

다입력변수를 사용한 멀티형 공조시스템 압축기와 전자팽창밸브의 퍼지 제어 알고리즘

한도영[†], 박관준^{*}

국민대학교 기계·자동차공학부, *국민대학교 대학원 기계공학과

Fuzzy Control Algorithms for the Compressor and the Electronic Expansion Valve of a Multi-type Air-conditioning System using Multiple Input Variables

Doyoung Han[†], Kwanjun Park^{*}

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

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

(Received May 4, 2005; revision received January 9, 2006)

ABSTRACT: In order to control multi-zone temperatures, a multi-type air-conditioning system may be used. In this study, control algorithms for the compressor and the electronic expansion valve of a multi-type air-conditioning system were developed by using fuzzy logics. The compressor control algorithm was composed of a compressor pressure setpoint algorithm, a compressor pressure setpoint reset algorithm, and a compressor frequency setpoint algorithm. The electronic expansion valve control algorithm was composed of an indoor temperature control algorithm, and a superheat control algorithm. These algorithms were applied to a multi-type air-conditioning system. Test showed good results for the control of a multi-type air-conditioning system.

Key words: Multi-type air-conditioning system(멀티형 공조시스템), Variable compressor(가변 압축기), Electronic expansion valve(전자팽창밸브), Fuzzy logic(퍼지 로직), Control algorithm(제어 알고리즘)

기 호 설 명

F_r : 압축기 주파수 [hertz]
 P : 압력 [atm]
 Q : 냉방용량 [kW]
 R : 실내기 운전대수[ea]
 SH : 과열도 [°C]

ST : 전자팽창밸브 스텝 [step]
 T : 온도 [°C]

하첨자

$comp$: 압축기
 EEV : 전자팽창밸브
 mea : 측정
 o : 실외
 $reset$: 재설정
 set : 설정

[†] Corresponding author

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

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

1. 서 론

현대인의 생활수준이 꾸준히 지속적으로 향상됨에 따라 사무실과 거주공간에 대한 보다 나은 쾌적한 환경을 요구하고 있으며, 또한 환경보호에 대한 관심이 높아져 신냉매를 이용한 개별형 냉방시스템 사용에 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 개인의 선호도에 따라 환경조성이 가능한 현대의 실외기에 다수의 실내기가 연결된 멀티형 공조시스템에 대한 관심이 집중되고 있으며, 특히 현재 가정용 공조기에서 사용되고 있는 탄화수소계 냉매인 R22 냉매를 혼합냉매인 R407C로 대체한 멀티형 공조시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

멀티형 공조시스템의 용량가변을 위해 용량가변압축기를 사용하거나 텐덤형 압축기 방식을 사용하였으며,⁽¹⁻³⁾ 압축기 제어를 위해 시스템 저압측 압력⁽⁴⁾을 사용하거나 압축기 입구 과열도⁽⁵⁾를 사용하였다. 실내기의 냉방부하를 만족시키기 위해 전자팽창밸브를 사용하여 각 실내기의 냉매를 분배하였으며 전자팽창밸브의 제어를 위해 각 실의 실내온도를 사용하였다.⁽⁶⁻⁸⁾ 그러나 기존의 연구에서 압축기와 전자팽창밸브의 제어를 위해 제한된 입력변수만을 사용함으로써 다양한 조건에서 운전되는 멀티형 공조시스템의 제어에 한계성이 노출되었으며, 이를 개선하기 위하여 본 연구에서는 멀티형 공조시스템의 운전에 영향을 미칠 수 있는 실외온도, 실내기 사용대수, 실내온도, 실내온도변화를 입력변수로 하여 압축기 주파수를 제어하는 압축기 제어 알고리즘과 실내온도, 실내온도변화를 입력변수로 하여 전자팽창밸브의 개

도를 제어하는 전자팽창밸브 제어 알고리즘을 개발하여 실험을 통해 제어성능과 특성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 실험장비

멀티형 공조시스템은 실외기와 실내기로 구분되어 구성되어 있으며, 실외기에는 압축기, 액분리기, 유분리기, 실외 열교환기, 실외팬 등이 있고, 실내기에는 실내 열교환기, 실내팬, 전자팽창밸브 등이 있으며, Table 1에는 사용된 부품의 사양이 제시되어 있다.

멀티형 공조시스템을 제어하기 위하여 Fig. 1과 같은 위치에 센서를 설치하였다. 그림에서 보듯이 전자팽창밸브를 제어하기 위한 과열도 측정을 위해 각 실내기 냉매측 출구에 온도센서와 압력센서를 설치하였으며, 각 실내기의 공기온도를 측정하기 위하여 각 실내기의 공기 흡입측에 온도센서를 설치하였다. 또한, 압축기를 제어하기 위하여 실외기 공기 흡입측에 온도센서를 설치하여 실외온도를 측정하였고 압축기 입구측에 압력센서를 설치하여 시스템 저압측 압력을 측정하였다.

Table 1 Specification of a multi-type system

Component		Specification
Outdoor unit	Compressor	3 Φ Inverter scroll type 15.2 kW(90 Hz)
	Fan	Axial fan, 60 m ³ /min
	Coil	Φ 9.52 \times 2 row \times 34 step
Indoor units	Fan	A, C, D Turbo fan, 9 m ³ /min
		B Turbo fan, 6 m ³ /min
	Coil	Φ 6.4 \times 2 row \times 14 step
	Electronic expansion valve	1-2 phase, 480 pulse

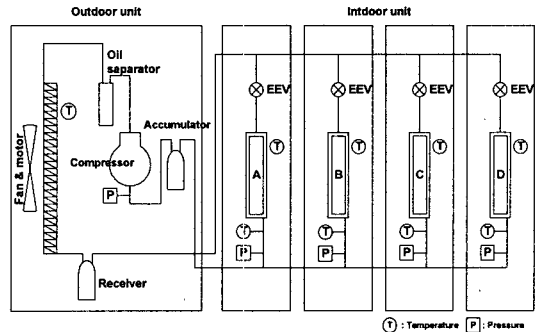


Fig. 1 Multi-type air-conditioning system.

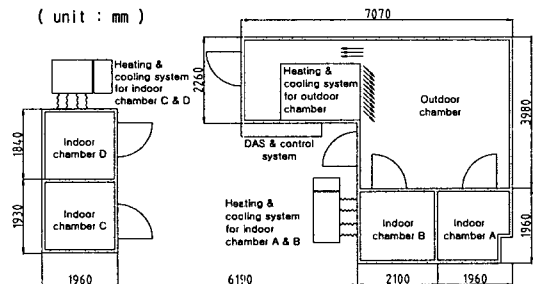


Fig. 2 Dynamic environmental chamber.

멀티형 공조시스템의 실험은 Fig. 2와 같은 동적 환경조성 챔버 내에서 수행하였다. 동적 환경조성 챔버는 실외환경조성 챔버와 실내환경조성 챔버로 구성되어 있다. 실외환경조성 챔버에서는 3단 언로드 타입 압축기를 사용한 15 HP 용량의 냉동기, 7kW 전기히터 3개, 6kW 전극봉식 증기분무형 가습기 3개가 사용되어 실외환경이 조성되었으며, 실내환경조성 챔버에서는 5 HP 용량의 항온습습기, 7kW 전기히터, 6kW 전극봉식 증기분무형 가습기가 사용되어 실내환경이 조성되었다. 실내챔버 A, B는 실외챔버와 인접되어 설치되어 있으며, 실내챔버 C, D는 실외챔버와 격리되어 설치되어 있다.

3. 제어 알고리즘

멀티형 공조시스템을 사용하여 각 실내에서 요구되는 온도로 실내온도를 효과적으로 제어하기 위해서 압축기 제어 알고리즘과 전자팽창밸브 제어 알고리즘을 퍼지로지⁽⁹⁾을 사용하여 개발하였다.

3.1 압축기 제어 알고리즘

압축기 제어 알고리즘은 Fig. 3과 같이 압축기 압력 설정 알고리즘, 압축기 압력 재설정 알고리즘, 압축기 주파수 설정 알고리즘으로 구성되어 있다. 압축기 압력 설정 알고리즘과 압축기 압력 재설정 알고리즘의 제어주기는 480초로 선정되었고, 압축기 주파수 설정 알고리즘의 제어주기는 100초로 선택하였다. 압축기 압력 설정 알고리즘, 압축기 압력 재설정 알고리즘, 압축기 주파수 설정 알고리즘으로 퍼지로직을 사용하였고, 추론방법으로 최소최대법, 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다.

3.1.1 압축기 압력 설정 알고리즘

압축기 압력 설정 알고리즘은 실외온도, T_o 와 실내기 운전대수, R 에 따라 시스템 저압측 설정 압력, P_{set} 을 설정해 주는 알고리즘으로써 Fig. 4와 Fig. 5에는 입력 T_o 와 R 의 멤버쉽 함수를 보여주었고, Fig. 6에는 출력 P_{set} 의 멤버쉽 함수를

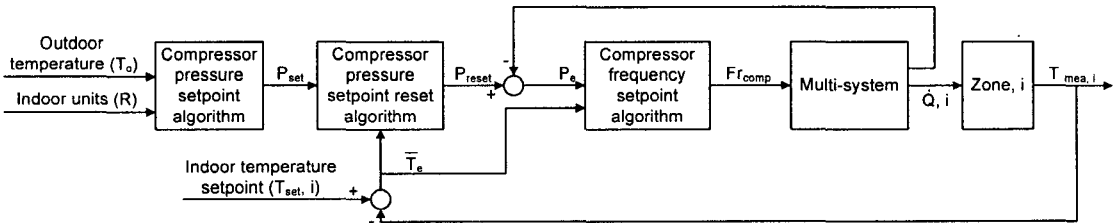


Fig. 3 Compressor control algorithm.

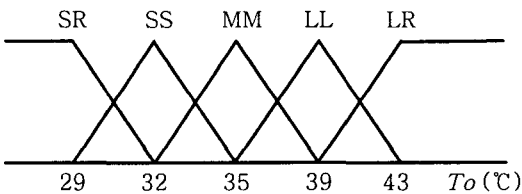


Fig. 4 Membership function for T_o .

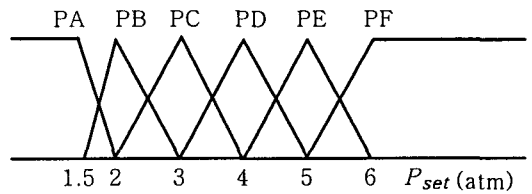


Fig. 6 Membership function for P_{set} .

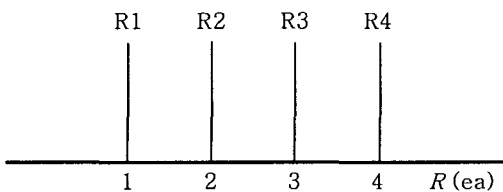


Fig. 5 Membership function for R .

Table 2 Rule base for P_{set}

R	T_o				
	SR	SS	MM	LL	LR
R1	PA	PB	PB	PB	PC
R2	PB	PC	PC	PC	PD
R3	PC	PD	PD	PD	PE
R4	PD	PE	PE	PE	PF

나타내었으며, Table 2에는 P_{set} 의 룰베이스를 보여준다.

3.1.2 압축기 압력 재설정 알고리즘

압축기 압력 재설정 알고리즘은 압축기 압력 설정 알고리즘에 의해 설정된 시스템 저압축 압력을 시스템의 실내온도 추종 정도에 따라 재설정해 주는 알고리즘으로써 각 실내기의 설정온도, $T_{set,i}$ 와 측정온도, $T_{mea,i}$ 와의 오차의 평균 오차값, $\overline{T_e}$ 와 $\overline{T_e}$ 의 변화량, $\Delta \overline{T_e}$ 을 입력으로 하여

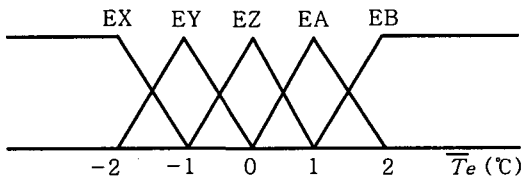


Fig. 7 Membership function for $\overline{T_e}$ at the compressor pressure setpoint reset algorithm.

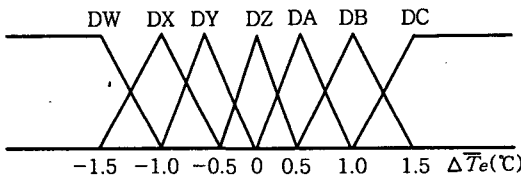


Fig. 8 Membership function for $\Delta \overline{T_e}$.

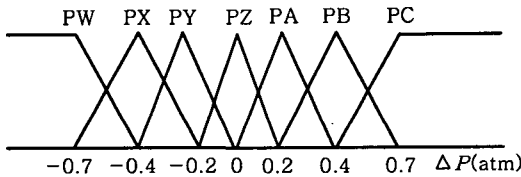


Fig. 9 Membership function for ΔP .

Table 3 Rule base for ΔP

$\overline{T_e}$	$\Delta \overline{T_e}$						
	DW	DX	DY	DZ	DA	DB	DC
EX	PY	PX	PW	PW	PW	PX	PY
EY	PY	PY	PX	PX	PX	PY	PY
EZ	PY	PZ	PZ	PZ	PZ	PZ	PA
EA	PA	PA	PB	PB	PB	PA	PA
EB	PA	PB	PC	PC	PC	PB	PA

출력 압력변화량, ΔP 을 계산한 후 P_{set} 을 ΔP 만큼 재조정하여 시스템 저압축 재설정 압력, P_{reset} 을 재설정하였다. Fig. 7과 Fig. 8에는 입력 $\overline{T_e}$ 와 $\Delta \overline{T_e}$ 의 멤버십 함수를 보여주었고, Fig. 9에는 출력 ΔP 의 멤버십 함수를 나타내었으며, Table 3에는 ΔP 의 룰베이스를 보여준다.

3.1.3 압축기 주파수 설정 알고리즘

압축기 주파수 설정 알고리즘은 시스템 저압축 압력 제어 결과와 각 실내온도 제어 결과에 따라

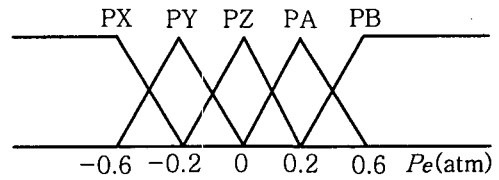


Fig. 10 Membership function for P_e .

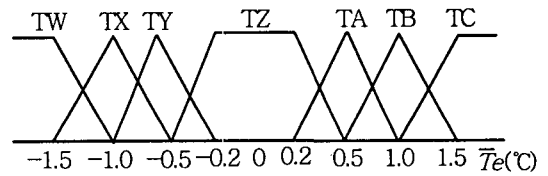


Fig. 11 Membership function for $\overline{T_e}$ at the compressor frequency setpoint algorithm.

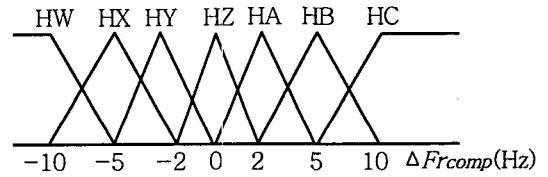


Fig. 12 Membership function for ΔFr_{comp} .

Table 4 Rule base of ΔFr_{comp}

P_e	$\overline{T_e}$						
	TW	TX	TY	TZ	TA	TB	TC
PX	HX	HY	HY	HZ	HB	HC	HC
PY	HW	HX	HY	HZ	HA	HB	HC
PZ	HW	HX	HY	HZ	HA	HB	HC
PA	HW	HX	HY	HZ	HA	HB	HC
PB	HW	HW	HX	HZ	HA	HA	HB

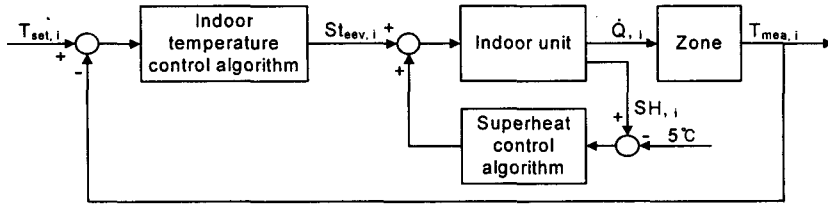


Fig. 13 EEV control algorithm.

압축기 주파수, Fr_{comp} 를 설정하는 알고리즘으로써 압축기 압력 재설정 알고리즘에 의해 재설정된 P_{reset} 과 측정압력, P_{mea} 와의 오차, P_e 와 $\overline{T_e}$ 을 입력으로 하여 압축기 주파수변화량 ΔFr_{comp} 을 계산한 후 Fr_{comp} 를 설정하였다. Fig. 10과 Fig. 11에는 입력 P_e 와 $\overline{T_e}$ 의 멤버십 함수를 보여주었고, Fig. 12에는 출력 ΔFr_{comp} 의 멤버십 함수를 나타내었으며, Table 4에는 압축기 ΔFr_{comp} 의 룰베이스를 보여준다.

3.2 전자팽창밸브 제어 알고리즘

전자팽창밸브 제어 알고리즘은 Fig. 13과 같이 실내온도 제어 알고리즘, 과열도 제어 알고리즘으로 구성되어 있다. 실내온도 제어 알고리즘과

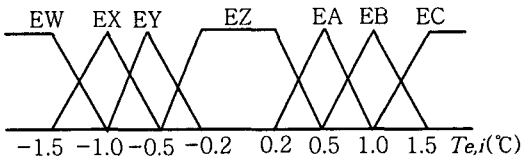


Fig. 14 Membership for $T_{e,i}$.

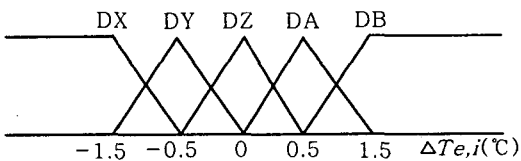


Fig. 15 Membership for $\Delta T_{e,i}$.

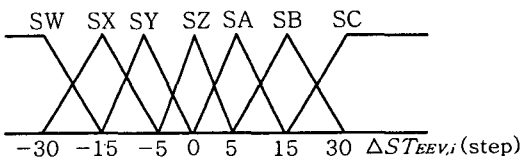


Fig. 16 Membership for $\Delta ST_{EEV,i}$.

과열도 제어 알고리즘의 제어주기는 각각 20초와 5초로 선정하였다.

3.2.1 실내온도 제어 알고리즘

실내온도 제어 알고리즘은 사용자에게 의해 설정된 $T_{set,i}$ 를 추종하도록 전자팽창밸브를 제어하는 알고리즘으로써 $T_{set,i}$ 와 $T_{mea,i}$ 와의 실내온도오차, $T_{e,i}$ 와 실내온도 오차변화량, $\Delta T_{e,i}$ 을 입력으로 하여 퍼지 알고리즘을 사용하여 출력인 전자팽창밸브 스텝변화량, $\Delta ST_{EEV,i}$ 을 계산한 후 전자팽창밸브의 출력스텝, $ST_{EEV,i}$ 을 설정하였다. Fig. 14와 Fig. 15에는 입력 $T_{e,i}$ 와 $\Delta T_{e,i}$ 의 멤버십 함수를 보여주었고, Fig. 16에는 $\Delta ST_{EEV,i}$ 의 멤버십 함수를 나타내었으며, Table 5에는 $\Delta ST_{EEV,i}$ 의 룰베이스를 보여준다. 추론방법으로 최소최대법, 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 사용하였다.

3.2.2 과열도 제어 알고리즘

과열도 제어 알고리즘은 압축기로의 액냉매 유입을 방지하기 위하여 실내기의 증발기 출구 과열도, SH_i 가 5°C 이상 유지되도록 전자팽창밸브를 제어하는 알고리즘으로써 과열도가 5°C 이상일 경우에는 실내온도 제어 알고리즘에 의해 전자팽창밸브가 제어되지만 5°C 이하일 경우에는 5°C와의 차이를 사용하여 비례 계인이 2.0인 비례 제어 알고리즘에 의해 전자팽창밸브가 폐쇄되도록 설계되었다.

Table 5 Rule base for $\Delta ST_{EEV,i}$

ΔT_e	T_e						
	EW	EX	EY	EZ	EA	EB	EC
DX	SC	SB	SB	SA	SB	SY	SY
DY	SB	SB	SA	SZ	SZ	SY	SX
DZ	SB	SA	SA	SZ	SY	SY	SX
DA	SB	SA	SZ	SZ	SY	SX	SX
DB	SA	SY	SY	SY	SX	SX	SW

4. 실험결과

압축기 제어 알고리즘과 전자팽창밸브 제어 알고리즘의 제어성능을 확인하기 위하여 멀티형 시스템의 실외기 환경을 표준조건⁽¹⁰⁾인 건구온도 35 ±0.3℃, 습구온도 24±0.2℃로 유지시키고, 실내기가 위치한 각 실에 전기히터를 사용하여 열부하를 공급하면서 초기 기동시험과 외란시험을 수행하였다.

Fig. 17에서 Fig. 21까지에는 B실에 1.7kW, A실, C실, D실 각각에 2.1kW의 열부하를 공급하면서 실시한 초기 기동시험 결과를 보여준다. Fig. 17에서 보듯이 A실, B실, C실, D실의 실내온도는 25.7℃, 27.3℃, 26.6℃, 24.1℃인 상태에서 시험을 시작하여 시험 시작 후 각 실에 공급된 열부하에 의해 상승하였으나 시험 시작 1분 후부터 멀티형 공조시스템이 가동되어 초기 과도상태를 거친 후 설정온도 27℃의 ±0.5℃ 범위 내에서 안정되게 제

어되는 것을 알 수 있었다. Fig. 18에서 보듯이 압축기는 압축기 제어 알고리즘에 의해 초기 3분간 50 Hz로 운전되다가 35 Hz 정도에서 안정되게 제어되었으며, 전자팽창밸브는 Fig. 19에서 보듯이 전자팽창밸브 제어 알고리즘에 의해 초기 150스

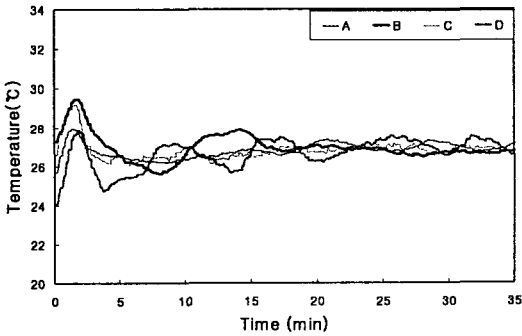


Fig. 17 Indoor temperature (Initial start-up test).

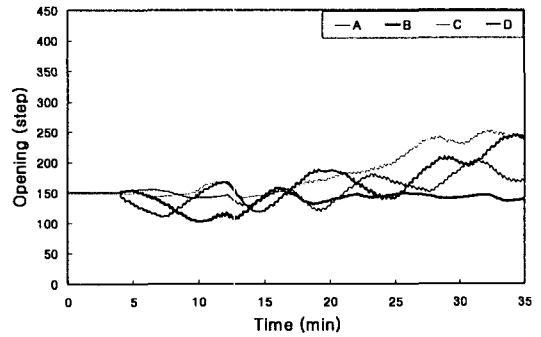


Fig. 19 Electric expansion valve opening (Initial start-up test).

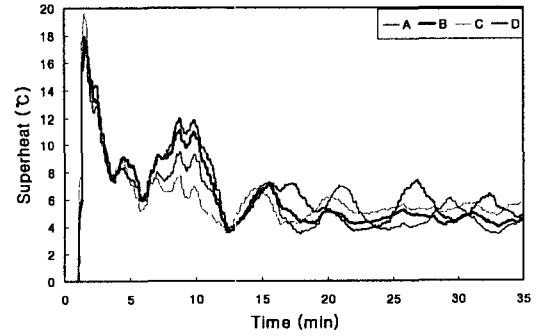


Fig. 20 Evaporator superheat temperature (Initial start-up test).

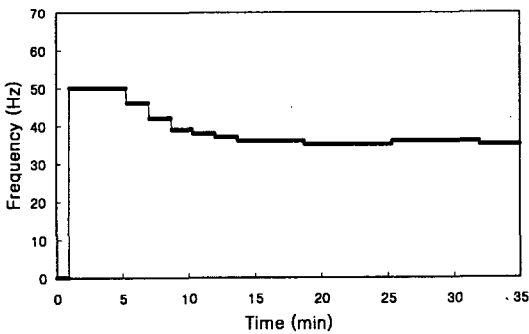


Fig. 18 Compressor speed (Initial start-up test).

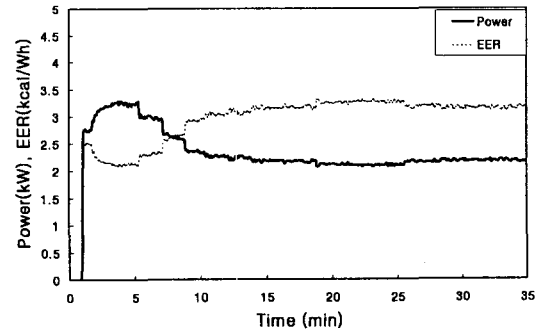


Fig. 21 Power consumption and EER (Initial start-up test).

템으로 운전되다가 각 실의 요구조건에 따라 적절히 안정되게 제어되었으며, 특히 과도상태가 지난 16분 후부터 실내온도가 설정온도의 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지되면 전자팽창밸브의 개도량을 2스텝씩 증가시키는 전자팽창밸브 효율화 알고리즘에 의해 A실, C실, D실의 개도량이 꾸준히 증가하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 20에서 보듯이 실내기 출구의 냉매과열도는 초기 18°C 까지 상승되었으나 5°C 부근에서 안정적으로 제어되었으며, Fig. 21에서 보듯이 멀티형 공조시스템의 EER은 초기에 2.12까지 저하되었으나 시스템이 정상상태에 도달한 후 3.17로 향상되었음을 알 수 있었다.

Fig. 22에서 Fig. 26까지는 시험시작 초기 B실 1.7kW, A실, C실, D실 각 2.1kW의 열부하를 공급하다가 시험시작 2분 후부터 B실 0.2kW, A실, C실, D실 각 0.3kW로 급격히 감소시키고, 시험시작 15분 후부터 다시 초기부하인 B실 1.7kW, A실, C실, D실 각 2.1kW로 급격히 증가시

키면서 실시한 외란시험 결과를 보여준다. Fig. 22에서 보듯이 시험시작 2분 후부터 실내 열부하가 급격히 감소했음에도 불구하고 멀티형 공조시스템의 제어를 통해 실내온도가 설정온도 27°C 부근에서 잘 유지되었고 15분 후부터 실내 열부하

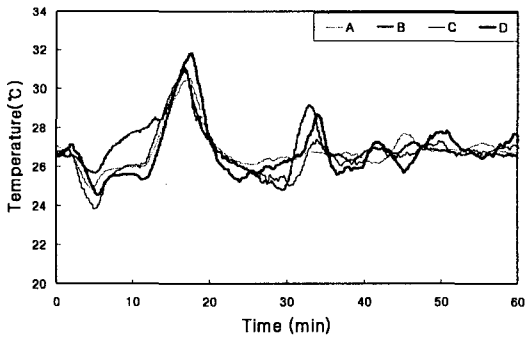


Fig. 22 Indoor temperature (Disturbance test).

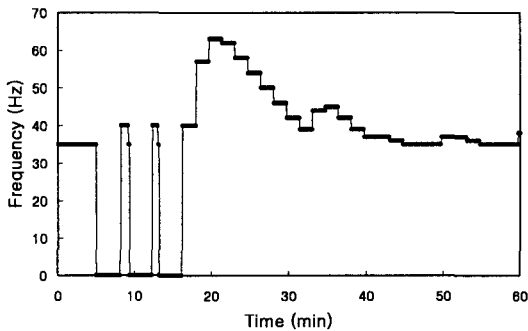


Fig. 23 Compressor speed (Disturbance test).

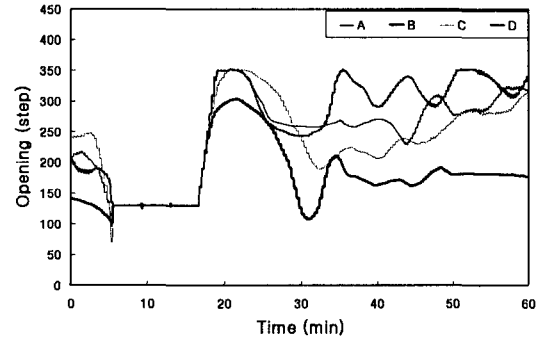


Fig. 24 Electronic expansion valve opening (Disturbance test).

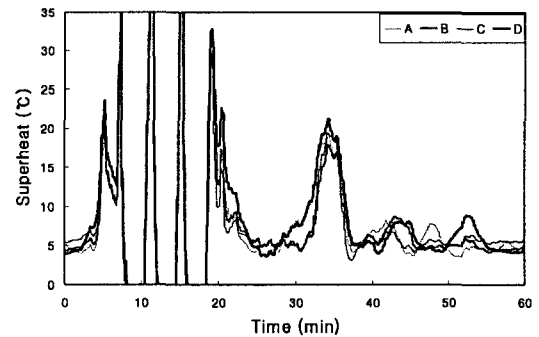


Fig. 25 Evaporator superheat temperature (Disturbance test).

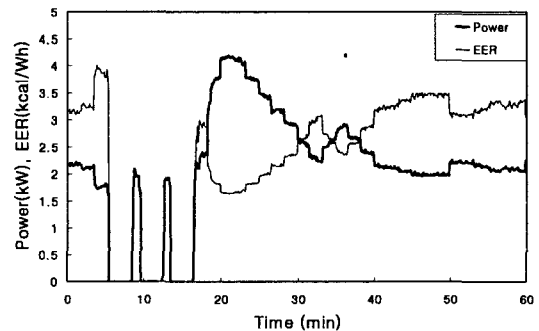


Fig. 26 Power consumption and EER (Disturbance test).

가 급격히 증가하였지만, 34분까지의 과도상태를 거친 후 정상상태에서 A실, B실, C실, D실의 평균 온도가 실내설정온도 27°C 부근에서 잘 제어되었음을 알 수 있었다. Fig. 23에서 보듯이 시험 시작 초기 압축기 주파수는 35 Hz이었으나 실내 열부하의 급격한 감소로 인해 5분에 압축기가 정지되었고, 재기동과 정지를 반복하다가 16분부터 압축기가 연속 운전되면서 안정적으로 제어되고 있음을 알 수 있었다. Fig. 24에서 보듯이 전자팽창밸브의 개도량은 실내 열부하의 감소로 인해 감소하다가 시스템 정지로 인해 5분에 130스텝으로 초기화되었고 16분부터 과도상태를 거친 후 34분부터 안정적으로 제어되었으며, 전자팽창밸브 효율화 알고리즘에 의해 A, C실의 개도량이 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 25에서 보듯이 증발기 과열도는 시험시작시 안정되게 유지되었으나, 5분부터 압축기가 정지 및 재기동을 반복하면서 압력이 급격하게 변하여 증발기 출구압력과 출구온도에 의한 과열도 측정방법에 의한 오차가 발생하여 과도기를 거쳤으나 압축기가 연속 운전을 하면서 과열도가 3°C에서 8°C 사이로 안정되게 제어되었음을 알 수 있었다. Fig. 26에서 보듯이 정상상태에서 평균 소비전력과 EER은 2.13 kW, 3.23으로 계속되었다.

5. 결 론

멀티형 공조시스템의 압축기 제어 알고리즘과 전자팽창밸브 제어 알고리즘을 개발한 후 실험을 통하여 제어성능을 확인하였다.

(1) 실외온도와 실내기 운전대수를 입력으로 하고 시스템 저압측 설정압력을 출력으로 하는 압축기 압력 설정 알고리즘, 실내온도 평균 오차와 평균 오차변화량을 입력으로 하고 압력변화량을 출력으로 하는 압축기 압력 재설정 알고리즘, 그리고 개설정압력과 측정압력과의 오차와 실내온도 평균 오차를 입력으로 하고 압축기 주파수 변화량을 출력으로 하는 압축기 주파수 설정 알고리즘을 퍼지로지식을 사용하여 개발하였다.

(2) 전자팽창밸브 제어 알고리즘으로 실내온도 오차와 오차변화량을 입력으로 하고 전자팽창밸브의 스텝변화량을 출력으로 하는 실내온도 제어 알고리즘을 퍼지로지식을 사용하여 개발하였고, 과열도 오차를 입력변수로 하고 전자팽창밸브의 스

텡변화량을 출력으로 하는 비례 제어 알고리즘을 개발하였다.

(3) 개발된 압축기 제어 알고리즘과 전자팽창밸브 제어 알고리즘을 사용하여 멀티형 공조시스템의 초기기동시험과 외란시험을 수행한 결과 과도상태와 정상상태에서 압축기와 전자팽창밸브가 안정되게 제어되었고 정상상태에서 실내온도가 설정온도의 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 이내로 안정되게 제어되었다.

따라서, 본 연구에서 개발된 멀티형 공조시스템의 압축기와 전자팽창밸브의 제어 알고리즘은 멀티존의 안정적인 실내온도 제어를 위해 효과적으로 사용될 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

참고문헌

1. Kwon, Y. C., Ko, K. W., Jin, E. S., Huh, S. H., Jun, Y. H., Lee, Y. D. and Park, I. K., 2004, Experimental study on cooling characteristics of multi-air conditioner using inverter scroll compressor, SAREK, Vol. 16, No. 4, pp. 311-317.
2. Rice, C. K. and Fisher, S. K., 1985, A comparative analysis of single and continuously variable-capacity heat pump concepts, Proc. of the DOE/ORNL Heat Pump Conference, pp. 57-65.
3. Han, D. and Park, K. J., 2001, Performance analysis of the tandem-type multi heat pump system, Proceedings of the SAREK, pp. 15-20.
4. Kim, S. Y. and Kim, M. S., 2001, Capacity modulation of a multi-heat pump system using PID control with fuzzy logic, SAREK, Vol. 13, No. 9, pp. 810-817.
5. Choi, J. M., Kim, Y. C. and Ha, J. H., 2001, Experimental study on superheat control of a variable speed heat pump, SAREK, Vol. 13, No. 4, pp. 233-241.
6. Han, D. and Yoo, P. S., 2001, Seasonal performance analysis of the EXV used heat pump system, Proceedings of the SAREK, pp. 841-846.
7. Han, D. and Lee, S. W., 2002, Zone temperature control of the multi-type air-con-

- conditioning system using EEV super-heat control algorithms, Proceedings of the SAREK, pp. 357-362.
8. Han, D. and Lee, S.W., 2003, The EEV control of the multi-type air-conditioning system by using a fuzzy logic superheat temperature setpoint reset algorithm, SA-REK, Vol. 15, No. 5, pp. 381-387.
 9. Han, D. and Kwon, H.J., 2000, Compressor speed control of the multi-type air conditioning system by using a fuzzy algorithm, Proceedings of the SAREK, pp. 1348-1352.
 10. Room Air-Conditioners, 1999, KSC 9306, Korean Standard Association.