

시스템 히트펌프의 용량조절 및 다변수 제어 특성에 관한 연구

송 인 식, 주 영 주*, 정 현 준*, 강 훈**, 김 용 찬**, 최 중 민***†
한밭대학교 기계공학과 대학원, *고려대학교 기계공학과 대학원,
고려대학교 기계공학과, *한밭대학교 기계공학과

The Performance of Capacity Modulation and MIMO Control for System Heat Pump

In Sik Song, Young Ju Joo*, Hyun Joon Chung*, Hoon Kang**,
Yongchan Kim**, Jong Min Choi***†

Graduate School of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

**Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

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

****Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*

ABSTRACT: A system heat pump provides the benefits of comfort, energy conservation and easy maintenance. Recently, the system heat pump has been employed in small and medium-sized buildings. However, the performance data and control algorithm for system heat pump are limited in literature due to complicated system parameters and operating conditions. In the present study, the performance of a system heat pump with two indoor unit is measured by varying indoor loads, EEV opening, and compressor speed. In addition, the integral optimum regulator which includes MIMO control algorithm is proposed. The capacity modulation and optimum capacity for each indoor unit can be adjusted by utilizing the EEVs opening and compressor speed. The proposed scheme shows appropriate control performance at test conditions.

Key words: Heat pump(히트펌프), Capacity modulation(용량 조절), EEV(전자팽창밸브), Superheat(과열도), Integral optimum regulator(적분형 최적 레귤레이터), System identification(시스템 규명)

1. 서 론

국민의 소득증대와 생활수준의 향상으로 주거 환경의 쾌적성에 대한 욕구가 점차 높아져 공조

기기의 보급이 1가구 1대에서 1실 1대로 되어가는 추세이다. 그러나 각 공조공간에 개별적으로 공조기를 설치할 경우 설치공간의 부족과 미관상의 문제로 많은 제약이 따른다. 따라서 설치공간과 공사비의 절감 및 에너지 절약 차원에서 다수의 실내·외기가 접속되는 시스템 히트펌프의 개발과 보급이 증가하고 있다.⁽¹⁾ 시스템 히트펌프는 다수의 실내기가 조합되어 다양한 부하에 대응 가능하며, 이를 위해 복수의 전자팽창밸브(EEV)와 가변속 압축기를 사용하여 복잡한 운전 특성을

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1731; fax: +82-42-821-1587

E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

갖는다.

Matsuoka and Nagatomo⁽²⁾는 가변속 히트펌프의 주파수, 회전수, 전자팽창밸브 개도 등을 변화시켜 발생하는 과도응답을 수학적으로 모델링하였다. Yasuda et al.⁽³⁾은 비례적분 제어(PI control)를 사용하여 전자팽창밸브의 전달함수를 도출하였으며, Fujita et al.⁽⁴⁾은 2실형 시스템 에어컨에 대하여 용량조절 시험을 수행하여 압축기의 단속회수를 줄여서 에너지 절약 및 쾌적성 향상 효과를 얻었다. 하지만, 복잡한 운전특성을 갖는 시스템 히트펌프의 용량 조절에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한, 대부분의 시스템 히트펌프는 다중입출력 시스템이지만, 히트펌프 시스템 제어와 관련하여서는 단일입출력 제어 시스템을 이용한 단일 유닛 시스템에 대하여 주로 수행되었다.

본 연구에서는 시스템 히트펌프를 모사하여 가변속 압축기와 전자팽창밸브를 팽창장치로 사용하는 2실형 히트펌프의 실내간 용량 조절 특성에 관한 성능 실험을 수행하였다. 또한, 성능 실험 결과를 기반으로 다중입출력구조의 적분형 최적 레귤레이터 기법을 적용한 제어기를 설계하여 제어 성능 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험 방법

Fig. 1은 본 연구에 사용한 2실형 히트펌프 실험장치의 개략도이다. 시스템은 스크롤 압축기, 핀-튜브 열교환기인 실외열교환기 1개와 실내열교환기 2개 및 스텝모터 구동형 EEV(전자팽창밸브) 2개로 구성하였으며, 작동유체로는 R-22를 사용하였다. 시스템은 실외기 출구에서 분지하여 각각의 전자팽창밸브 및 실내기를 지난 후 각 실내기의 출구가 동일 배관으로 합쳐져서 압축기로 흡입되도록 구성하였다. 실내기와 실외기 공기측의 온·습도를 조절하기 위하여 항온항습 챔버를 설계 및 제작하여 실내기와 실외기의 부하를 조절하였다.

Fig. 2는 시스템의 성능 측정 및 자료 취득 시스템과 제어시스템의 개략도를 나타낸다. 실험 중에 압축기의 소비동력, 냉매 유량, 공기풍량과 시스템 주요 부위의 온도 및 압력 등을 측정하였다. 압축기 주파수와 전자팽창밸브 개도 및 각 제어 변수는 컴퓨터 내의 데이터보드와 Labview

를 이용하여 구성하였다.

히트펌프 용량 조절 특성에 관한 성능 실험은 실내기 부하, 압축기 주파수 및 전자팽창밸브의 개도를 변경시키며 실시하였으며, 냉방시험만 수행하였다. Table 1은 용량 조절 성능 시험조건을 나타낸다.

실험 시 실시간 데이터 처리프로그램을 작성하여 측정값을 모니터링하고, 냉매 상태량을 이용하여 과열도, 과냉도, 냉방능력 및 COP 등을 실시간으로 계산하여 제어에 활용하였다. 압축기 입·출구온도 및 압력과 유량이 각각 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\text{ kPa}$, $\pm 0.5\text{ kg/h}$ 이내의 변화폭을 가지며 5분간 변동이 없을 때를 정상상태로 간주하고 2초간격으로 5분간 데이터를 수집하였다. 본 실험의 냉방용량에 대한 불확실도는 $\pm 3.1\%$ 이었다.

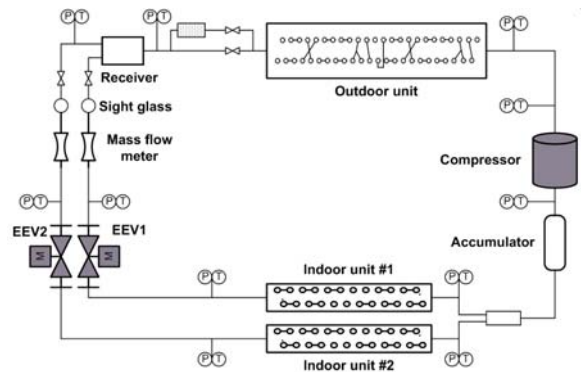


Fig. 1 Schematic diagram of the system heat pump.

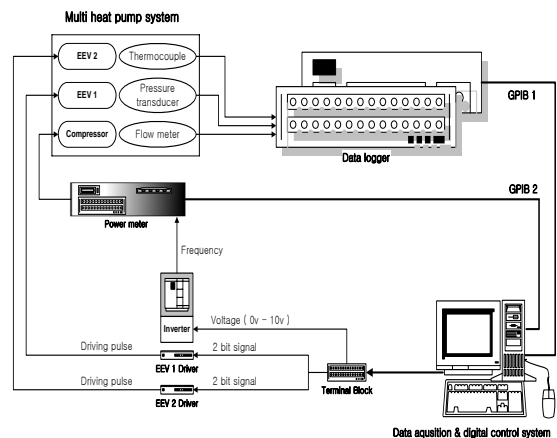


Fig. 2 Schematic diagram of measurement and control system.

Table 1 Test conditions for capacity modulation

Parameter	Condition
Outdoor Chamber(°C)	35DB/24WB
Indoor chamber #1(°C)	21DB/15.5WB~32DB/22.5WB
Indoor chamber #2(°C)	27DB/19.5WB
EEV opening(step)	Modulated COP
Compressor speed (Hz)	30 ~ 63

3. 다변수 제어기 설계

3.1 시스템 모델링

시스템 히트펌프의 제어를 위해서는 시스템의 동적 모델링이 필요하다. 본 연구에서는 시스템 규명기법⁽⁵⁾(System identification)을 이용하여 히트펌프 시스템의 동적 모델식을 실험적으로 구하였다.

본 연구 대상인 2실형 시스템 히트펌프의 용량 조절 특성 결과로부터 시스템의 입력으로 압축기 회전수와 EEV 1, 2의 개도변화를 선정하고, 출력으로 실내기 1, 2의 공기 출구 온도와 압축기 입구 과열도를 사용하였으며, 히트펌프 시스템을 다중 입출력(MIMO: Multi input multi output) 구조의 상태공간 모델로 가정하여 동적 모델을 구하였다. 압축기 상태공간 모델의 상태 매트릭스 등은 Prediction Error Algorithm을 사용하여 구하였으며, 유일한 모델의 계수를 구하기 위해 넓은 범위의 주파수 성분을 포함하는 PRBS (Pseudo random binary sequence)신호를 입력으로 시스템 규명을 수행하였다.⁽⁵⁾

Fig. 3은 실내기 #1 및 #2측 입구 공기 온도는 27°C DB/ 19.5°C WB, 실외온도는 35°C DB/ 24°C WB로 고정하고, 시스템이 가지는 전달지연을 고려하여 샘플링 시간은 10초로 설정하고 압축기 속도는 53과 63Hz, EEV1 개도는 175와 195스텝, EEV2 개도는 150과 170스텝의 PRBS 입력에 대한 압축기 입구 과열도와 실내기 #1 및 #2의 토출 공기 온도 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3의 결과로부터 시스템 규명에 의한 상태공간 형태의 동적모델을 구하였다(식 (1)). 여기서, A, B, C, D 매트릭스는 각각 상태 매트릭스, 입력

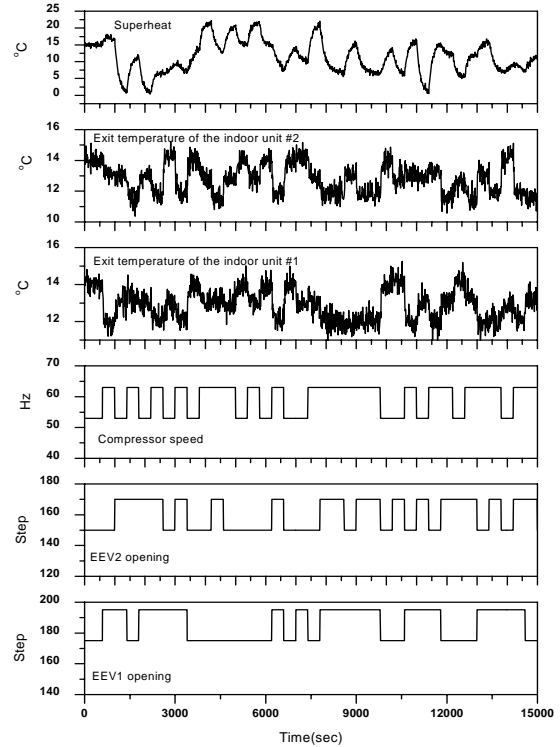


Fig. 3 PRBS test results for MIMO system identification.

매트릭스, 출력매트릭스, 전이매트릭스를 나타낸다. 조작량 u_1, u_2, u_3 는 각각 EEV1, EEV2 및 압축기 주파수를 나타내며, 제어량 y_1, y_2, y_3 는 각각 실내기 1과 2의 공기토출온도와 압축기 입구 과열도를 나타내며, x 는 상태변수를 나타낸다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (1)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k)$$

3.2 적분형 최적레귤레이터

최적 레귤레이터 시스템이란 물리적인 제약조건하에서 제어대상 시스템의 성능 지수(Performance index)를 최적화 시킨 시스템을 의미한다.

본 연구에서 제어기의 조작량은 성능지수를 최소화함으로써 얻어질 수 있으며, 식 (2) 형태의 성능지수 값이 최소가 되도록 조작량을 선정하였다. 본 제어기의 상태변수는 full-order estimator를 사용하여 추정하였으며, 시스템 출력치를 설정치에 추종시키기 위한 적분 보상기를 부가한 적분형 최적 레귤레이터 제어기를 사용하였다. 상태변수와 제어기의 조작량 및 상태공간 모델의

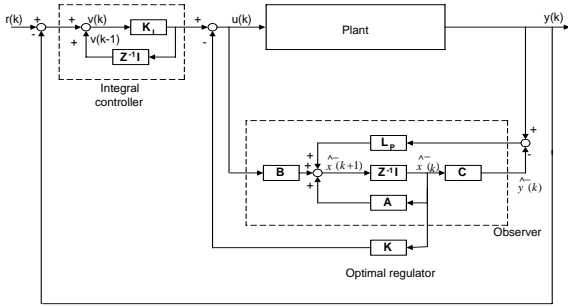


Fig. 4 Block diagram for integral optimum regulator.

유도과정은 참고문헌⁽⁶⁾과 같다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 다중입출력 적분형 최적레귤레이터 제어기의 블록선도를 나타낸다.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} [x^T(k) Q_1 x(k) + u^T(k) Q_2 u(k)] \quad (2)$$

적분형 최적 레귤레이터법은 플랜트 모델에 근거하므로 이를 구현하기 위해서는 플랜트 모델이 필요하며, 플랜트 모델은 전철의 시스템 모델링에서 PRBS 신호를 이용한 시스템 규명 결과를 적용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 히트펌프의 용량 조절 성능 특성

Fig. 5는 전자팽창밸브의 개도는 고정하고 실내기 1의 입구 공기 온도 변화에 따른 각 실내기의 냉매 유량과 냉방용량 변화를 나타낸다. 실내기 1측의 입구 공기 온도 증가로 실내기 2측의 냉방용량은 미소량 감소하였으나, 실내기 1측의 냉방용량은 크게 증가하였다. 이는 각 실내기를 통과하는 냉매유량은 변화가 미비하였으나, 실내기 2는 증발온도 증가로 냉매와 공기와의 온도차이가 미소량 감소하였고, 실내기 1측은 입구 공기 온도 증가로 냉매와 2차유체와의 평균 열교환 온도차가 증가하였기 때문이다.

Fig. 6은 전자팽창밸브 1의 개도를 변화시키고 주어진 상태에서 시스템이 최대의 COP를 갖도록 전자팽창밸브 2의 개도를 조절한 경우의 실내기 1과 2의 냉방용량을 나타낸다. 전자팽창밸브 1의

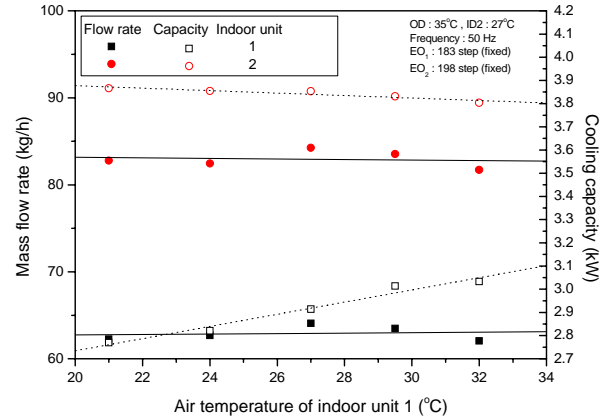


Fig. 5 Variations of cooling capacity and mass flow rate as a function of the inlet air temperature of indoor unit #1.

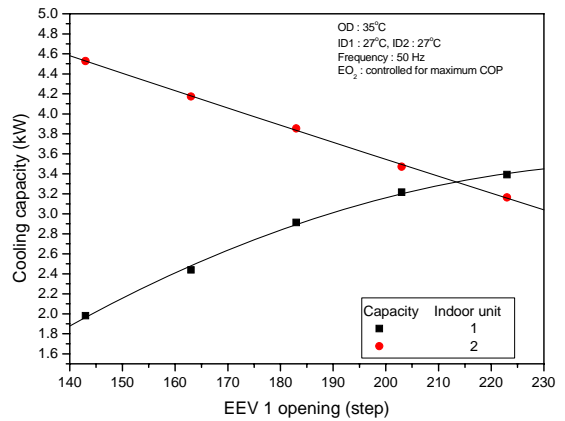


Fig. 6 Variation of cooling capacity as a function of EEV1 opening.

개도를 증가시키에 따라 실내기 1의 냉방용량은 냉매유량이 커져 증가하였으며, 실내기 2측의 냉방용량은 냉매유량 감소로 줄어들었으며, 전체적인 냉방용량은 감소하였다. 전자팽창밸브 1의 개도를 증가시킨 경우 시스템이 최대의 COP를 갖기 위해서 전자팽창밸브 2의 개도는 감소하였다.

Fig. 7은 실내기간 온도차이가 5°C일 때 각 주파수 영역에서 복수 전자팽창밸브 조절을 통한 용량 조절 특성을 나타낸 것이다. 모든 압축기 주파수 영역에서 전자팽창밸브 1과 2의 개도 조합에 따른 용량 조절특성은 Fig. 6과 유사한 경향을 나타냈다. 그러나, 압축기의 주파수가 증가함에 따라 전자팽창밸브 개도 변화에 따른 각 실내기의 용량차이가 더 크게 나타났다. 그러므로 각 실내기가 필요로 하는 냉방용량을 효과적으로

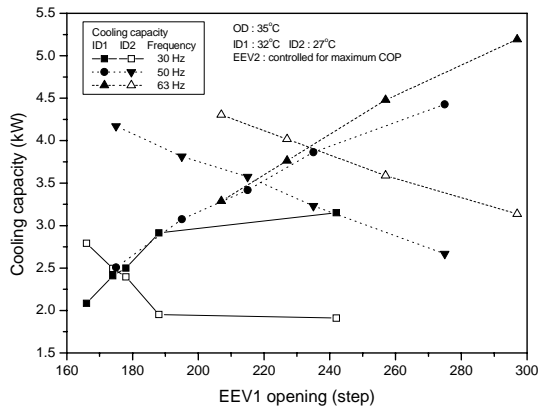


Fig.7 Variation of cooling capacity as a function of EEV1 opening and compressor speed.

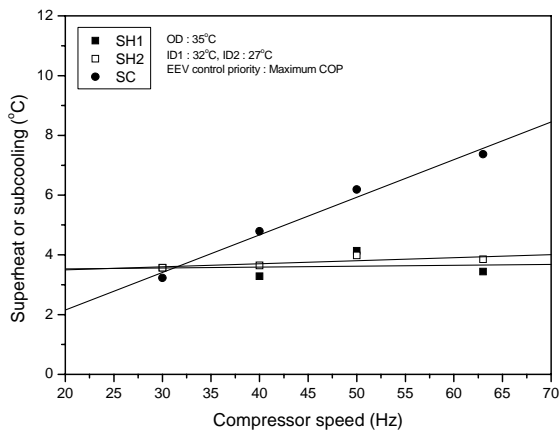


Fig. 8 Variations of superheat and subcooling as a function of compressor speed.

조절하기 위해서는 압축기와 복수의 팽창밸브를 동시에 조절하여야 한다. 그러므로, 복수의 실내기를 갖는 히트펌프 시스템의 용량 조절 및 성능 최적화를 위해서는 다중입출력(MIMO: Multi Input Multi Output) 제어기법이 적용되어야 한다. Fig. 8은 Fig. 7과 동일부하 조건에서 압축기 주파수 변화시에 시스템이 최대의 효율을 갖도록 전자팽창밸브 1과 2를 조절한 경우의 과냉도와 과열도를 나타낸다. 압축기 주파수가 증가하여도 각 실내기 과열도는 4°C 부근에서 최대의 COP를 나타냈으며, 과냉도는 주파수와 비례하여 증가하였다. 그러므로 시스템을 효율적으로 운전하기 위해서는 부하조건에 따라 압축기 주파수 변화와 전자팽창밸브 1과 2로 실내기 1 및 2의 출구 과

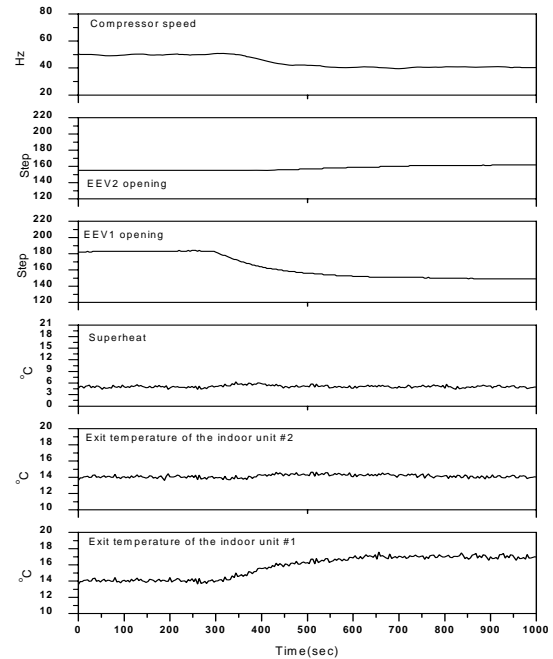


Fig. 9 Control results when the setpoint of the air temperature of ID #1 was changed from 14°C to 17°C.

열도를 각각 4°C 각각 제어할 경우 최대의 성능을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 최적 적분형 레귤레이터 제어 특성

용량조절 성능 특성 실험으로부터 2실형 시스템 히트펌프는 복수의 전자팽창밸브 개도와 압축기 회전수는 서로 강하게 결합되어 실내기 각각의 용량에 상호 영향을 미치고 있는 다중입출력 시스템을 알 수 있었다. 그러므로 다중입출력 구조의 상태공간 기법을 적용한 적분형 최적 레귤레이터 제어를 설계하여 시스템에 적용하였다. 외란으로 실내기 토출공기 설정온도와 과열도를 변화시켰으며, 압축기 회전수와 전자팽창밸브 1, 2를 제어기의 조작량으로 사용하였다.

Fig. 9는 실외온도 35°C DB/ 24°C WB, 실내기 #1, #2의 입구 공기온도는 27°C DB/ 19.5°C WB로 유지하면서 실내기 #1의 토출공기 설정온도를 14°C에서 17°C로 증가시킨 경우의 제어기 성능 결과이다. 실내기 #1의 토출 공기온도가 오버슈트 없이 설정온도를 추정하였으며, 실내기 #2의 토출공기 온도와 과열도가 큰 변화없이 안정적인 특성을 나타내었다. 설정온도가 안정화되

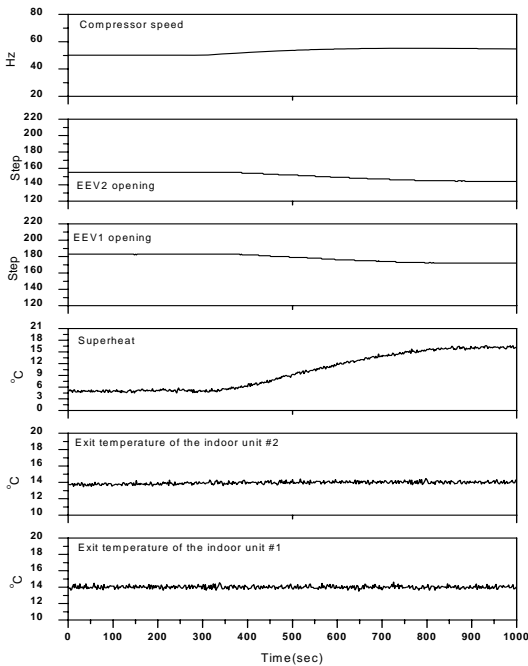


Fig. 10 Control results when the setpoint of the superheat was changed from 5°C to 15°C.

는데 약 4분30초가 소요되었으며, 이는 히트펌프 시스템의 열관성을 고려한다면 매우 만족할 만한 결과이다.⁽⁶⁾

Fig. 10은 표준부하 조건에서 과열도 설정치를 10°C 증가시킨 경우의 제어 성능이다. 압축기 최종 주파수가 상승하였으며, 전자팽창밸브 1과 전자팽창밸브 2의 개도가 감소하였다. 실내기 토출 공기 온도는 변동이 거의 없었으나, 과열도가 안정되는데 실내기 토출 공기온도 설정치 변경시보다 다소 오랜시간이 소요되었으나 추종성 측면에서 만족할 만한 결과이다.⁽³⁾ 다소 안정시간이 오래 걸린 것은 과열도는 압력계를 이용하여 포화 온도를 구하고 흡입온도와 차이로부터 계산되는데, 압력계의 변동폭이 커서 과열도가 요동할 수 있으므로 제어기에서 조작량 출력값이 작게 변화했기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 시스템 히트펌프를 2실형 시스템 히트펌프로 모사하여 실내기간 용량 조절 및 다중입출력 구조의 적분형 최적레귤레이터 제어 실험을 수행하였다. 전자팽창밸브의 개도를 고정

한 경우 실내기 1의 부하변화는 실내기 2의 용량 변화에 큰 영향을 미치지 않았다. 하지만, 실내기 1의 부하 변동에 대응한 용량 조절을 위하여 전자팽창밸브 1의 개도 변경시에 실내기 2의 용량 변화가 발생하였으며, 압축기 주파수 변화시에도 동일한 경향을 나타냈다. 그러므로, 2실형 히트펌프의 주파수 변화 및 복수 전자팽창밸브 조절을 통한 각 실내기의 유량분배 및 용량 조절 계통이 제어 출력간의 상호관계가 큰 다중입출력 시스템임을 알 수 있었다. 상태공간 모델의 다중 입출력 구조를 갖는 적분형 최적 레귤레이터 제어기는 2실형 시스템 히트펌프의 용량 조절 변수인 실내기 토출 공기 온도와 시스템 최적화 변수인 과열도를 적절히 제어하였다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원기술개발 사업(2006-E-CM11-P-05-3-010)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jung, D. S., Kim, M., Kim, M. S., 1999, PID control of multi-type heat pump system, Proceedings of the SAREK, pp. 541-545.
2. Matsuoka, F. and Nagatomo, H., 1988, Dynamic response and electrical control for the air conditioner, Trans. of the JAR, Vol. 5, No. 1, pp. 43-54.
3. Yasuda, H., et al. 1992, Evaporator superheat control by an electrically driven expansion valve, Trans. of the JAR, Vol. 5, No. 2, pp. 147-156.
4. Fujita, Y., Kubo, T. and Suma, S., 1992, Multi air conditioner with two indoor units, Refrigeration, Vol. 67, No. 772, pp. 171-176.
5. Landau, I., 1990, System Identification and Control Design, Prentice Hall.
6. 近勝功, 三宅薺和, 相良正志, 順田信英, 昭和61年, 電子膨張弁とインバータによる冷凍サイクルの2變數制御, 日本冷凍協會學術講演會講演論文集. pp. 77-80.