

멀티형 히트펌프 전자팽창밸브의 디더 신호를 적용한 과열도 제어

한도영[†], 표수환^{*}

국민대학교 기계·자동차 공학부, ^{*}국민대학교 기계공학과 대학원

EEV Superheat Control of a Multi-type Heat Pump by Using Dither Signal

Doyoung Han[†], Soohwan Pyo^{*}

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

^{*}Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received April 4, 2002; revision received September 23, 2002)

ABSTRACT: The electronic expansion valve (EEV) may be used to control the refrigerant flow rate for the multi-type heat pump. Stepping motor driven EEV may precisely control the refrigerant flow rate to meet each internal load requirement. To control the EEV, PI algorithm may be used. But the hysteresis of EEV deteriorates the performance of superheat control. To reduce the performance degradation, the PI algorithm along with the dither signal may be used. The dither signal, with about 10 times higher frequency than the system crossover frequency and about 10 times larger magnitude than the deadband of hysteresis, was selected for the superheat control of EEV. Experimental results showed the improvement of EEV control by adding the dither signal to the PI algorithm.

Key words: Electronic expansion valve(전자팽창밸브), Hysteresis(이력), Superheat control(과열도 제어), Dither signal(디더신호), PI control algorithm(비례-적분 제어 알고리즘), Crossover frequency(교차주파수)

기 호 설 명

- SH : 과열도 [$^{\circ}C$]
- K_E : 정상상태 게인
- T_d : 시간지연 [s]
- K_P : 비례 게인
- K_I : 적분 게인

그 리 스 문 자

- τ : 시정수 [s]

1. 서 론

멀티 에어컨에서 각 실내 부하요구를 만족시키기 위해 각 실내기로 냉매를 적절히 분배할 수 있는 전자팽창밸브의 사용이 증대되고 있다. 한대의 실외기에서 여러 대의 실내기로 분배되는 배관을 연결하는 방법에 따라 실외기 집중형, 중간 분류기형, Y-분지기형으로 구분할 수 있으며 배관설계방법에 따른 실내기의 성능차이를 보완하기 위하여 적절한 냉매유량 제어 알고리즘이 연구 개발되고 있다.⁽¹⁾ 멀티형 히트펌프의 과열도를 제어하기 위해 설정 과열도와 측정 과열도의 차를 사용하여 전자팽창밸브를 개폐함으로써 실내 부하에 따른 냉매유량을 제어한다.^(2,3) 멀티 에어컨에서 적절한 냉매분배는 실내 환경조성에 중요한 요인으로 일대일 에어컨과 비교해 시스템의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: dyhan@kookmin.ac.kr

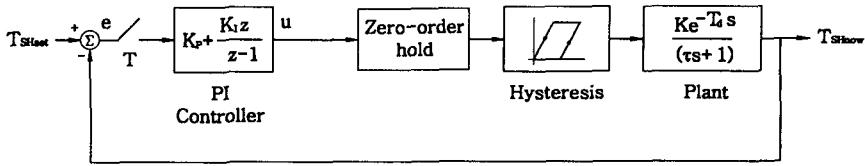


Fig. 1 PI algorithm without dither signal.

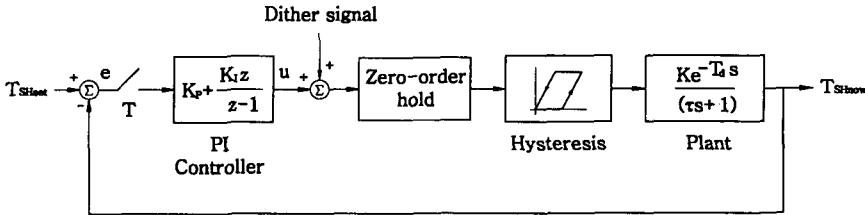


Fig. 2 PI algorithm with dither signal.

외란, 비선형성, 밸브의 히스테리시스 등으로 인하여 증발기 입·출구의 과열도 제어가 어렵다. 특히 과열도 제어시 전자팽창밸브의 비선형성인 히스테리시스⁽⁴⁾로 인하여 정상상태에서 오실레이션 현상과 정상상태 에러가 발생한다. 이를 저감하기 위하여 밸브 제어신호에 시스템의 주기 및 진폭을 고려한 고주파신호의 디더신호⁽⁵⁾를 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 PI 제어 알고리즘을 사용한 전자팽창밸브 제어에 디더신호를 첨가하여 밸브의 히스테리시스 영향을 저감시키는 제어 알고리즘을 개발하고 적용한 후 실험을 통하여 검증하는 것을 목적으로 한다.

2. 시뮬레이션 결과

과열도 제어 시스템 시뮬레이션을 위하여 MATLAB 프로그램을 사용하였다. Fig. 1은 전자팽창밸브의 히스테리시스를 고려한 과열도 제어 시스템을 나타내고 있다. 적용된 히스테리시스의 데드밴드 폭은 실험을 통해 0.028로 선택하였으며 제어 시스템의 샘플링 시간은 2초로 선택하였다.

그림에서 보듯이 증발기 과열도 동적 모델을 식(1)과 같이 시간지연을 갖는 1차 시스템으로 가정하였으며

$$G(s) = \frac{\Delta SH}{\Delta CO} = \frac{K_E e^{-T_d s}}{\tau s + 1} \quad (1)$$

여기서, ΔSH 는 과열도 변화량, ΔCO 는 전자팽창

밸브의 개도 변화량을 의미하며 정상상태 실험을 통하여 K_E , τ , T_d 를 9, 22.5초, 3초로 선택하였다. 본 시스템에 사용된 제어 알고리즘은 식(2)와 같은 PI 디지털 제어를 사용하였으며

$$D(z) = K_P + \frac{K_I z}{z-1} \quad (2)$$

여기서, K_P 와 K_I 는 Ziegler-Nichols 조정방법을 사용한 후 제어반응을 주시하면서 각각 1/5씩 낮추어 0.3, 0.067로 선택하였다.^(6,7)

Fig. 2는 전자팽창밸브 히스테리시스로 인한 성능저하를 저감하기 위한 과열도 제어 시스템으로써 Fig. 1과 동일한 PI 제어기와 플랜트 동적 모델을 사용하였고, 전자팽창밸브의 히스테리시스로 인한 제어성능의 저하를 방지하기 위하여 디더신호를 밸브 제어신호에 첨가하였다.

디더신호의 진폭과 주파수는 히스테리시스의 데드 밴드 폭과 시스템의 교차주파수를 고려하여 선정하였다. Fig. 3은 디더신호의 진폭을 히스테리시스의 데드 밴드 폭 0.028의 1/10, 1/5, 1, 5, 10, 25, 50배하여 시뮬레이션을 수행한 결과로써 진폭이 0.028보다 작은 경우 정상상태에서 주기적으로 오실레이션하면서 제어되고 진폭이 0.028보다 클 경우 정상상태에서 오실레이션의 진폭이 감소하다가 진폭이 0.28보다 클 경우 정상상태에서 만족스럽게 제어되지만 초기 과도영역에서 제어성능이 점점 저하되는 경향이 나타났다.

Fig. 4는 디더신호의 주파수를 시스템의 교차

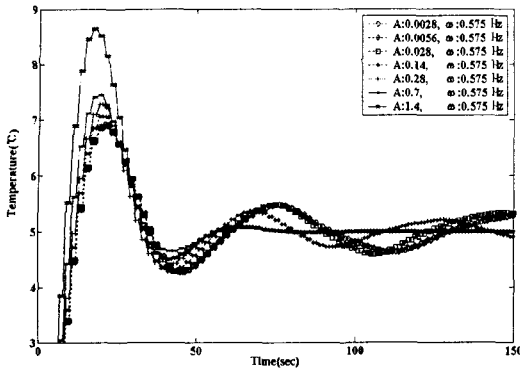


Fig. 3 The effect of the amplitude of dither signal.

주파수 0.023 Hz보다 저주파인 0.006 Hz, 0.012 Hz와 고주파신호인 0.023 Hz, 0.115 Hz, 0.575 Hz, 1.15 Hz, 2.3 Hz를 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있다. 0.023 Hz보다 저주파일 경우 정상상태에서 주기적으로 오실레이션하면서 제어되고, 0.023 Hz보다 고주파일 경우 오실레이션의 진폭이 감소되다가 0.23 Hz 이상의 고주파 디더신호에 대해 거의 동일한 히스테리시스 저감 효과가 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 진폭이 0.28이고 주파수가 0.575 Hz의 디더신호를 적용한 경우와 디더신호를 적용하지 않은 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림에서 점선은 PI 알고리즘만을 사용한 경우의 제어결과로 주기적인 오실레이션이 발생하는 것을 보여주고 있으며 실선은 동일한 PI 알고리즘에 디더신호를 적용한 경우의 제어결과로 PI 제어결과에 비해 정상상태에서 과열도 제어가 현저

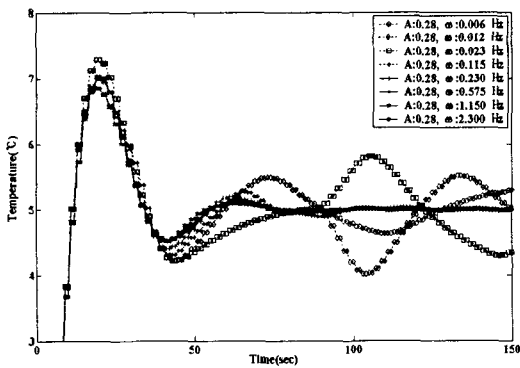


Fig. 4 The effect of the frequency of dither signal.

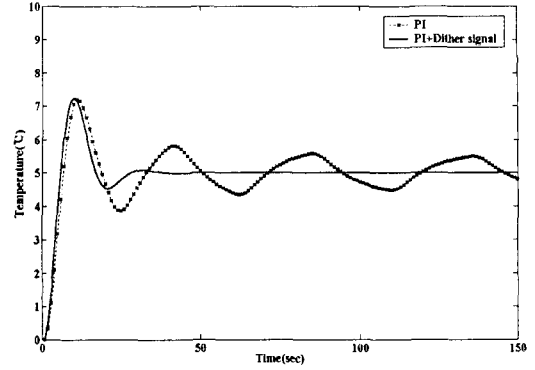


Fig. 5 Control results by PI and dither-signal-added PI.

히 향상됨을 보여준다.

3. 실험결과

3.1 실험장비

Fig. 6에 보듯이 실험장치는 동적 환경조성장치, 멀티형 히트펌프 시스템, 데이터 수집장치 등으로 구성되어 있다. 동적 환경조성장치를 사용하여 냉방 표준조건인 실외 온·습도를 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 $24 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 실내 온·습도를 $27 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 $19 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 데이터 수집장치는 실험을 통하여 측정된 유량, 온도, 압력 등의 각종 데이터를 실시간으로 저장하고 분석하는 역할을 한다.⁽⁸⁾ 선택된 멀티형 히트펌프 시스템은 Fig. 7과 같이 한 대의 실외기에 네 대의 실내기를 연결한 5마력의 히트펌프 시스템으로 시스템 사양은 Table

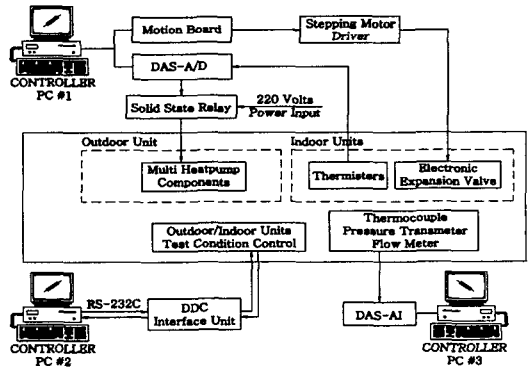


Fig. 6 Schematic diagram of test facility.

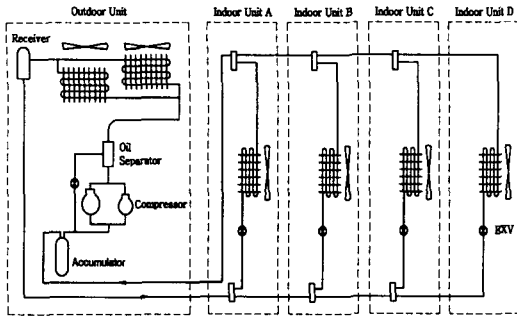


Fig. 7 Multi-type heat pump system.

Table 1 Multi-type heat pump specification

Component	Specification
Compressor	Rotary type S type 5686 W D type 8353 W
Condenser	Ø9.52 mm × 2R × 34S, 60 CMM
Evaporator	A, C, D Room Ø6.4 mm × 4R × 6S, 9 CMM Capacity : 3500 kcal/h
	B Room Ø6.4 mm × 4R × 6S, 6 CMM Capacity : 1800 kcal/h
EEV	1-2 phase, 480 [pulse]

1에 나타내고 있으며 실내기는 증발기 과열도 제어를 위하여 별도의 모션 제어기를 사용하여 전자팽창밸브 제어실험을 수행하였다.

본 연구를 위해 2마력 압축기를 구동하였으며 A실 단독운전의 경우 A실의 전자팽창밸브를, A실과 B실의 동시운전의 경우 A실과 B실의 전자팽창밸브를 사용하였으며 그외의 운전하지 않는 실의 전자팽창밸브는 닫은 상태에서 과열도 제어 실험을 수행하였다.

3.2 실험결과

Fig. 8은 용량이 3500 kcal/h인 A실 실내기만을 운전한 경우로써 설정 과열도를 5°C로 고정시킨 후 PI 알고리즘만으로 제어한 결과와 PI 알고리즘에 진폭, 주파수가 1스텝, 0.5 Hz인 디더신호를 적용한 경우의 실험결과를 비교하여 보여준다. 시뮬레이션에서 사용한 디더신호의 진폭 0.28은 정상상태에서의 전자팽창밸브 개도량에 따른 과열도 변화실험을 통해 1.2스텝으로 환산됨으로 1스텝으로 선정하여 실험하였다. 그림에서 보듯이 기동 후 560초 이후 정상상태 영역에 도달한 후 PI

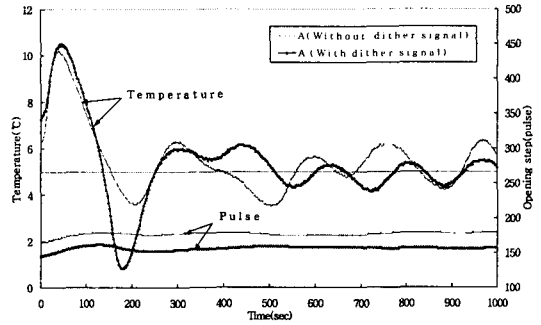


Fig. 8 Superheat control results of unit A.

알고리즘만을 적용한 경우 A실 실내기의 과열도 변화와 평균 오프셋은 각각 4.21~6.33°C, 0.59°C이고 전자팽창밸브 개도는 175~180스텝 범위에서 제어되고 있다. 반면에 PI 알고리즘에 디더신호를 첨가하여 제어한 경우 A실 실내기의 과열도 변화와 평균 오프셋은 각각 4.4~5.33°C, 0.35°C이고 전자팽창밸브 개도는 174~177스텝 범위에서 제어되어 디더신호를 적용한 경우 과열도 제어결과가 향상되었음을 보여준다. Fig. 9와 Fig. 10은 PI 알고리즘만으로 제어한 결과와 PI 알고

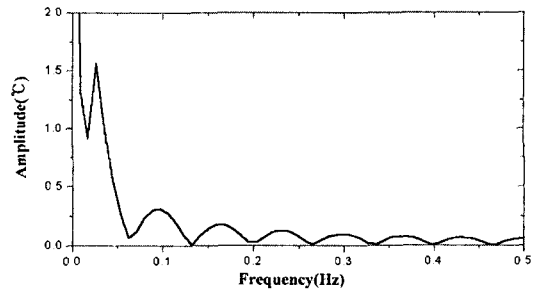


Fig. 9 Frequency analysis of PI control results of unit A.

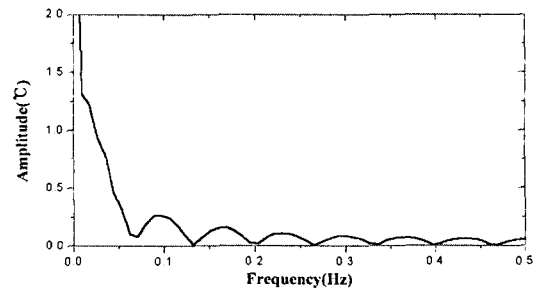


Fig. 10 Frequency analysis of dither-signal-added PI control results of unit A.

리즘에 디더신호를 첨가한 경우에 대한 제어성능 비교를 위해 정상상태에서의 과열도 제어결과를 푸리에 변환하여 주파수 분석한 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 주파수 분석결과 특히 0.027 Hz 성분이 과열도 오실레이션의 주된 주파수 성분으로 PI 알고리즘만으로 제어실험한 경우 A실 실내기 과열도 제어진폭이 1.56°C로 나타난 반면에 PI 알고리즘에 디더신호를 첨가하여 실험한 경우 동일 주파수에서 진폭이 0.94°C로 39.7%의 진폭 저감효과가 있음을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 용량이 3500 kcal/h인 A실 실내기와 용량이 1800 kcal/h인 B실 실내기의 설정 과열도를 5°C로 설정한 후 PI 알고리즘만으로 제어한 결과와 PI 알고리즘에 진폭, 주파수가 1 스텝, 0.5 Hz인 디더신호를 적용한 경우의 제어실험 결과를 각각 보여준다. 그림에서 보듯이 기동 후 640초 이후 정상상태 영역에 도달한 후 PI 알고리즘만을 적용한 경우 A실과 B실의 실내기 과열도 변화와 평균 오프셋은 각각 4.64~6.45°C,

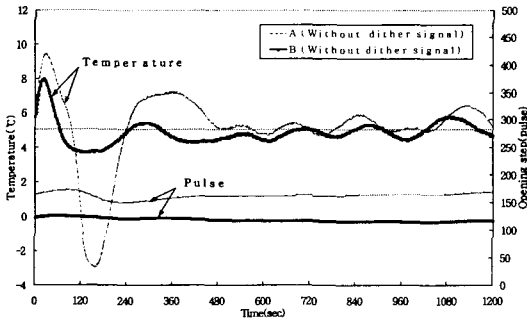


Fig. 11 Superheat control results of units A and B by PI control algorithm.

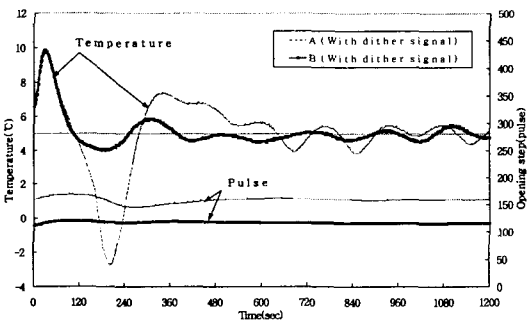


Fig. 12 Superheat control results of units A and B by dither-signal-added PI control algorithm.

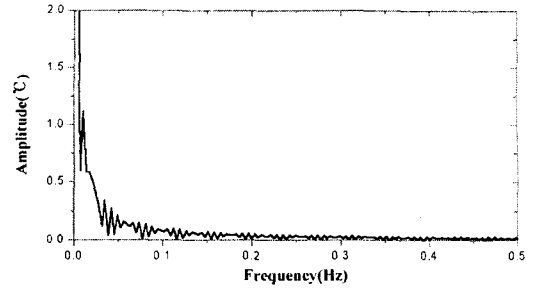


Fig. 13 Frequency analysis of PI control results of unit A.

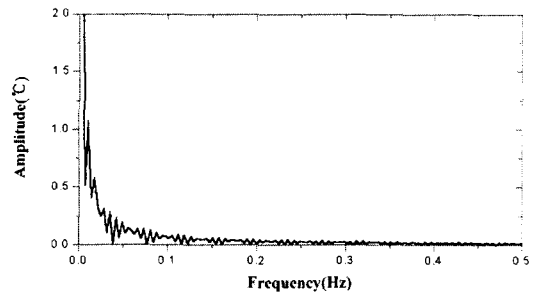


Fig. 14 Frequency analysis of PI control results of unit B.

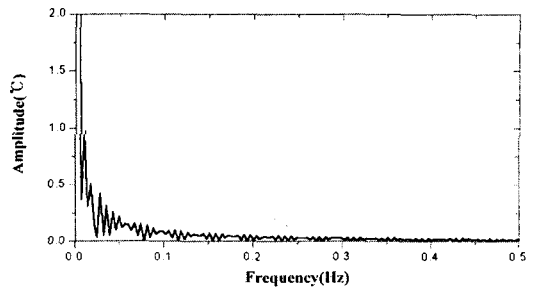


Fig. 15 Frequency analysis of dither-signal-added PI control results of unit A.

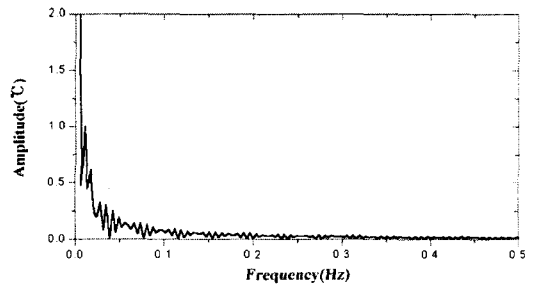


Fig. 16 Frequency analysis of dither-signal-added PI control results of unit B.

0.43°C와 4.41~5.74°C, 0.28°C이고 전자팽창밸브의 개도는 각각 162~169, 115~117스텝으로 제어되고 있다. 반면에 PI 알고리즘에 디더신호를 첨가하여 제어한 경우 A실과 B실의 실내기 과열도 변화와 평균 오프셋은 각각 3.85~5.48°C, 0.41°C와 4.53~5.5°C, 0.21°C이고 전자팽창밸브 개도는 각각 158~162, 115~117스텝으로 제어되어 디더신호를 적용한 경우 과열도 제어결과가 개선되었음을 보여준다. Fig. 13에서 Fig. 16까지 정상상태에서의 과열도 제어결과를 푸리에 변환하여 주파수 분석한 결과를 보여준다. 그림의 주파수 분석에서 보듯이 주파수 분석결과, 특히 0.011 Hz 성분이 복수 대 실내기 과열도 제어결과에 주된 성분으로써 한 대 실내기 과열도 제어에 비해 상대적으로 느리게 제어되고 있음을 보여주며 PI 알고리즘만을 사용한 경우 A실과 B실의 실내기 과열도 제어진폭이 1.12°C와 1.07°C로 나타난 반면 PI 알고리즘에 디더신호를 적용한 경우 과열도 제어진폭이 0.98°C와 1.0°C로 12.5%와 6.5%의 진폭 저감효과가 있음을 보여준다.

4. 결 론

멀티형 히트펌프에서 디더신호를 이용한 전자팽창밸브 과열도 제어실험을 통하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 과열도 제어 알고리즘을 효과적으로 개발하기 위하여 시간지연을 갖는 1차 시스템을 과열도 동적 모델로 가정하여 사용할 수 있음을 확인하였다.

(2) 과열도 제어실험에서 전자팽창밸브의 히스테리시스로 인하여 정상상태에서 주기적인 오실레이션이 발생함을 확인하였다.

(3) 시스템의 교차주파수와 히스테리시스의 데드 밸브 폭보다 10배 이상 큰 주파수와 진폭을 갖는 디더신호를 사용하여 히스테리시스에 의한 제어성능 저하를 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

(4) 멀티형 히트펌프 과열도 제어실험에서 PI 알고리즘에 진폭과 주파수가 1스텝과 0.5 Hz인

디더신호를 첨가하여 제어함으로써 한 대 실내기 과열도 제어 경우와 두 대 실내기 과열도 제어 경우 모두 밸브 개도 제어범위가 감소되고 과열도 제어결과가 향상됨을 확인하였다.

따라서 디더신호를 첨가한 PI 알고리즘을 과열도 제어에 적절히 사용할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Han, D. and Kwon, H., 1999, Zone temperature control of the multi-type heat pump system, Proceedings of the SAREK, pp. 611-616.
2. Higuchi, K., 1986, Electronic expansion valve and control, Refrigeration, Vol. 61, pp. 45-52.
3. Tassou, S. A. and Al-Nizari, H. O., 1993, Investigation of the effects of thermostatic and electronic expansion valves on the steady-state and transient performance of commercial chillers, Int. J. of Refrigeration, Vol. 16, No. 1, pp. 49-56.
4. Wallen, A., 1997, Valve diagnostics and automatic tuning, Proceeding of the American Control Conference, pp. 2930-2934.
5. Hsiao, F. H., 1997, Optimal controller for dithered systems with backlash or hysteresis, J. of Optimization Theory and Applications, Vol. 94, No. 1, pp. 87-113.
6. Outtagarts, A., 1997, The transient response of evaporator fed through an electronic expansion valve, Int. J. of Energy Res., Vol. 21, pp. 793-807.
7. Finn, P. D., 2000, Control and optimization issues associated with algorithm-controlled refrigerant throttling devices, ASHRAE Transactions, Vol. 106, Pt. 1.
8. Han, D. and Kim, K., 1998, Design and control of dynamic environmental chamber, Proceedings of the SAREK, pp. 656-661.