

냉매 충전량과 팽창장치 변화에 따른 열펌프 시스템의 성능특성에 관한 연구

최 종 민, 김 용 찬^{*†}

고려대학교 차세대기계설계기술연구소, *고려대학교 기계공학과

The Performance of a Heat Pump with a Variation of Expansion Valve at Various Charging Conditions

Jong Min Choi, Yongchan Kim^{*†}

Institute of Advanced Machinery Design Technology, Korea University, Seoul 136-701, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received May 20, 2003; revision received June 13, 2003)

ABSTRACT: Constant area expansion devices such as capillary tubes, short tube orifices are being gradually replaced with electronic expansion valves (EEVs) because of increasing focus on comfort and energy conservation. In this study, the performance of a water-to-water heat pump as a function of refrigerant charge is investigated in steady state, cooling mode operation with expansion devices of a capillary tube and an EEV. The performance of the capillary tube system varies drastically according to the change of refrigerant charge amount and inlet temperature of the secondary fluid in the condenser. Cooling capacity and COP of the EEV system show little dependence on the refrigerant charge, while those are strongly dependent on the secondary fluid temperature at the condenser inlet. In general, for a wide range of operating conditions the EEV system shows much higher performance as compared with the capillary tube system. The performance of the EEV system can be optimized by adjusting EEV opening to maintain a constant superheat at all test conditions.

Key words: Charge(충전량), Heat pump(열펌프), Capacity(용량), Superheat(과열도), Subcooling(과냉도)

1. 서 론

열펌프 시스템의 성능을 향상시키려면 압축기의 효율이 높아야 하고 시스템을 구성하는 부품들이 서로 최적화되도록 설계하여야 하며, 적절한 냉매량을 시스템에 충전하여야 된다. 냉매충전량이 많거나 적은 경우 시스템의 성능이 저하

되며 제품의 신뢰도를 저하시킬 수 있으므로^(1,2) 최적의 냉매량을 시스템에 충전시키는 것은 매우 중요하다. 그러나 열펌프 시스템은 다양한 운전 조건을 포함하고 있고, 팽창장치의 종류에 따라 최적의 충전량이 변화되므로, 최적 충전량을 설정하는 데 어려움이 있다. 최근에는 열펌프 시스템의 소형화와 냉매 충전량의 감소를 위하여 소형의 어큐뮬레이터를 사용하거나, 전자팽창밸브를 사용하는 시스템이 개발되고 있다.⁽³⁾ 따라서 팽창장치와 냉매 충전량 사이의 적절한 용량 매칭은 열펌프의 설계에 있어 매우 중요한 인자로 많은

† Corresponding author

Tel.: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

연구가 필요한 상태이다.

Houcek and Thedford⁽¹⁾는 최적충전량 이외의 영역에서는 시스템의 용량과 성능계수(COP)가 최적충전량에 비하여 점차 감소한다고 보고하였다. Stoecker et al.⁽²⁾은 최적충전량에서 모세관을 포함한 시스템과 TXV를 포함한 시스템의 성능을 비교하였으며, TXV를 팽창장치로 사용한 시스템의 계절성능(SEER)이 높게 나타난다는 결과를 얻었다. Choi and Kim⁽⁴⁾은 충전량 변화에 따른 냉매유량변화가 모세관을 갖는 시스템의 성능변화에 가장 큰 영향을 준다는 결론을 얻었다.

냉매 충전량과 관련한 연구는 대부분 모세관, 오리피스 및 TXV를 팽창장치로 사용하는 열펌프 시스템에 대하여 수행되었다. 넓은 운전영역, 정도 높은 제어성 때문에 전자팽창밸브가 열펌프의 팽창장치로 사용되고 있으나, 전자팽창장치를 사용할 때 냉매 충전량의 변화에 따른 성능특성에 대한 연구는 거의 찾아보기 힘들다. 그러므로 전자팽창밸브를 사용하는 시스템의 성능향상과 신뢰성을 증가시키기 위하여 냉매 충전량에 따른 열펌프의 성능에 대한 연구가 절실히 요구된다.

본 논문에서는 모세관과 전자팽창장치를 포함한 물 대 물 열펌프의 냉매 충전량 변화에 따른 성능특성을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 전자팽창밸브를 포함한 시스템의 충전량 변화에 따른 성능특성을 모세관 시스템과 비교하였으며, 실외부하 변동에 따른 시스템 성능특성을 함께 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 운전조건 및 냉매 충전량을 변화시키면서 열펌프의 성능을 측정할 수 있는 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 열펌프 시스템은 R-22를 작동유체로 사용하며, 정격 냉방용량 3.5kW를 갖도록 설계하였다. 열펌프는 스크롤 압축기, 2개의 이중관식 열교환기 및 팽창장치로 구성하였다. 팽창장치는 모세관 또는 전자팽창밸브를 사용하였으며, 전자팽창밸브는 1-2상 여자 스텝 모터로 구동하였다. 측정의 편리성을 도모하기 위하여 물을 증발기와 응축기의 2차 유체로 사용하였으며, 가변속 펌프와 항온조를 사용하여 응축기와 증발기의 부하를 조절하였다.^(5,6)

응축기와 증발기의 입구에서 2차 유체온도가 각각 34℃와 25℃일 때를 표준조건으로 선정하고, 표준조건에서 모세관을 팽창장치로 사용하는 시스템(이하 모세관 시스템)이 최대의 COP를 나타내는 충전량을 표준충전량으로 선정하였다. 본 연구에 사용한 모세관 시스템의 표준 충전량은 1,350g이다. 표준 충전량을 결정한 뒤에 시스템을 진공시킨 후 표준 충전량의 -20%부터 +20%까지 충전량을 변화시키며 시스템의 성능을 측정하였다. 본 논문에서는 모세관 시스템의 성능을 전자팽창밸브를 사용하는 시스템(이하 전자팽창밸브 시스템)과 비교하기 위하여 동일한 충전량 조건에서 성능실험을 실시하였으며, 전자팽창밸브의 개도는 각 운전조건에서 시스템이 최대의 COP를

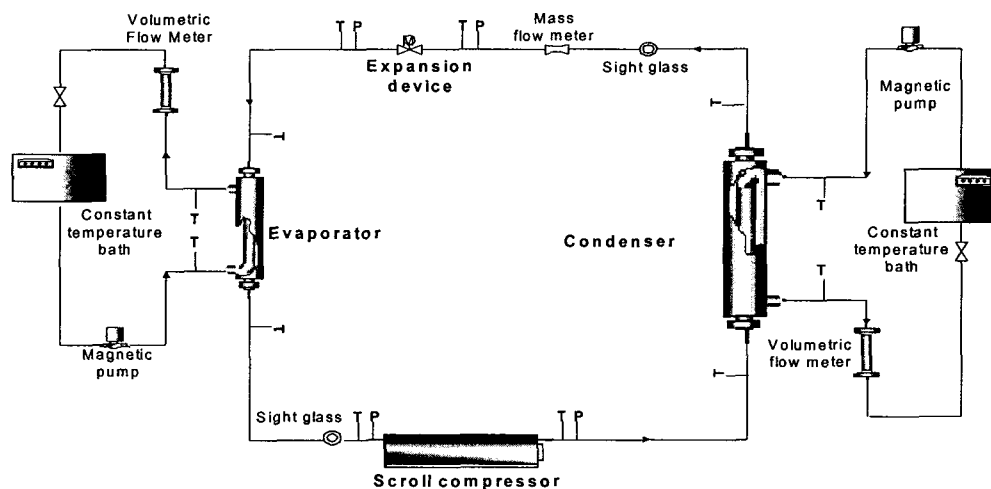


Fig. 1 Schematic of the test setup for a water-to-water heat pump.

갓도록 조절하였다.

일반적으로 열펌프 시스템은 냉방 모드에서 충전량을 결정하므로,⁽⁷⁾ 본 연구는 냉방 모드에 대해서만 실험을 수행하였다. 증발기 입구의 2차 유체온도는 25°C로 고정하고, 응축기 입구의 2차 유체온도를 30°C, 34°C, 38°C, 42°C로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이때 응축기와 증발기를 통과하는 2차 유체의 유량은 각각 9 lpm 및 7 lpm으로 고정하였다.

각 시험조건에서 시스템의 온도, 압력, 유량, 소비전력을 측정하였으며, 모든 데이터는 시스템이 안정된 후 2초 간격으로 40분간 측정 및 저장하였다. 냉방능력은 증발기 입출구의 2차 유체의 온도 및 유량을 사용하여 계산하였으며, 실험의 신뢰성 확보를 위해 냉매측 열량과 비교하였다.^(5,6) 냉매 측에서 산정한 용량과 2차 유체를 사용하여 산정한 용량은 모든 실험조건에 대하여 5% 이내에 서로 일치하였다. 이는 ARI Standard⁽⁵⁾를 만족하는 결과이다. 또한, 냉방능력과 COP의 불확실성은 각각 3.1%와 3.2% 이내로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 모세관 시스템의 충전량 변화에 따른 냉방용량 변화를 나타낸다. 저충전량 영역에서 충전량 변화에 따른 용량 변화율이 과충전 영역에서의 변화율보다 크게 나타났다. 과충전 영역에서는 증발압력 증가로 증발온도와 2차 유체 사이의 온도차가 감소하여 냉방용량이 감소한다. 저충전 영역에서는 압축기의 입구온도 상승으로 인

하여 압축기 효율이 감소하고, 시스템의 냉매유량이 감소하여 냉방용량이 점차 감소된다. 또한 저충전량 영역에서는 압축기 입구 과열도가 커서 과충전 영역에서보다 용량 감소폭이 크다. 모세관 시스템의 충전량 변화에 따른 성능은 Houcek and Thedford⁽¹⁾와 Farzard and O'Neal⁽⁷⁾의 연구 결과와 동일한 경향을 나타냈다.

냉방용량은 응축기 입구 2차 유체의 온도변화에 따라 민감하게 변화되었다. 응축기 입구에서 2차 유체의 온도가 증가함에 따라 충전량 증가에 따른 용량 감소폭이 과충전 영역에서는 약간 증가하였으나, 저충전 영역에서는 감소하였다. 이는 모세관 시스템에서는 저충전 영역에서의 응축압력의 증가에 따른 유량변화가 과충전 영역에서의 유량변화보다 커서 응축기 입구에서 2차 유체의 온도 증가에 따른 저충전 영역에서의 용량 감소폭이 과충전 영역에서의 용량 감소폭보다 작게 나타나기 때문이다.

Fig. 3은 전자팽창밸브 시스템의 충전량 변화에 따른 용량 변화를 나타낸다. 전자팽창밸브 시스템은 모세관시스템에 비하여 충전량 변화에 따른 냉방용량 변동폭이 매우 작은 특성을 나타냈다. 응축기 입구의 2차 유체가 30°C 및 34°C인 경우 냉매 충전량이 최적충전량 대비 -10%에서 +20%까지 변화여도 용량 변화는 무시할 만큼 작게 나타났다. 냉매 충전량과는 달리 냉방용량은 응축기 입구의 2차 유체의 입구온도 변화에 따라서는 크게 영향을 받았다. 모든 응축기 입구에서 2차 유체의 온도조건에서 최대 냉방용량은 표준 충전량보다 +5% 높은 지점에서 나타났다.

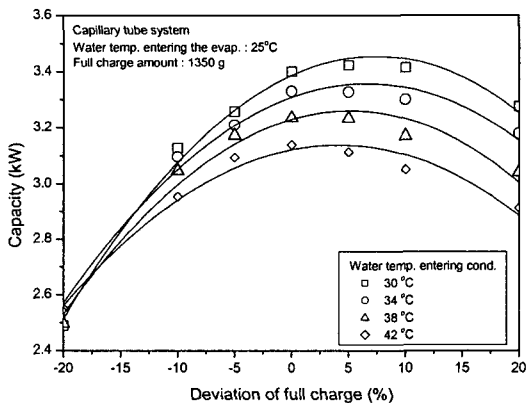


Fig. 2 Capacity variation of the capillary tube system according to refrigerant charge.

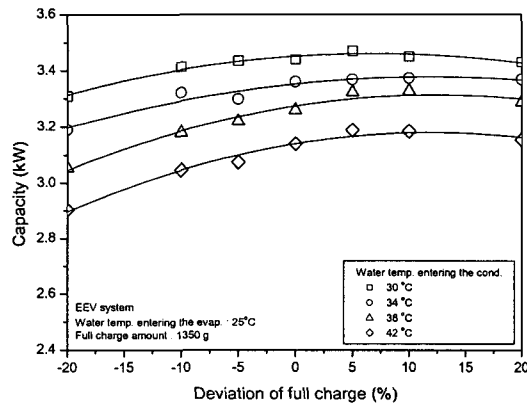


Fig. 3 Capacity variation of the EEV system according to refrigerant charge.

모세관 시스템은 응축기의 부하가 증가함에 따라 응축압력 및 증발압력이 증가하지만, 응축압력의 증가폭이 더 커서 냉매유량이 증가하여 압축기 입구 과열도가 감소하므로(Figs. 4, 5) 증발 열교환기에서 최대의 열교환 효율을 유지하면서 습압축을 방지하기 위해서는 팽창밸브의 저항을 증가시켜야 한다. 또한, 냉매 충전량이 증가함에 따라 냉매유량의 증가에 따른 과열도 감소를 막기 위해서는 팽창밸브의 저항을 증가시켜야 한다. 따라서 전자팽창밸브 시스템에서는 저충전량 영역에서는 밸브 개도를 증가시키고 과충전 영역에서는 밸브 개도를 감소시켜 충전량 변화에 따라 시스템의 고·저압의 압력차이의 변화율은 모세관 시스템에 비하여 크게 나타났다(Fig. 4). 그러므로 냉매가 과충전된 영역에서는 전자팽창밸브 시스

템의 고압단과 저압단 사이의 압력차이가 전자팽창밸브 개도 감소로 인하여 모세관 시스템에 비하여 크게 나타났으며, 저충전 영역에서는 전자팽창밸브의 저항 감소로 인하여 고저압의 압력차이가 모세관 시스템보다 작게 나타났다. 전자팽창밸브 시스템은 응축기 입구에서 2차 유체의 온도가 30℃에서 42℃까지 변화될 때, 모든 실험조건에서 전자팽창밸브 시스템의 냉매유량은 2.3 kg/h 이내에서 변화되었다. 충전량 증가에 따라 응축압력 및 팽창장치 입출구의 압력차이가 증가함에도 응축기 입구 2차 유체의 온도가 일정할 경우 냉매유량 변화는 무시할만 하였으며, 이는 전자팽창밸브의 개도가 변화였기 때문이다.

Fig. 6은 응축기 2차 유체온도와 냉매 충전량 변화에 따른 모세관 시스템의 COP를 나타낸다.

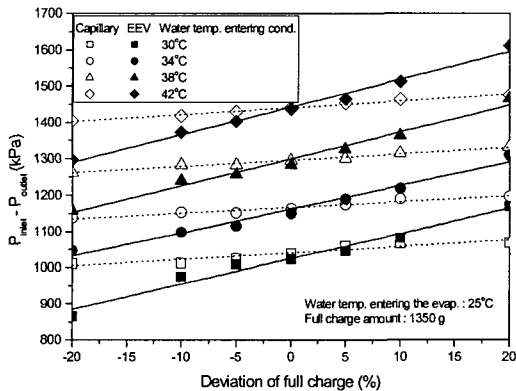


Fig. 4 Pressure difference as a function of refrigerant charge.

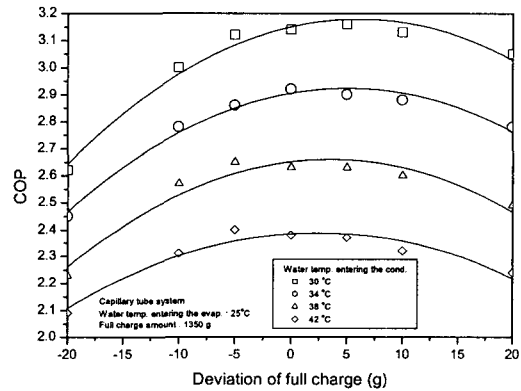


Fig. 6 COP of the capillary tube system as a function of refrigerant charge.

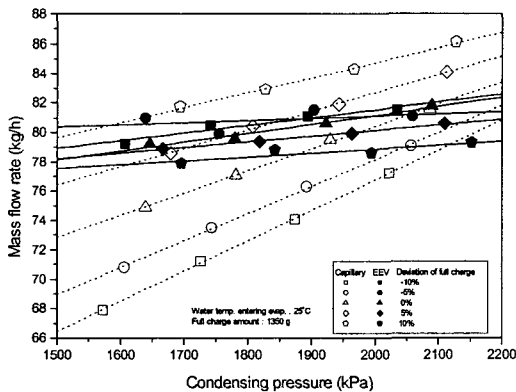


Fig. 5 Mass flow rate as a function of refrigerant charge.

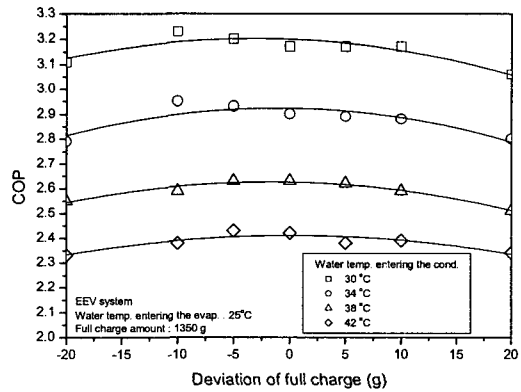


Fig. 7 COP of the EEV system as a function of refrigerant charge.

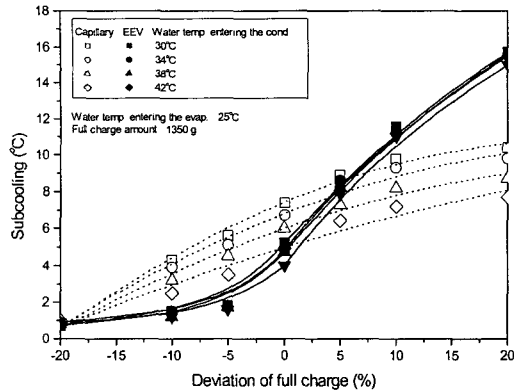


Fig. 8 Variation of subcooling as a function of refrigerant charge.

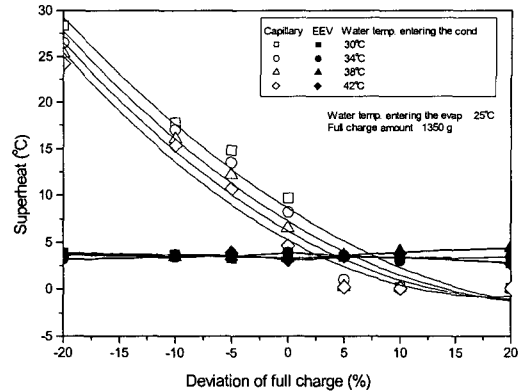


Fig. 9 Variation of superheat as a function of refrigerant charge.

모든 충전량에서 응축기 입구에서 2차 유체의 온도가 증가함에 따라 시스템의 소비전력이 증가하고, 냉방용량이 감소하여 COP가 급격히 감소하였다. 모세관 시스템에서는 냉매충전량이 최적치를 벗어나면, 저충전 영역에서의 COP 감소폭이 과충전 영역에서의 감소폭보다 크게 나타났으며, 이는 Farzard and O'Neal⁽⁷⁾의 실험결과와 동일한 경향을 나타낸다. 표준조건에서 표준충전량 대비 -20% 또는 +20%의 냉매가 시스템에 충전된 경우 COP는 각각 16.1% 및 4.8%씩 감소하였다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 전자팽창밸브 시스템의 COP는 응축기 부하 변동에는 매우 민감하게 변화되었으나, 냉매 충전량 변화에 대해서는 상대적으로 적은 변화폭을 나타내었다. 응축기 입구에서 2차 유체의 온도가 34°C인 경우 충전량 변화에 따른 COP의 최대 변화량은 0.11이었다. 과충전 영역에서 전자팽창밸브 시스템의 냉매유량은 모세관 시스템보다 작은 값을 나타냈으며, 저충전 영역에서는 고저압의 압력차이가 모세관 시스템보다 작게 나타났다. 따라서 전자팽창밸브 시스템의 소비전력은 모든 충전량 조건에서 모세관 시스템보다 작게 나타났다. 일반적으로 전자팽창밸브 시스템은 충전량이 최적에서 벗어나는 경우 모세관 시스템보다는 COP 감소폭이 작게 나타났다.

Fig. 8은 모세관과 전자팽창밸브 시스템의 충전량 변화에 따른 과냉도 변화를 여러 응축기 부하 조건에 대하여 나타냈다. 모세관 시스템은 냉매 충전량이 증가함에 따라 시스템의 고압측에 냉매가 쌓이고 액상 영역이 증가함에 따라 응축압력

증가로 과냉도가 증가하였으며, 과냉도 증가폭은 충전량의 증가에 따라 감소하였다. 이는 Stoecker et al.⁽²⁾과 Farzard and O'Neal⁽⁷⁾의 결과와 동일한 경향을 나타낸다. 전자팽창밸브 시스템은 충전량이 증가함에 따라 과냉도 증가폭이 증가하였다. 일반적으로 모세관이나 오리피스를 팽창장치로 사용하는 열펌프는 응축기 입구에서 2차 유체의 온도가 증가함에 따라 과냉도가 감소하였다.^(2,7) 그러나 전자팽창밸브 시스템에서는 응축기 부하 증가에 따라 과냉도 변화가 매우 작게 나타났다. 이는 운전조건 변화에 따라 전자팽창밸브의 개도 변화를 통하여 유동저항이 조절되었기 때문이다. 즉, 응축기 부하가 증가함에 따라 전자팽창밸브의 개도가 감소하여 응축압력이 증가하여도 냉매 유량의 변화가 적고, 응축기에서 냉매와 2차 유체와의 온도차이 변화가 크지 않으므로 과냉도의 변화는 크지 않았다.

Fig. 9는 냉매 충전량 변화에 따른 모세관 시스템과 전자팽창밸브 시스템의 과열도를 나타낸다. 모세관 시스템의 과열도는 충전량 증가 및 응축기 부하 증가에 따라 증발기를 흐르는 냉매유량이 증가하여 감소하였다. 전자팽창밸브 시스템에서는 모든 응축기 부하와 충전량 범위에서 과열도 변화는 매우 미소하였다. 그러므로 냉매 충전량이 변화된 경우 시스템 과열도를 일정하게 유지함으로써 시스템 성능을 최대화할 수 있다.

4. 결 론

냉매 충전량 변화에 따른 열펌프 시스템의 성

능특성을 규명하기 위하여 모세관 시스템과 전자 팽창밸브 시스템에 대하여 표준충전량 대비 -20%에서 +20%의 범위에서 충전량을 변화시키며 성능실험을 실시하였다. 모세관 시스템은 냉매 충전량과 응축기 부하에 따라 그 성능이 매우 크게 변화되었으며, 저충전 영역에서의 용량 변동폭이 과충전 영역에서의 용량 변동폭보다 크게 나타났다. 전자팽창밸브 시스템의 용량 및 COP는 냉매 충전량 변화에 따라서는 변화폭이 크지 않았으나, 실외 부하 변동에 따라서는 크게 변화하였다. 또한, 모든 충전량 영역에서 전자팽창밸브 시스템은 모세관 시스템보다는 우수한 성능을 나타냈다.

후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(이산화탄소 저감 및 처리기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Houcek, J. and Thedford, M., 1984, A research into a new method of refrigeration charging and the effects of improper charging, Proceedings of 1st Annual Sym. on Efficient Utilization of Energy in Residential and Commercial Buildings, Texas.
- Stoecker, W. F., Smith III, L. D. and Emde, B. N., 1981, Influence of the expansion device on the seasonal energy requirements of a residential air conditioner, ASHRAE Trans., Vol. 87, No. 1, pp. 349-360.
- Schmidt, F., 1999, Optimal control of electronic expansion valves in modern low charge evaporator systems requires fast reacting expansion valves and new controller design, Proceedings, The 20th International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Sydney, Paper 394.
- Choi, E. and Kim, J., 2002, The effects of the refrigerant charge on the performance of an air conditioner with capillary tube expansions, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 5, pp. 359-364.
- ARI, 1986, Standard for water-source heat pumps, ARI Standard 320, Virginia.
- ASHRAE, 1992, Methods of testing for rating water-cooled refrigerant condensers, ASHRAE Standard 22, Atlanta.
- Farzard, M. and O'Neal, D. L., 1994, The effect of improper refrigerant charging on the performance of a residential heat pump with fixed expansion devices (Capillary Tube and Short Tube Orifice), Proceedings, The 29th Intersociety Energy-Conversion Engineering Conference, California, Part 2, pp. 921-926.