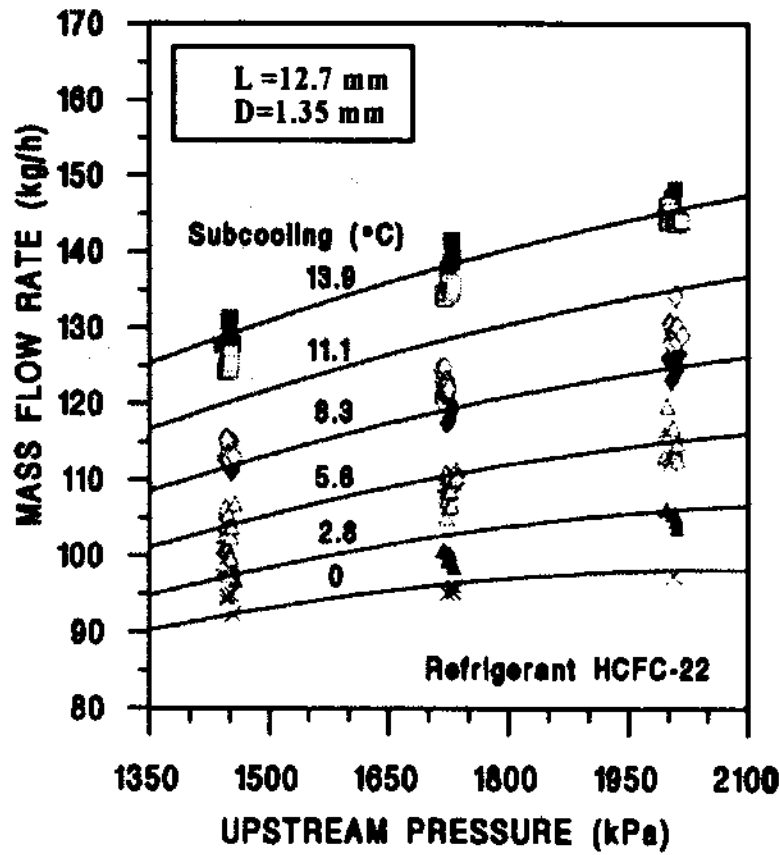


Fig. 4 Flow dependency on upstream pressure for a capillary tube.

관과 오리피스 모두 비슷한 경향을 나타냈으며, 과냉도가 증가함에 따라 냉매 유량은 증가하였다. 과냉도가 증가함에 따라 냉매의 비등점이 출구쪽으로 이동하여 팽창장치 내부의 단상 영역이 증가하고 밀도가 증가하여 냉매 유량이 응축압력 증가에 비하여 크게 증가한다. 모세관의 경우는 과냉도 증가에 따라 입구 영역에서의 압력강하율이 감소하고 출구영역에서의 압력강하율이 증가하지만, 오리피스의 경우는 과냉도 증가에 따라 입구영역에서의 압력강하율이 증가하고 출구 영역에서의 압력강하율이 감소한다. 이는 모세관의 경우는 관내부의 저항에 의한 압력강하로 냉매 유량이 결정되고, 오리피스의 경우는 입구 영역의 급격축소에 의한 압력강하로 냉매유량이 결정되기 때문이다.

3.2 열펌프의 충전량 변화에 따른 성능 특성

열펌프의 시스템 매칭은 팽창밸브가 증발기로 공급하는 냉매와 압축기가 증발기로부터 흡입할 수 있는 냉매의 유량평형을 통해 이루어진다. 두 장치 사이의 비평형이 발생할 경우 증발기가 드라이아웃(dryout)되거나 프러딩(flooding)이 발생하고, 성능이 저하되고 압축기가 손상된다. 일정한 냉매 충전량으로 최적의 팽창장치가 설계되었을 경우에도 운전조건 변화나 냉매 충전량이 변하면 팽창장치의 최적 형상이 변화된다. 따라서, 본 연구에서는 팽창장치 저항의 정밀 변화가 가능한 전자팽창밸브 시스템의 냉매 충전량 변화에 따른 성능 특성을 분석하고 팽창장치 저항이 일정한 모세관 시스템과 비교하였다.

Fig. 5는 모세관 시스템의 충전량 변화에 따른 냉방용량 변화를 나타낸다. 저충전량 영역에서 충전량 변화에 따른 용량 변화율이 과충전 영역에서의 변화율 보다 크게 나타났으며, 냉방용량은 응축기 입구 2차 유체의 온도 변화에 따라 민감하게 변화되었다. 응축기 입구 2차 유체의

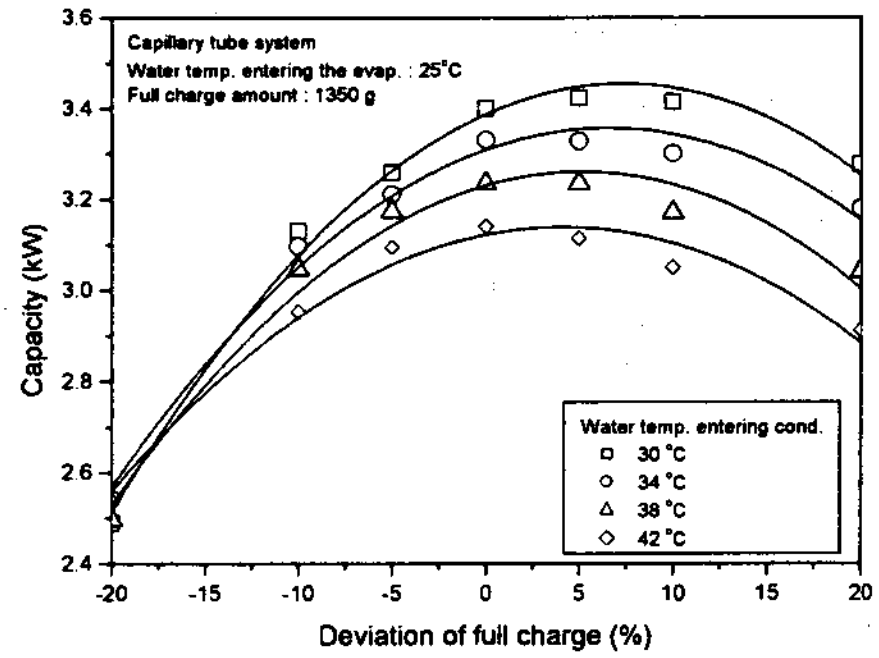


Fig. 5 Capacity variation of the capillary tube system according to refrigerant charge.

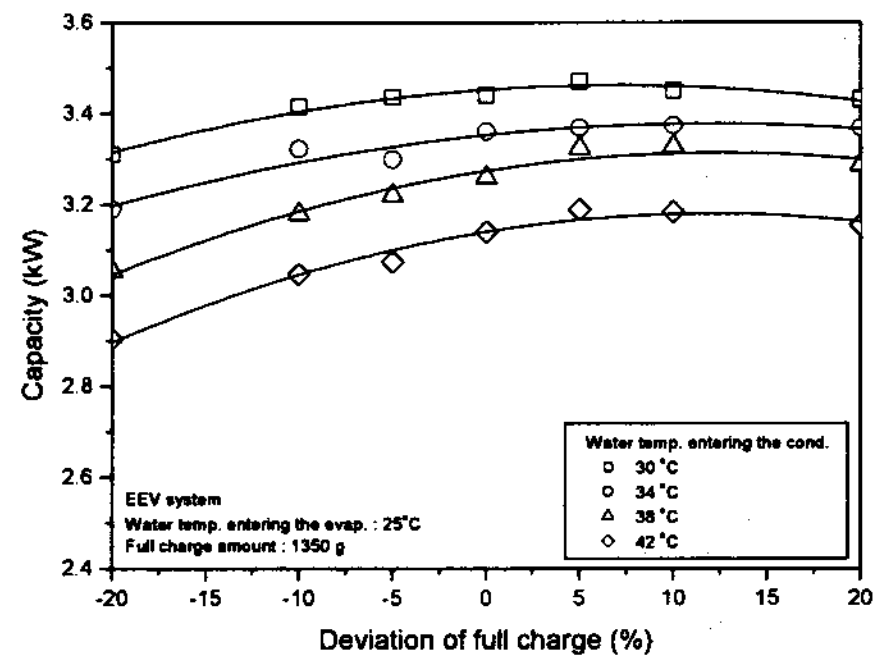


Fig. 6 Capacity variation of the EEV system according to refrigerant charge.

온도가 증가함에 따라 충전량 증가에 따른 용량 감소폭이 과충전 영역에서는 약간 증가하였으나, 저충전 영역에서는 감소하였다. 이는 모세관 시스템에서는 저충전 영역에서의 응축압력의 증가에 따른 용량변화가 과충전 영역에서의 용량 변화보다 커서 응축기 입구에서 2차 유체의 온도 증가에 따른 저충전 영역에서의 용량 감소폭이 과충전 영역에서의 용량 감소폭보다 작게 나타나기 때문이다.

Fig. 6은 전자팽창밸브 시스템의 충전량 변화에 따른 용량 변화를 나타낸다. 전자팽창밸브 시스템은 모세관시스템에 비하여 충전량 변화에 따른 냉방용량 변동 폭이 매우 작은 특성을 나타냈다. 모든 부하조건에서 냉매 충전량이 최적 충전량 대비 -10%에서 +20%까지 변하여도 용량 변화는 무시할 만큼 작게 나타났다. 냉매 충전량과는 달리 냉방용량은 응축기 입구의 2차 유체의 입구 온도 변화에 따라서는 크게 영향을 받았다.

모세관 시스템은 응축기 부하 증가시에 응축압력 및 증발압력이 증가하지만, 응축압력의 증가폭이 더 커서 냉매유량이 증가하여 압축기 입구 과열도가 감소하므로 증발 열교환기에서 최대의 열교환 효율을 유지하면서 습압축을 방지하기 위해서는 팽창밸브의 저항을 증가시켜야 한다.

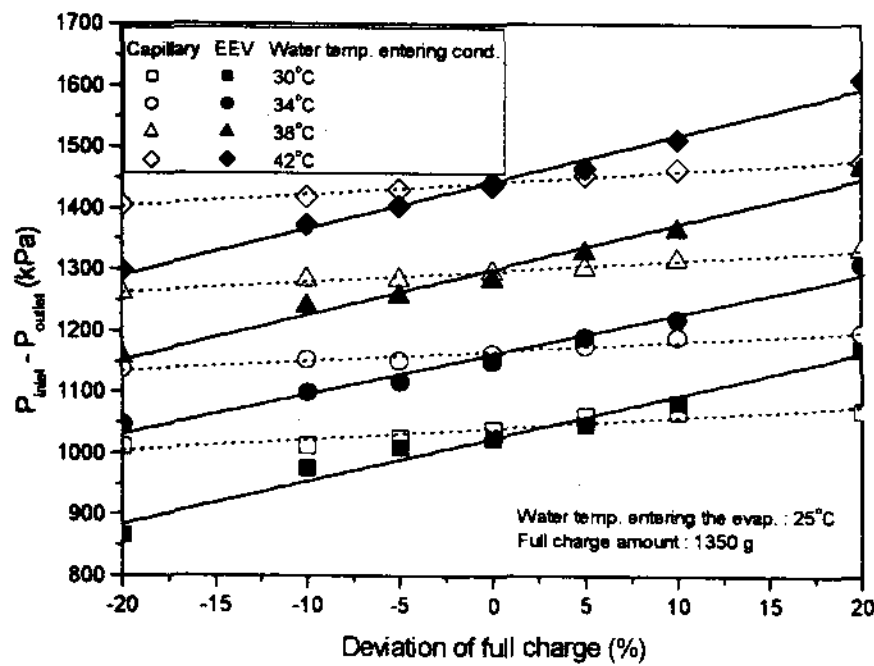


Fig. 7 Pressure difference as a function of refrigerant charge.

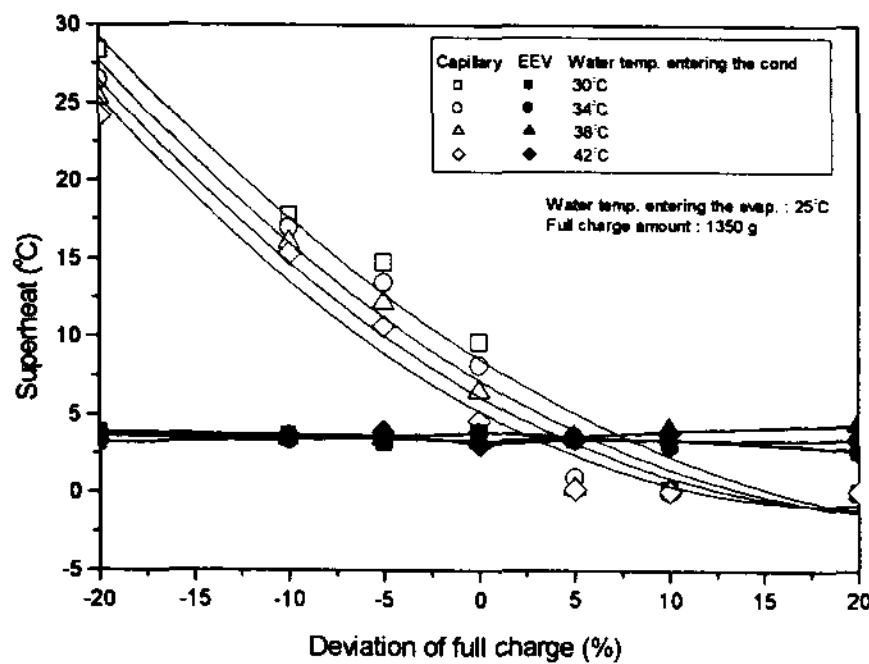


Fig. 8 Variation of superheat as a function of refrigerant charge.

또한, 냉매 충전량이 증가함에 따라 냉매유량의 증가에 따른 과열도 감소를 막기 위해서는 팽창밸브의 저항을 증가시켜야 한다. 따라서 전자팽창밸브 시스템에서는 저충전량 영역에서는 밸브 개도를 증가시키고 과충전영역에서는 밸브 개도를 감소시켜 충전량 변화에 따라 시스템의 고·저압의 압력차이의 변화율은 모세관 시스템에 비하여 크게 나타났다(Fig. 7).

Fig. 8은 모세관과 전자팽창밸브 시스템의 충전량 변화에 따른 과열도 변화를 여러 응축기 부하조건에 대하여 나타냈다. 모세관시스템은 냉매 충전량이 증가함에 따라 시스템의 고압측에 냉매가 쌓이고 액상 영역이 증가함에 따라 냉매유량이 증가하여 과열도가 감소하였으며, 과열도 감소폭은 충전량의 증가에 따라 감소하였다. 전자팽창밸브 시스템은 충전량이 증가함에 따라 과열도 변화는 매우 미소하였다. 이는 충전량 증가에 따라 전자팽창밸브의 개도가 감소하여 냉매유량 변화가 크지 않고, 증발기에서의 냉매와 2차 유체의 온도차이 변화가 미소하였기 때문이다. 그러므로 냉매 충전량과 부하변동시에 팽창장치 저항 변화를 통하여 시스템 과열도를 일정하게 유지함으로써 시스템 최적화와 신뢰성을 확보할 수 있다.

4. 결론

열펌프 유닛의 최적화 측면에서 가장 중요한 기능을 수행하는 팽창장치의 운전특성과 충전량 변화에 따른 시스템 성능 특성에 관한 성능 실험을 수행하였다. 모세관과 오리피스 팽창장치를 통과하는 냉매유량은 응축압력, 과냉도 또는 건도에 크게 의존하였다. 냉매 유량은 응축압력 또는 과냉도가 커질수록 증가하였으며, 모세관은 관내부의 저항에 의한 압력강하로 냉매 유량이 결정되고, 오리피스는 입구 영역의 급격축소에 의한 압력강하로 냉매유량이 결정된다. 모세관 적용 열펌프 시스템은 냉매 충전량과 응축기 부하에 따라 그 성능이 매우 크게 변화되었으며, 저충전 영역에서의 용량 변동폭이 과충전 영역에서의 용량 변동폭보다 크게 나타났다. 전자팽창밸브 적용 열펌프 시스템의 용량은 냉매 충전량 변화에 따라서는 변화폭이 크지 않았으나, 실외 부하 변동에 따라서는 크게 변화하였다. 또한, 모든 충전량 영역에서 전자팽창밸브 시스템은 모세관 시스템보다는 우수한 성능을 나타냈으며, 시스템 과열도를 일정하게 조절함으로써 응축기부하와 냉매충전량 변화에 따른 시스템의 최적화를 이룰 수 있다.

후기

본 연구는 에너지관리공단의 신·재생에너지 기술개발사업(2007-N-GE02-P-01-3-020)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] Lund, J., Sanner, B., Rybach, L., Curtis R., Hellstrom, G., 2003, "Ground-Source Heat Pumps - A World Overview," Renewable Energy World, pp. 218-227.
- [2] Choi, E., Kim, J., 2002, "The Effects of the Refrigerant Charge on the Performance of an Air Conditoner with Capillary Tube Exapnsions," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 359-364.
- [3] Yavuzturk, C., Spitler, J.D., 1999, "A Short Time Step Response Factor Model for Vertical Ground Loop Heat Exchanger," ASHRAE Transaction, Vol. 105, No. 2, pp. 475-485.
- [4] Sohn, B. H., Cho, C., Shin, H., An, H., 2005, "Cooling and Heating Performance Evaluation of a GSHP System," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 71-81.
- [5] Payne, W. V., 1997, "A Universal Mass Flowrate Correlation for Refrigerants and Refrigerant/Oil Mixtures," Ph. D Thesis, Texas A&M Univ. U.S.A.
- [6] ARI, 1986, "Standard for Water-Source Heat Pumps," ARI Standard 320, Virginia.