

고온가스 및 액체 바이패스 적용 용량가변 히트펌프의 성능특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Performance Characteristics of Hot-gas and Liquid Bypass Heat Pump Systems for Capacity Modulation

안재환(Jae Hwan Ahn)¹, 주영주(Youngju Joo)², 윤원재(Won Jae Yoon)¹,
강훈(Hoon Kang)³, 김용찬(Yongchan Kim)^{3*}

¹고려대학교 기계공학부 대학원, ²삼성전자 생활가전사업부, ³고려대학교 기계공학부

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-713, Korea

²Digital Appliance Division, Samsung Electronics Inc., Suwon 443-742, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received December 5, 2012; revision received January 2, 2013)

Abstract A small air-conditioner or chiller for a constant temperature bath normally uses a constant speed compressor. The constant speed compressor is relatively inexpensive, but it uses on/off control for capacity modulation. The on/off control has several disadvantages, specifically energy loss and large temperature fluctuation. Continuous operation with a bypass system can be an alternative to on/off control, for capacity modulation. In this study, a heat pump system having a hot-gas bypass and a liquid bypass was adopted. The performance of the bypass-type heat pump was measured, by varying the bypass valve opening. The differences of the COP between the hot-gas bypass and the liquid bypass, in the cooling and heating operations, were within 2% and 1%, respectively. The liquid bypass showed a wider range of capacity control in the cooling operation but the hot-gas bypass showed a wider range of capacity control in the heating operation.

Key words Hot-gas bypass(고온가스 바이패스), Liquid bypass(액체 바이패스), Heat pump(히트펌프), Capacity modulation(용량가변)

† Corresponding author, E-mail: yongckim@korea.ac.kr

기호설명

bp : 바이패스
COP : 시스템 성능계수
CR : 압축비
DB : 건구온도 [°C]
EEV : 전자팽창밸브
ID : 실내측
 \dot{m} : 질량유량 [kg/h]
OD : 실외측
P : 압력 [kPa]
Q : 열전달률 [W]
W : 압축기 소비동력 [W]
WB : 습구온도 [°C]

하첨자

d : 토출측(discharge)
s : 흡입측(suction)
t : 전체(total)

1. 서론

히트펌프는 저온부에서 열을 흡수하여 고온부로 방출하는 공조장치로서 난방운전 중에는 실내에 열을 공급하고 냉방운전 중에는 열을 흡수한다. 이러한 히트펌프는 다양한 부하조건에서 운전되는데, 최근 인기를 얻고 있는 멀티형 히트펌프 등의 대형 상업용 히트펌

프는 다양한 부하조건에 대응하기 위하여 가변속 압축기를 사용한다. 그러나 가변속 압축기를 사용할 경우 압축기뿐만 아니라 제어기를 포함한 비용이 크게 증가하기 때문에 소형 가정용 에어컨 또는 항온조용 칠러 등의 기기에서는 정속형 압축기가 일반적으로 사용된다. 이러한 정속형 압축기의 경우 용량제어를 위해 압축기를 on/off 시키는 단속운전을 한다.

Ruy et al.⁽¹⁾은 단속운전에서 압축기 정지시 고압측 냉매와 저압측 냉매의 혼합으로 압축된 고압 냉매가 활용되지 못하게 되는 에너지 손실이 발생하며, 고압측 냉매의 저압측 증발기 유입으로 기동시 액압축이 발생할 수 있다고 단속운전의 문제점을 나타내었다. 또한 Baek et al.⁽²⁾은 on/off 제어 시스템과 압축기 토출가스의 일부를 증발기 입구로 우회하는 고온가스 바이패스 시스템의 제어 특성에 대해 고찰하여 on/off 제어는 큰 온도 편차와 잦은 압축기 단속에 의한 손실이 발생함을 나타내었다. 정속형 압축기에서 단속운전에 따른 문제를 피하기 위한 방법 중 하나로 연속운전이 가능하도록 냉매를 바이패스하여 용량제어를 하는 방식이 제안된 바 있다. Yaqub et al.⁽³⁾은 냉동 및 공조 시스템에서 고온가스 증발기 바이패스, 고온가스 압축기 바이패스, 액체 바이패스 시스템의 용량변화에 따른 성능 특성을 분석하고, 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 이를 통해 냉방운전 시 압축기에서 토출된 기상 냉매가 증발기 입구로 바이패스되는 시스템이 다른 바이패스 시스템에 비해 COP가 가장 높다는 결론을 도출하였다. Jung et al.⁽⁴⁾은 고온가스 바이패스 제어와 압축기 가변속 제어 방식을 비교하여, 압축기 제어방식이 고온가스 바이패스 방식보다 COP는 높았으며, 제어 정도는 비슷함을 나타냈다.

바이패스 방식 중에는 압축기에서 토출된 고온의 기상 냉매를 압축기 흡입측으로 바이패스시키는 고온가스 바이패스 시스템과 응축기 출구의 액상 냉매를 압축기 흡입측으로 바이패스시키는 액체 바이패스 시스템이 있다. 이 두 방식은 냉매가 각각 압축기 출구와 응축기 출구에서 바이패스되어 실내기 측으로의 배관 연결 없이 실외기 측만으로 구성가능하고, 압축기에서 토출된 냉매를 증발기 입구로 우회하는 바이패스 시스템과는 달리 냉·난방용 히트펌프에 적합하다. 이 두 가지 바이패스에 대한 연구는 냉방 및 냉각 위주로 행하여져 냉·난방이 가능한 히트펌프 시스템에 적용된 연구결과는 발표된 바 없으며, 두 개의 바이패스 방식을 하나의 시스템에 적용하여 상황에 따라 바이패스 방식을 선택하는 연구는 없는 실정이다. 본 연구에서는 두 바이패스 방식을 하나의 시스템에 적용한 히트펌프 시스템을 제작하여 냉·난방운전 및 각 바이패스 방식에 따른 시스템의 특성 및 성능 변화를 고찰하고 비교하였다. 또한 용량 변화에 대해 바이패스 방식

에 따라 COP의 변화를 나타내었으며, 응축압력의 감소 또는 증발압력의 상승의 필요성으로 단속운전을 하는 대신 바이패스를 통하여 연속운전이 가능함을 나타내었다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 본 연구에서 설계·제작한 이중 바이패스 히트펌프 시스템 구성도를 나타내었다. 실험장치는 크게 실내부와 실외부로 구성되어 있으며, 4방밸브의 절환을 통해 냉·난방운전 모드의 변환이 이루어진다. 고온가스 바이패스 적용의 경우 바이패스 밸브 EEV-bp1은 열리고 EEV-bp2는 닫혀서, 압축기에서 토출된 냉매의 일부가 EEV-bp1을 지나, 증발기 출구에서 나오는 냉매와 합쳐져서 압축기로 흡입된다. 액체 바이패스 적용시 바이패스 밸브 EEV-bp1은 닫히고 EEV-bp2는 열려서, 응축기에서 나온 냉매의 일부가 EEV-bp2를 지나, 증발기 출구에서 나오는 냉매와 합쳐져서 압축기로 흡입된다.

히트펌프 시스템의 설계 냉·난방능력 및 COP는 각각 8.0 kW 및 3.2이며, 작동냉매는 R-410A를 사용하였다. 압축기는 완전밀폐형 BLDC 로터리 압축기를 사용하였으며, 팽창밸브는 500스텝까지 개도가 조절되는 전자팽창밸브(Electronic Expansion Valve, EEV)를 사용하였다. 실내 및 실외 열교환기는 핀튜브 방식의 열교환기를 적용하였으며, 압축기에서의 액압축 방지를 위한 어큐뮬레이터를 압축기 흡입배관에 설치하였다. 냉·난방용량 및 풍량은 ASHRAE Standard⁽⁵⁾에 의거하여 계산하였다.

본 실험은 냉·난방운전 모드에서 수행하였으며, 기본 운전조건으로서 최적 냉매량인 3,900 g과 압축기 회전수 3,500 rpm에서 운전되었다. 냉방운전 시 실내온도

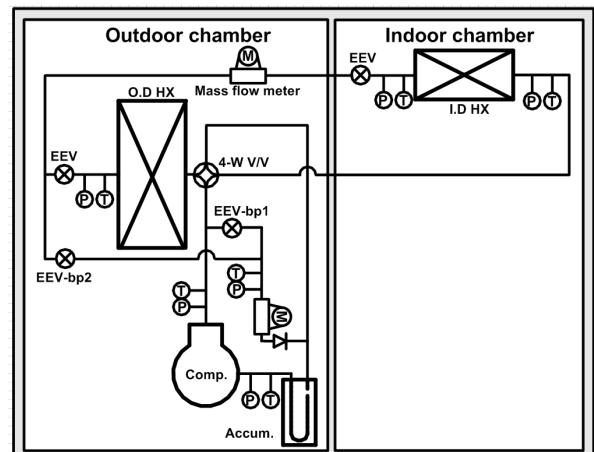


Fig. 1 Schematic of a dual bypass heat pump system.

DB 27°C/WB 19.5°C, 실외온도 DB 35°C/WB 24°C로 설정하였으며, 난방운전 시 실내온도 DB 20°C/WB 15°C, 실외온도 DB 7°C/WB 6°C로 설정하였다. 바이패스 제어 위해 바이패스 배관 입구측에 전자팽창밸브(EEV-bp1, EEV-bp2)를 설치하여 0에서 500스텝까지 100스텝 단위로 밸브 개도를 변화하여 제어하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온가스 바이패스 시스템의 성능 특성

고온가스 바이패스를 적용한 시스템에서 바이패스 측 밸브의 개도를 변화시켰을 때 냉·난방 성능특성을 고찰하였다. 바이패스 측 밸브는 오리피스 직경 1.4 mm 인 전자팽창밸브로서 밸브의 최대 개도인 500스텝을 100%로 하여 20% 개도마다 성능을 나타내었다. 바이패스 밸브가 열리면 압축기에서 토출된 고온 고압의 기상 냉매가 압축기 흡입측으로 바이패스된다. 증발기에서 나온 저압의 냉매는 바이패스된 고압의 기상 냉매와 혼합되어, 바이패스 전보다 높은 압력의 냉매 상태에서 압축기로 흡입되게 된다.

Fig. 2는 바이패스 밸브 개도 변화에 따른 냉·난방 운전 모드별 압축기 흡입압력과 토출압력의 변화를 나타내었다. 냉·난방운전 모드에서 바이패스 밸브 개도가 증가함에 따라 흡입압력은 증가하는 반면 토출압력은 감소하였다. 바이패스 밸브가 열렸을 때, 압축기에서 토출된 냉매유량은 응축기 측과 바이패스 측으로 나뉘어 흐르기 때문에 응축기 측으로 흐르는 냉매유량은 감소한다. 그에 따라 흡입압력 및 토출압력은 감소해야 하지만, 압축기 흡입측에서 바이패스된 고압 기상 냉매와의 혼합으로 흡입압력은 증가하게 된다. 운전모드별로 비교하면 난방운전에서 토출압력의 감소

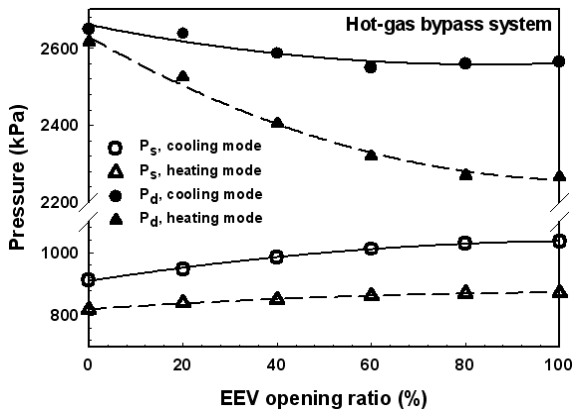


Fig. 2 Variation of the suction pressure, and discharge pressure with EEV opening ratio.

량이 더 크게 나타났다. 이는 난방운전에 비해 난방운전에서 냉매량에 따른 토출압력의 변화가 더 크게 나타나기 때문이다.⁽⁶⁾ 또한 흡입압력의 증가량은 토출압력 감소량의 증가로 인해 난방운전에서 더 작은 것으로 나타났다.

Fig. 3는 바이패스 밸브 개도 변화에 따른 시스템 용량과 소비전력의 변화를 나타내며, Fig. 4는 바이패스 밸브 개도 변화에 따른 COP의 변화를 나타낸다. 밸브 개도 증가에 따라 압축비가 감소하여 전체 냉매유량이 증가하였음에도 불구하고, 압축기 흡입·토출 엔탈피 차이가 감소하여 소비전력은 감소하였다. 난방운전 대비 난방운전에서 개도 변화에 따른 냉매유량 증가량이 더 적고, 흡입·토출 엔탈피 차이가 더 감소하므로 소비전력이 난방운전에 비해 더 크게 감소하였다. 밸브 개도 증가에 따라 바이패스 유량을 제외한 냉매 순환량이 감소하므로, 시스템의 냉·난방용량은 모두 감소하였다. 그에 따라 COP는 냉·난방운전 모드에서 모두 감소하였다.

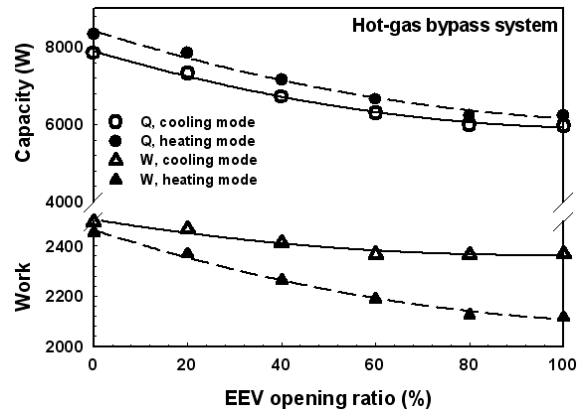


Fig. 3 Variation of the capacity and work with EEV opening ratio.

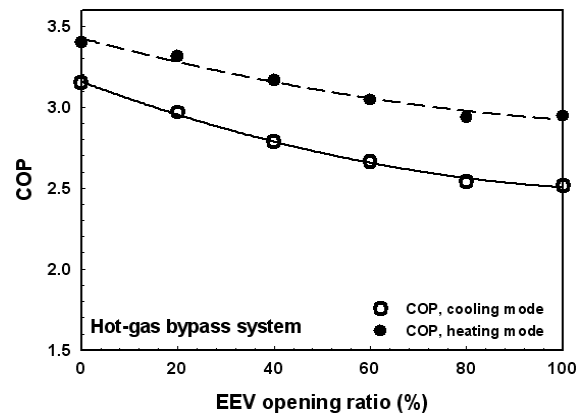


Fig. 4 Variation of COP with EEV opening ratio.

3.2 액체 바이패스 시스템의 성능특성

액체 바이패스를 적용한 시스템에서 바이패스 측 밸브의 개도를 변화시켰을 때 냉·난방 성능 특성을 고찰하였다. 액체 바이패스에서 바이패스 측 밸브가 열리면 응축기에서 나오는 고압의 액상 냉매가 압축기 흡입측으로 바이패스되며, 바이패스된 고압의 냉매는 증발기에서 나오는 저압의 냉매와 혼합된다.

Fig. 5는 바이패스 밸브 개도 변화에 따른 냉·난방 운전 모드별 압축기 흡입압력과 토출압력의 변화를 나타낸다. 바이패스 밸브 개도가 열리면서 고압의 액상 냉매와 저압의 기상 냉매가 혼합되어 압축기 흡입측 엔탈피가 감소하였고, 바이패스에 따라 어큐물레이터에 액냉매가 축적되어 흡입압력이 토출압력과 함께 감소하는 경향을 보였다. 하지만, 바이패스 밸브 개도를 20%에서는 압력이 증가하였는데, 이는 액냉매 누적에 따른 냉매량 감소의 효과보다 고압 냉매와의 혼합에 의한 효과가 더 크게 나타났기 때문이다.

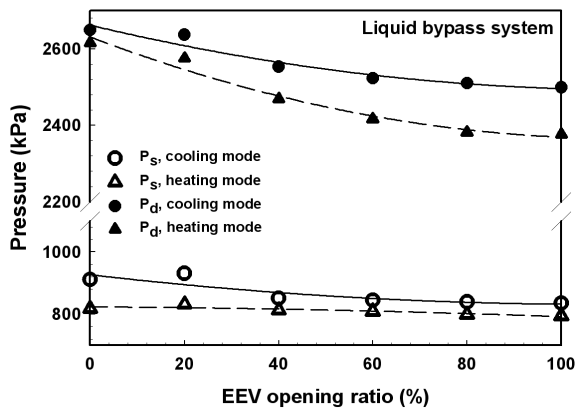


Fig. 5 Variation of the suction pressure, and discharge pressure with EEV opening ratio.

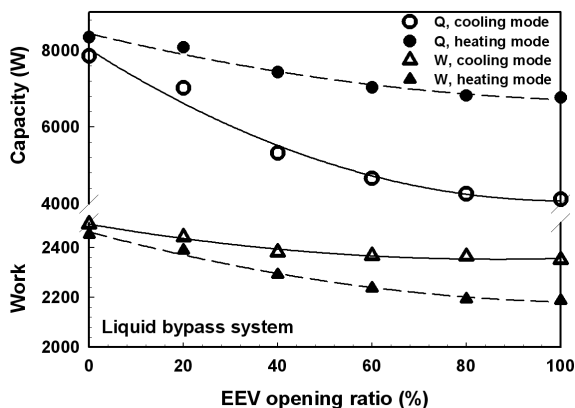


Fig. 6 Variation of the capacity and work with EEV opening ratio.

Fig. 6은 바이패스 밸브 개도 변화에 따른 냉·난방 용량 및 소비전력의 변화를 나타내며, Fig. 7은 바이패스 밸브 개도 변화에 따른 COP의 변화를 나타낸다. 밸브 개도가 증가하면서 냉·난방용량은 감소하였고, 소비전력 또한 감소하였다. 각 운전모드의 부하에 따른 과열도 제어를 위한 팽창장치 개도가 냉방운전에서 더 작게 나타남에 따라 바이패스 유량의 변화는 냉방운전에서 더 크게 나타났다. 난방운전에서 바이패스 유량을 제외한 냉매 순환량의 변화가 냉방운전에 비해 작으므로 난방용량의 변화가 냉방용량에 비해 작게 나타났으며, COP의 변화 또한 냉방운전에 비해 작게 나타났다.

3.3 고온가스 바이패스와 액체 바이패스 비교

고온가스 바이패스 시스템과 액체 바이패스 시스템을 각각 냉·난방운전 성능에 대해 비교하였다. Fig. 8은 각각 냉·난방운전에서 고온가스 바이패스와 액체 바이패스를 적용하였을 때 용량 비율에 따른 COP의 변화를 나타낸다. 냉방운전에서 액체 바이패스 적용시에 바이패스 유량을 제외한 냉매 순환량의 변화가 크기 때문에, 냉방용량의 제어 범위는 액체 바이패스가 더 넓게 나타났다. 난방운전에서는 액체 바이패스일 때 바이패스 유량을 제외한 냉매 순환량의 변화가 더 크게 나타났다. 그러나 고온가스 바이패스에서 압축기 토출압력의 변화가 더 크기 때문에 난방용량의 제어 범위는 고온가스 바이패스에서 더 넓게 나타났다. 바이패스 방법에 따른 용량 비율에 따른 COP의 차이는 냉방운전에서 2% 이내, 난방운전에서 1% 이내로 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 용량 변화에 따른 바이패스 방법은 용량제어 범위만을 고려하여 냉방운전 시에는 액체 바이패스, 난방운전 시에는 고온가스 바이패스가 넓은 용량제어 범위를 가진다.

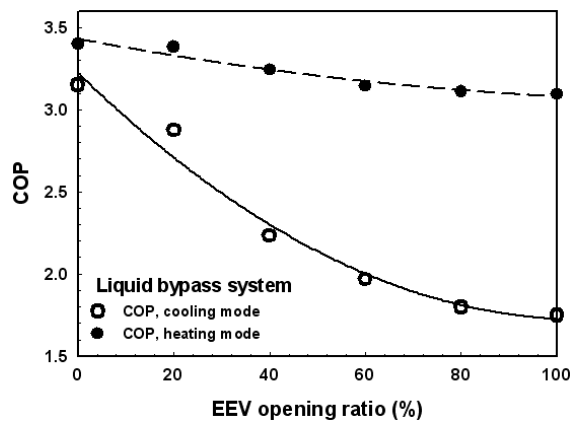


Fig. 7 Variation of COP with EEV opening ratio.

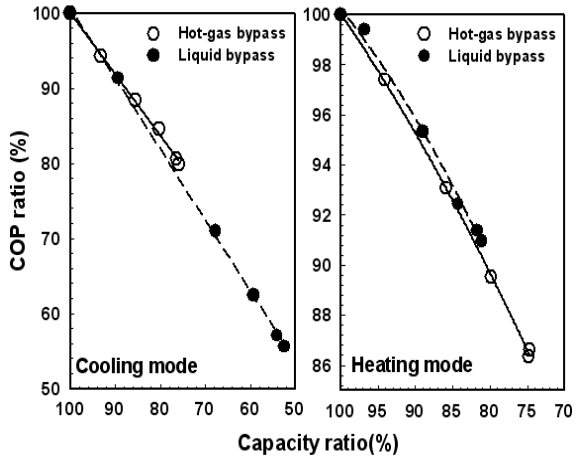


Fig. 8 Variation of COP ratio with capacity ratio.

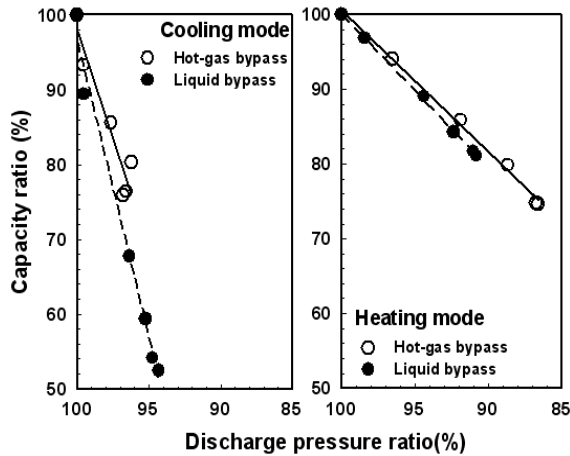


Fig. 9 Variation of capacity ratio with discharge pressure ratio.

Fig. 9은 각각 냉·난방운전에서 고온가스 바이패스와 액체 바이패스를 적용하였을 때 토출압력 비율에 따른 용량 비율의 변화를 나타낸다. 냉방운전에서 토출압력의 96%까지는 고온가스 바이패스 모드에서 냉방용량이 크게 나타났으나 토출압력 제어 범위가 작게 나타났다. 이는 액체 바이패스일 때 바이패스를 제외한 냉매 순환량이 크게 감소하였기 때문에 압력제어 범위가 크게 나타났기 때문이다. 난방운전에서는 고온가스 바이패스 모드일 때 난방용량이 더 크게 나타났으며, 토출압력 제어 범위 또한 더 넓게 나타났다. 고온가스 바이패스는 흡입압력 상승에 따라 바이패스를 제외한 냉매 순환량이 더 크기 때문에 난방용량이 더 크다. 또한 압축기 토출부에서 바이패스되어 팽창장치 입구에서의 냉매 누적량의 감소로 토출압력이 낮게 나타남에 따라 토출압력의 제어 범위가 넓게 나타났다.

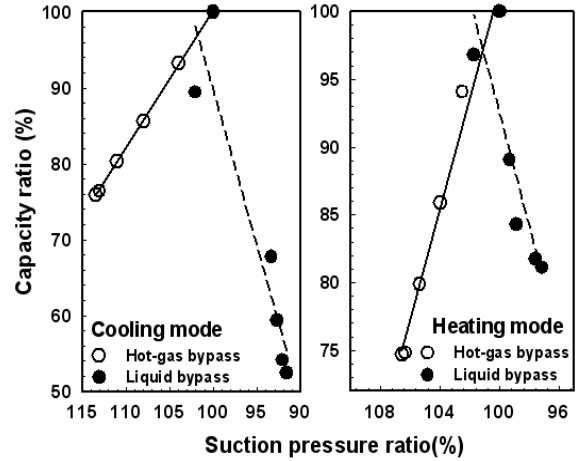


Fig. 10 Variation of capacity ratio with suction pressure ratio.

Fig. 10은 각각 냉·난방운전에서 고온가스 바이패스와 액체 바이패스를 적용하였을 때 흡입압력 비율에 따른 용량 비율의 변화를 나타낸다. 액체 바이패스를 적용하였을 때 흡입압력이 감소하였으며, 고온가스 바이패스를 적용함에 따라 흡입압력이 상승하였으므로, 흡입압력 상승을 위한 바이패스 방법으로 고온가스 바이패스의 적용이 적합함을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온가스 바이패스 시스템과 액체 바이패스 시스템을 히트펌프 시스템에 적용하였다. 각 바이패스 모드의 냉·난방운전 특성 및 성능 변화를 고찰 및 비교하였고, 용량 가변, 흡입·토출압력 변화에 따라 적절한 바이패스 모드를 제안하였다.

1) 용량 변화에 따른 COP의 변화율 차이는 냉·난방운전에서 각각 2%, 1% 이내 차이로 거의 동일하므로 용량 변화에 따른 바이패스 방법 선택은 용량 제어 범위만을 고려하여 냉방운전 시에는 액체 바이패스, 난방운전 시에는 고온가스 바이패스가 적합함을 나타내었다. 그에 따른 용량 제어 범위로써 냉방용량 52~100%, 난방용량 74~100%의 제어 가능 범위를 나타냈다.

2) 압력제어에 따른 연속운전을 위하여 바이패스 방법을 적용할 수 있다. 토출압력 감소를 위해, 냉방운전 시 토출압력 비율 96%까지는 고온가스 바이패스, 그 이하 비율에서는 액체 바이패스에서 높은 냉방용량을 나타내었고, 난방운전 시 고온가스 바이패스가 토출압력 변화 대비 높은 난방용량을 나타내었다. 흡입압력 상승을 위해, 냉·난방운전에서 고온가스 바이패스 방법이 적합함을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국산업기술평가관리원(과제번호 : 1003 5530)의 지원 및 한국에너지기술평가원(No. 20124010 203250)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ryu, Y. H., Hwang, Y. J., Kim, C. M. and Cho, K. S., 2002, Benchmark performance analysis of vapor compression system with capacity modulation compressor, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 98-107.
2. Baek, S. M., Choi, J. H., Byun, J. Y., Moon, C. G., Lee, H. S., Jeong, S. K. and Yoon, J. I., 2009, Characteristics of temperature control by hot-gas bypass flow rate on industrial water cooler, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 33, No. 8, pp. 1129-1136.
3. Yaqub, M., Zubair, Syed M., and Khan, J., 2000, Performance evaluation of hot-gas by-pass capacity control schemes for refrigeration and air-conditioning systems, Energy, Vol. 25, No. 6, pp. 543-561.
4. Jeong, S. K., Lee, D. B. and Yoon, J. I., 2012, Comparison of system performances of hot-gas by-pass and compressor variable speed control of water coolers for machine tools, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8.
5. ASHRAE Standard, 1975, Laboratory methods of testing fans for rating, ASHRAE Standard 37, pp. 51-75.
6. Song, I. S., Choi, J. M., Joo, Y. J., Chung, H. J., Kang, H., and Kim, Y. C., 2008, The performance of a simultaneous heat and cooling heat pump at various charging conditions, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 492-499.