

## 퍼지로직 과열도 재설정 알고리즘을 사용한 멀티형 냉방시스템의 전자팽창밸브 제어

한도영<sup>†</sup>, 이상원<sup>\*</sup>

국민대학교 기계자동차공학부, \*국민대학교 기계공학과 대학원

### The EEV Control of the Multi-type Air-conditioning System by using a Fuzzy Logic Superheat Temperature Setpoint Reset Algorithm

Doyoung Han<sup>†</sup>, Sangwon Lee<sup>\*</sup>

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

<sup>\*</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received October 22, 2002; revision received March 27, 2003)

**ABSTRACT:** Refrigerant flow rates of the multi-type air-conditioning system can be regulated by electronic expansion valves (EEV). The performance of the multi-type air-conditioning system may be improved by lowering the superheat at the compressor suction side. In this study, a superheat temperature setpoint reset algorithm was developed by using fuzzy logics, and a PI algorithm was applied to control the superheat temperature near setpoints. Experimental results showed energy savings and stable operations at a multi-type air-conditioning system. Therefore, the developed setpoint reset algorithm may be effectively used for the EEV superheat temperature control of the multi-type air-conditioning system.

**Key words:** Multi-type air-conditioning system(멀티형 냉방시스템), Electronic expansion valve(전자팽창밸브), PI control(PI 제어), Fuzzy logic(퍼지로직), Superheat temperature control(과열온도 제어), Superheat temperature setpoint reset algorithm(과열온도 재설정 알고리즘), Energy efficiency ratio(에너지 효율)

#### 기호 설명

$S_e$  : 목표 과열도 설정온도와 현재 과열도  
설정온도의 차 [°C]  
 $SH$  : 과열도 [°C]  
 $\Delta SH$  : 과열도 변화량 [°C]  
 $SH_e$  : 과열도 설정온도와 과열도의 차 [°C]  
 $SH_{set}$  : 과열도 설정온도 [°C]

$t_e$  : 정착시간 [s]  
 $u(\Delta S_e)$  : 과열도 설정온도 변화량 [°C]  
 $u(t_c)$  : 유지시간 [s]

#### 1. 서론

한 대의 실외기를 사용하여 다양한 실내 환경을 조성할 수 있는 멀티형 냉방시스템<sup>(1)</sup>에 대한 사용자의 관심과 요구가 증가하고 있으며 이에 따라 가능한 한 적은 에너지를 사용하면서 각 실의 냉방용량을 적절히 제어하고 안전을 위해 압축기로의 액냉매 유입을 방지하기 위한 압축기 입구의 과열도 제어에 대한 연구가 활발히 진행

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

되고 있다. 다양한 운전조건에서 가동되는 멀티형 냉방시스템은 조건에 따라 동적 특성이 다양하게 변하게 되어 과열도 제어가 용이하지 않으므로 필요 이상으로 과열도 설정온도를 높게 설정하여 제어함으로써 에너지가 과소비되고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 과열도 제어기의 성능을 향상시켜 낮은 과열도 설정온도에서도 제어가 가능하도록 과열도 제어 알고리즘을 개발하여 사용하기도 하지만 아직도 멀티형 냉방시스템의 큰 변화특성 때문에 압축기로의 액냉매 유입현상이 발생하여 압축기의 고장원인이 되고 있는 실정이다.

과열도를 정밀하게 제어하기 위해 전자팽창밸브<sup>(2,3)</sup> 사용이 증가하고 있다. 전자팽창밸브를 사용한 과열도 제어를 위하여 밸브 개도 변화에 따른 과열도 변화를 시간지연을 갖는 일차 시스템으로 가정하여 밸브 개도가 증가할 경우와 감소할 경우에 대한 동적 모델<sup>(4)</sup>을 구한 후 PI 제어 알고리즘을 개발하여 전자팽창밸브 제어<sup>(5)</sup>에 적용하였다. 또한, 전자팽창밸브의 히스테리시스<sup>(6)</sup>로부터 오는 성능저하를 감소시키기 위해 전자팽창밸브 제어 신호에 디더 신호를 첨가한 디더 신호 적용 과열도 제어 알고리즘<sup>(7)</sup>을 개발하여 보다 정밀한 과열도 제어에 사용하였다. 그러나 고정된 과열도를 제어하는 연구는 많이 진행되었으나 조건에 따라 과열도 설정을 재설정하여 에너지를 절약하고<sup>(8)</sup> 압축기로의 액냉매 유입을 방지하는 강인한 제어 방법에 대한 연구는 매우 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 퍼지이론을 사용한 과열도 재설정 알고리즘을 개발하여 멀티형 냉방시스템에 적용함으로써 에너지 사용을 절약하고 또한 압축기의 액냉매 유입을 방지시켜 성능을 향상시키는 것을 목적으로 한다.

2. 과열도 재설정 알고리즘

증발기 출구 과열도의 효율적인 제어를 위한 과열도 제어시스템은 Fig. 1에서 보듯이 요구 과

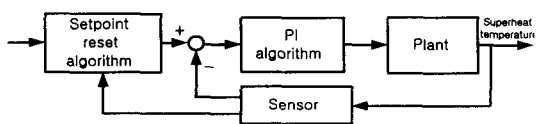


Fig. 1 Evaporator superheat temperature control system.

열도를 설정하는 과열도 재설정 알고리즘과 설정된 과열도로 증발기 출구 과열도를 제어하는 단위 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 단위 제어 알고리즘으로는 PI 알고리즘을 선택하였고 과열도 재설정 알고리즘은 냉동기의 에너지 절약과 압축기 액압축 방지를 고려한 퍼지 제어 알고리즘을 사용하였다. 퍼지 제어 알고리즘의 퍼지 제어는 퍼지화, 퍼지추론, 비퍼지화 과정으로 진행되며 퍼지화를 통해 제어기 입력값을 입력 소속함수로 바꿔 주고 제어규칙을 사용하여 퍼지 추론과정을 거친 후 다시 출력 소속함수를 통해 제어기 출력값으로 변환시킨다.

Fig. 2는 퍼지 알고리즘을 사용한 과열도 재설정 알고리즘을 보여준다. 그림에서 보듯이 과열도 재설정 알고리즘은 설정온도 감소 알고리즘과 설정온도 증가 알고리즘으로 구성되어 있다. 과열도 설정온도를 감소시켜 주는 설정온도 감소 알고리즘은 과열도 제어가 설정온도의 일정범위 내에서 일정시간 유지되면 설정과열도를 일정량 감소시키는 알고리즘으로서 퍼지 알고리즘에 의해 설정과열도 감소량( $u(\Delta S_e)$ )과 유지시간( $u(t_c)$ )이 결정된다. 마찬가지로 과열도 설정온도를 증가시켜 주는 설정온도 증가 알고리즘은 과열온도

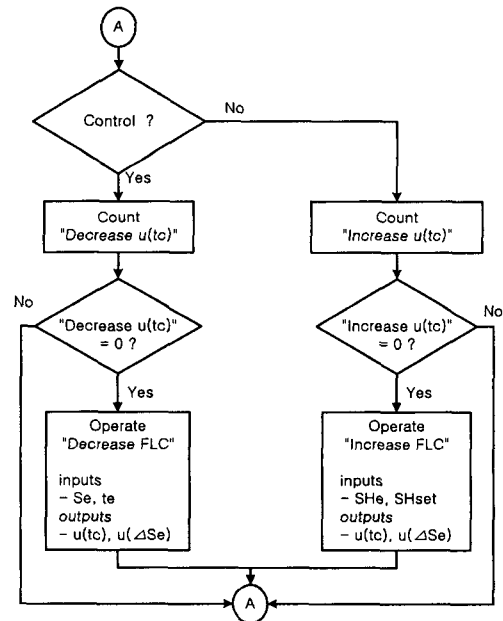


Fig. 2 Evaporator superheat set temperature algorithm.

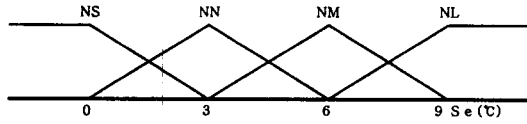


Fig. 3 Membership of input  $S_e$  for setpoint decrease algorithm.

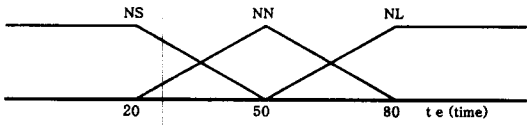


Fig. 4 Membership of input  $t_e$  for setpoint decrease algorithm.

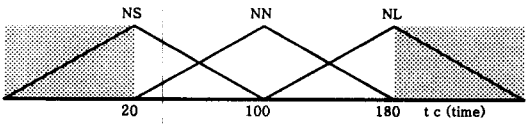


Fig. 5 Membership of output  $u(t_c)$  for setpoint decrease algorithm.

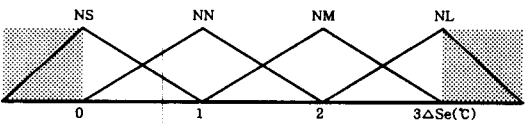


Fig. 6 Membership of output  $u(\Delta S_e)$  for setpoint decrease algorithm.

Table 1 Rules for setpoint decrease algorithm

Outputs	$t_e$	$S_e$			
		NS	NN	NM	NL
$u(t_c)$	NS	NN	NN	NS	NS
	NN	NL	NN	NN	NS
	NL	NL	NL	NN	NN
$u(\Delta S_e)$	NS	NS	NN	NM	NL
	NN	NS	NS	NN	NM
	NL	NS	NS	NS	NN

제어가 설정온도의 제어범위를 일정시간 벗어나면 설정과열도를 일정량 증가시키는 알고리즘으로서 퍼지 알고리즘에 의해 설정과열도의 증가량 ( $u(\Delta S_e)$ )과 유지시간 ( $u(t_c)$ )이 결정된다.

설정온도 감소 알고리즘에 사용한 입력  $S_e$ 와  $t_e$ 에 관한 소속함수가 Fig. 3과 Fig. 4에, 출력  $u(t_c)$ 와  $u(\Delta S_e)$ 에 대한 소속함수가 Fig. 5와 Fig. 6에,

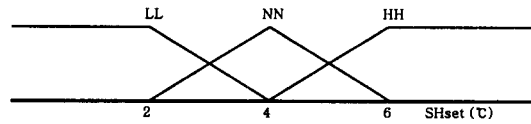


Fig. 7 Membership of input  $SH_{set}$  for setpoint increase algorithm.

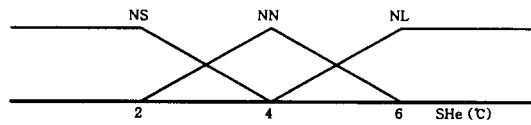


Fig. 8 Membership of input  $SH_e$  for setpoint increase algorithm.

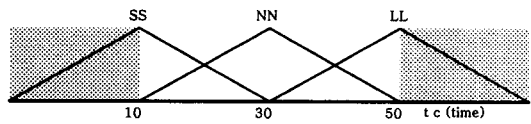


Fig. 9 Membership of output  $u(t_c)$  for setpoint increase algorithm.

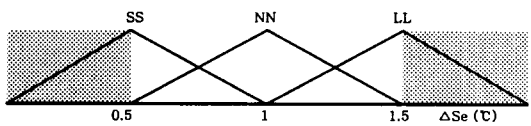


Fig. 10 Membership of output  $u(\Delta S_e)$  for setpoint increase algorithm.

Table 2 Rules for setpoint increase algorithm

Outputs	$SH_e$	$SH_{set}$		
		HH	NN	LL
$u(t_c)$	NS	LL	LL	NN
	NN	LL	NN	SS
	NL	NN	SS	SS
$u(\Delta S_e)$	NS	SS	SS	NN
	NN	SS	NN	NN
	NL	NN	NN	LL

그리고 사용한 규칙이 Table 1에 나타나 있다. 또한, 설정온도 증가 알고리즘에 사용된 입력  $SH_{set}$ 과  $SH_e$ 에 관한 소속함수가 Fig. 7과 Fig. 8에, 출력  $u(t_c)$ 와  $u(\Delta S_e)$ 에 대한 소속함수가 Fig. 9와 Fig. 10에, 그리고 사용한 규칙이 Table 2에 나타나 있다. 여기서 N은 Negative, S, N, M L은 Small, Normal, Middle, Large, LL, NN, HH는

Low, Normal, High를 의미하며 추론방법은 최소 최대법을 사용하였고 출력을 위한 비퍼지화 방법은 무게중심법을 사용하였다.<sup>(9,10)</sup>

### 3. 실험장치

실험장치는 Fig. 11에 보듯이 멀티형 냉방시스템 실험 환경조성을 위한 동적 환경조성 챔버, 전자팽창밸브 제어를 위한 멀티형 냉방기와 제어 시스템, 데이터 수집과 분석을 위한 데이터 획득 장비로 구성되어 있다.

실내 및 실외환경을 조성하기 위하여 사용된 동적 환경조성 챔버는 온도  $-5\sim 40^{\circ}\text{C}$ , 습도  $20\sim 90\%$ 의 제어성능을 갖는 실외기용 챔버 1개와 온도  $15\sim 30^{\circ}\text{C}$ , 습도  $20\sim 90\%$ 의 제어성능을 갖는 실내기용 챔버 4개로 구성되어 있다.<sup>(11)</sup>

멀티형 냉방시스템은 Fig. 12와 같이 한 대의 실외기에 네 대의 실내기를 연결한 5마력의 냉방시스템으로 시스템 사양은 Table 3에 나타나 있으며, 증발기 과열도 제어를 위하여 별도의 모션 제어기를 사용하여 전자팽창밸브 제어실험을 수

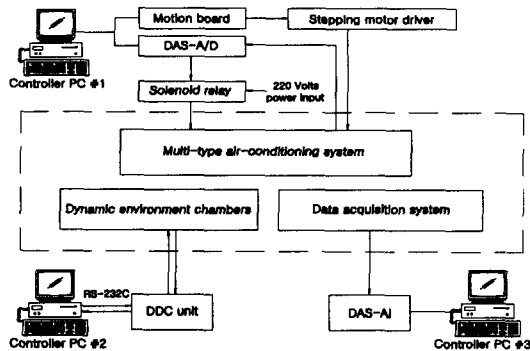


Fig. 11 Schematic diagram of test facility.

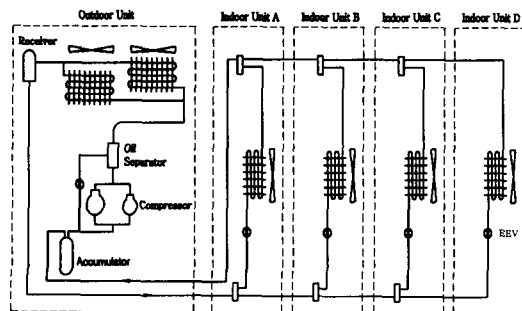


Fig. 12 Multi-type air-conditioning system.

Table 3 Multi-type air-conditioning system specification

Component	Specification
Compressor	Rotary type No. 1 : 5686 W / No. 2 : 8353 W
Condenser	$\varnothing 9.52\text{ mm} \times 2\text{ Row} \times 34\text{ Step}$ , $1\text{ m}^3/\text{s}$
Eva-porator	A, C, D Room $\varnothing 6.4\text{ mm} \times 4\text{ Row} \times 6\text{ Step}$ , $0.15\text{ m}^3/\text{s}$ Capacity : 4000 W
	B Room $\varnothing 6.4\text{ mm} \times 4\text{ Row} \times 6\text{ Step}$ , $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ Capacity : 2000 W
EEV	1-2 phase, 480 [pulses]

행하였다.<sup>(7)</sup>

상태값의 변화를 측정하기 위해 데이터 획득장치를 사용하였으며 사용된 센서는 온도측정을 위해 T형 열전대를 사용하였고 압력은 측정범위  $0\sim 3.4\text{ MPa}$ 를 갖는 압력 변환기를 사용하여 실험 결과를 출력하도록 구성하였다.<sup>(12)</sup>

### 4. 실험결과

전자팽창밸브 과열도 제어실험을 수행하기 위하여 5,686 W 압축기 한 대, 4,069 W 실내기 한 대, 2,093 W 실내기 한 대를 선택하였다. PI 제어 알고리즘에 사용된 비례 및 적분 계인은 Ziegler-Nichols의 조정방법<sup>(13)</sup>을 사용하여 구한 후 과열도 제어실험을 통해 수정하였으며, 수정된 계인을 사용하여 한국표준규격협회에서 정한 냉방표준조건<sup>(14)</sup>에서 과열도 고정설정 제어실험과 과열도 재설정 제어실험을 수행하였다.

#### 4.1 과열도 고정설정 제어실험

과열도의 설정온도를  $7^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$ ,  $2^{\circ}\text{C}$ 로 각

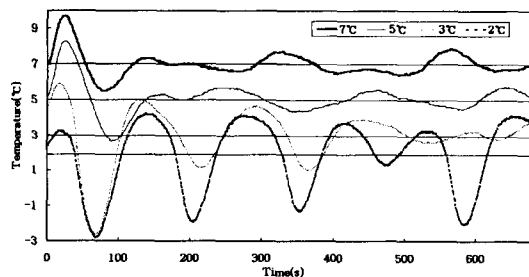


Fig. 13 Superheat temperature fixed setpoint control for unit A.

각 고정된 후 A실 실내기를 사용하여 과열도 제어실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 과열도 설정온도를 7°C, 5°C, 3°C로 고정하여 제어실험한 경우 정상상태에서 평균 EER은 1.61 kcal/h/W, 1.84 kcal/h/W, 2.01 kcal/h/W로 나타나 설정온도가 낮아짐에 따라 EER이 상승하였으며, 과열도를 2°C로 설정하였을 경우 과열도 제어결과가 0°C 이하로 내려가는 구간이 나타나 압축기로의 액냉매 유입현상이 나타남이 확인되었다.

4.2 과열도 재설정 제어실험

냉방 표준조건에서 A실 실내기 한 대만을 사용

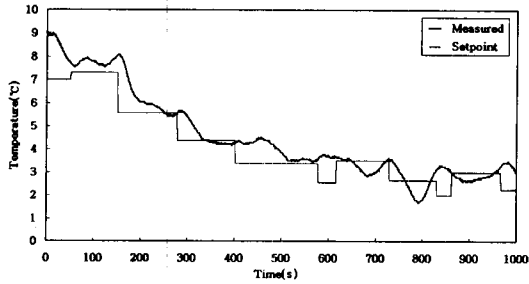


Fig. 14 Superheat temperature variable setpoint control for unit A.

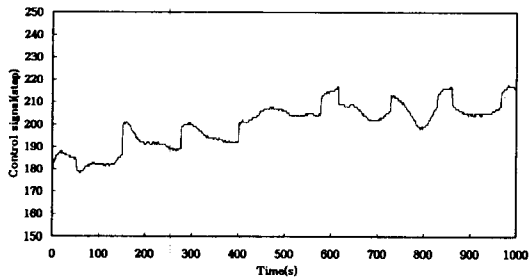


Fig. 15 EEV control signal for unit A.

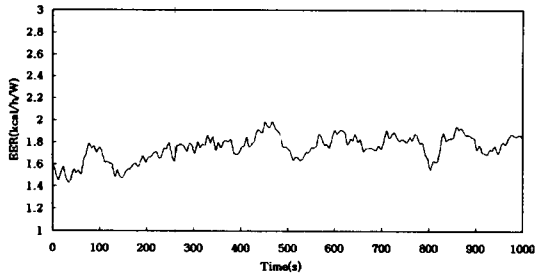


Fig. 16 EER for unit A.

한 경우와 A실, B실 실내기 두 대를 사용한 경우에 대해서 과열도 재설정 제어실험을 수행하였다.

A실 실내기 한 대만을 사용한 경우의 과열도 재설정 제어실험 결과를 Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16에 보여준다. Fig. 14에 보듯이 초기 과열도 설정온도는 7°C였으나 초기 과도응답에 의해 과열도 설정온도가 7.32°C까지 상승하였지만 과도상태가 끝나면서 하한 과열도 설정온도인 2°C까지 안정적으로 설정되어 제어되었고, Fig. 15에서 보듯이 전자팽창밸브 제어신호가 안정적으로 제어되는 것을 알 수 있었다. 또한 Fig. 16에서 보듯이 과열도 설정온도가 과열도 설정 알고리즘에 의해 낮게 설정됨에 따라 EER이 상승됨을 확인할 수 있었다.

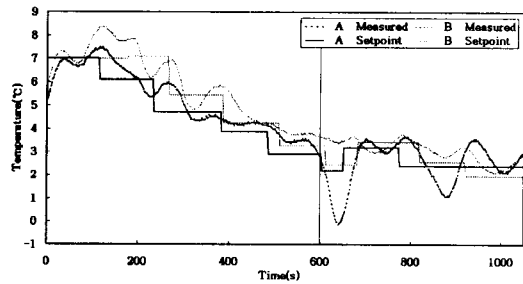


Fig. 17 Superheat temperature variable setpoint control for units A and B.

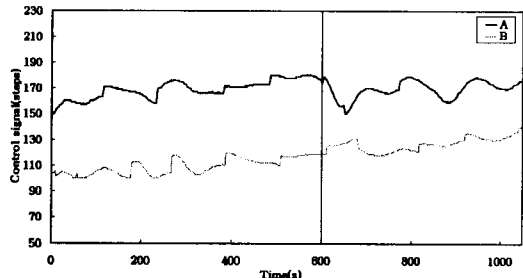


Fig. 18 EEV control signals for units A and B.

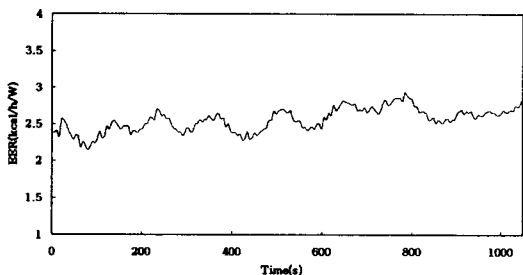


Fig. 19 EER for units A and B.

A실 실내기와 B실 실내기를 사용한 경우의 과열도 재설정 제어실험 결과를 Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19에 보여준다. Fig. 17에서 보듯이 A실 실내기와 B실 실내기의 과열도 설정온도가 7℃에서 2℃까지 안정적으로 설정되었고, Fig. 18과 같이 제어신호가 안정적이었으며, Fig. 19와 같이 설정온도가 낮아짐에 따라 EER이 상승됨을 확인할 수 있었다.

외란이 주어졌을 경우에도 과열도 설정 알고리즘에서 적절한 과열도를 설정하는지를 확인하기 위하여 Fig. 17에서 보듯이 실험시작 600초 후에 A실 실내기 팬을 5초 동안 정지시켜 외란을 첨가시킨 후 재가동시켰다. A실 실내기의 과열도 설정온도가 변화되는 시점에서 외란이 첨가되어 실제 A실 실내기의 과열도는 0℃까지 감소되었으나 재가동 후 설정온도 증가 알고리즘에 의해 과열도 설정온도를 3.18℃로 증가시켜 안정되게 과열온도를 제어하였다. 한편 B실의 경우 A실의 외란으로 인한 실제 과열도도 영향이 작았으며 외란 후 과열도 설정온도를 3.44℃로 증가시켜 안정되게 시스템을 제어하였다.

## 5. 결 론

멀티형 냉동시스템의 에너지 사용 절감과 신뢰성 증가를 위해 퍼지로직을 사용한 전자팽창밸브 과열도 설정 알고리즘을 개발하여 적용한 후 이를 실험을 통하여 확인한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) 과열도 설정온도를 고정한 과열도 고정설정 제어실험을 실시한 결과 설정온도가 7℃, 5℃인 경우 정상상태에서 잘 제어되다가 3℃인 경우 제어범위가 점점 커지면서 2℃로 설정한 경우에는 액압축 현상이 발생하였다.

(2) 개발된 과열도 재설정 알고리즘을 사용하여 제어실험을 수행한 결과 과열도 재설정 알고리즘에 의해 2℃까지 안정적으로 설정되어 제어되었으며 실제 과열도가 0℃ 이하로 내려가지 않도록 과열도 설정 알고리즘이 적절히 작동하여 압축기로의 액냉매 유입을 방지할 수 있음을 확인하였다.

(3) 과열도 설정 알고리즘을 통해 과열도를 설정하여 제어할 경우, 7℃로 고정 설정된 과열도 제어의 경우보다 에너지 사용이 절약됨을 확인하였다.

(4) 두 대실을 대상으로 수행한 외란실험 결과 외란이 첨가될 경우에도 과열도 설정 알고리즘이 적절히 작동되어 외란에 강인함을 확인하였다.

따라서 본 연구에서 개발한 과열도 재설정 알고리즘은 냉방시스템의 에너지 절약과 압축기 액냉매 유입의 방지를 위해 적용 가능하다고 사료된다.

## 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. Outtagarts, A., 1997, The transient response of an evaporator fed through an electronic expansion valve, Int. J. of Energy Research, Vol. 21, pp. 793-807.
3. Higuchi, K., 1986, Electronic expansion valve and control, Japanese Association Refrigeration, Vol. 61, No. 701, pp. 1-8.
4. Jia, X., Tso, C. P. and Chia, P. K., 1995, A distributed model for prediction of the transient response of an evaporator, Int. J. of Refrigeration, Vol. 18, pp. 336-342.
5. Han, D. and Lim, B., 2000, Dynamic model of the electronic expansion valve for the development of superheat temperature control algorithm, Proceedings of the SAREK, pp. 1343-1347.
6. Wallen, A., 1997, Valve diagnostics and automatic tuning, Proceedings of the american control conference, pp. 2930-2934.
7. Han, D. and Pyo, S., 2001, The superheat temperature control of EXV for multi-type heat pump by using the dither signal, Proceedings of the SAREK, pp. 486-491.
8. Jolly, P. and Tso, C., 2001, Intelligent control to reduce superheat hunting and optimize evaporator performance in container refrigeration, ASHRAE Transactions, Vol. 107, Pt. 1, Paper #4441.
9. Huang, S. and Nelson, R., 1999, Development of a self-tuning fuzzy logic controller,

- ASHRAE Transactions, Vol. 105, Pt. 1, Paper #4245.
10. Passino, K. and Yurkovich, S., 1998, Fuzzy control, Addison-Wesley, pp. 30-109.
  11. Han, D. and Kim, K., 1998, Design and control of dynamic environmental chamber, Proceedings of the SAREK, pp. 656-661.
  12. Han, D. and Lee, H., 2001, Partial fault detection of the air-conditioning system by using curve fitting model, Proceedings of SAREK, p. 671.
  13. Finn, P. D., 2000, Control and optimization issues associated with algorithm-controlled refrigerant throttling devices, ASHRAE Transactions, Vol. 106, Pt. 1, Paper # DA-00-4-2.
  14. Korean Standards, 1999, Room air conditioners, KS-C-9306, Korean Standards Association.