

탠덤형 냉방시스템의 안전운전을 고려한 압축기와 전자팽창밸브 제어

한도영[†] · 김재현^{*}

[†]국민대학교 기계·자동차공학부, ^{*}국민대학교 기계공학과 대학원

Control of Compressors and Electronic Expansion Valve considering the Safe Operation of a Tandem-type Air-conditioning system

Doyoung Han[†], JaeHyun Kim^{*}

ABSTRACT: Capacities of a tandem-type air-conditioner may be modulated by turning on and off of multiple compressors, and adjusting the position of a electronic expansion valve. In this study, control algorithms for compressors and a electronic expansion valve were developed by using fuzzy logics. The pressure control algorithm was also developed for the safe operation of compressors. There algorithms were implemented in a test lab and proved to be effective for the control of indoor air temperature and superheat temperature.

Key words: Tandem-type air-conditioner(탠덤형 냉방시스템), Compressor control algorithm(압축기 제어알고리즘), Electronic expansion valve control algorithm(전자팽창밸브 제어알고리즘), Pressure control algorithm(압력 제어알고리즘), Indoor air temperature control(실내온도제어), Superheat temperature control(과열도제어), Fuzzy logic(퍼지로지)

기 호 설 명

- T_{zo_sv} : 실내설정온도 [°C]
- T_{zo_pv} : 실내측정온도 [°C]
- T_{zo_e} : 실내온도편차 [°C]
- $T_{zo_Δc}$: 실내온도편차변화율[°C/sec]
- T_{sh_sv} : 설정과열도 [°C]
- T_{sh_pv} : 측정과열도 [°C]
- T_{sh_e} : 과열도편차 [°C]
- $T_{sh_Δc}$: 과열도편차변화율 [°C/sec]

- S_{cal_eev} : 설정개도변화량 [step]
- S_{cal_comp} : 설정압축기단계증감 [stage]
- S_{p_eev} : 보정개도변화량 [step]
- S_{p_comp} : 보정압축기단계증감 [stage]

1. 서론

지속적인 국내 경제성장으로 인해 생활수준의 꾸준한 향상은 좀 더 쾌적한 생활공간에 대한 끊임없는 요구로 이어지고 있다. 이에 가정용 및 상업용 냉방기의 사용이 증가함에 따라 해마다 전체 전력소비에서 냉방기가 차지하는 비중이 증가하고 있으며 이로 인해 냉방기의 구성부품들의 최적 설계에 관한 연구^(1,2) 및 효율적인 시스템 운영에 관한 연구^(3,4)가 활발히 진행되고 있다. 냉방시스템의 부분부하에 따른 용량제어를 위해 인버

[†]Corresponding author

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

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

터 압축기^(5,6)를 사용한 경우 에너지 절감 효과를 얻을 수 있으나 제조원가가 상승하는 결과를 초래하며 이를 보완하기 위해 다수의 정속형 압축기를 사용한 텐덤형 냉방시스템⁽⁷⁾의 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 다양한 운전조건에서 압축기 운전 조합과 전자팽창밸브를 제어함으로 압축기안전운전영역 내에서 압축기 토출압력과 흡입압력을 유지하며 안정된 과열도제어가 가능함을 실험을 통해 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 텐덤형 냉방시스템

텐덤형 냉방시스템은 Fig. 1과 같이 용량이 다른 두 대의 압축기와 실외 열교환기, 실외팬으로 구성된 실외기와 실내열교환기, 실내팬, 전자팽창밸브로 구성된 실내기로 이루어져 있으며 Table 1에는 각 부품의 사양을 보여준다.

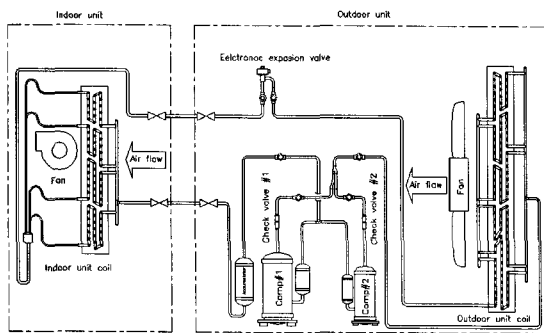


Fig. 1 Tandem-type air-conditioning system.

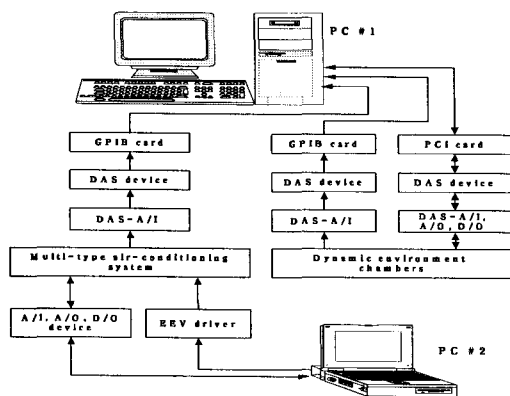


Fig. 2 Data acquisition and control system.

Table 1 Specification of tandem system

Component		Specification
Outdoor unit	Compressor	#1 4.4 kW, Rotary type
		#2 2.6 kW, Rotary type
	Fan	43.6 m ³ /min, Axial type
	Coil	φ9.52*3row*34step Sine-waved type
Indoor unit	Fan	15 m ³ /min, Sirocco type
	Coil	φ6.4*3row*14step Sine-waved type
	EEV	1-2 phase, 500 pulse

텐덤형 냉방시스템을 실험하기 위해 실외 온습도조건을 $-5 \sim 40^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, $20 \sim 90\% \pm 2.0\%$ 로, 실내 온습도조건을 $15 \sim 40^{\circ}\text{C} \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, $20 \sim 90\% \pm 2.0\%$ 로 제어할 수 있는 실외 환경조성챔버와 실내 환경조성챔버를 사용하였으며, 텐덤형 냉방시스템과 환경조성챔버의 각종 데이터를 수집하고 제어하기 위하여 Fig. 2와 같은 데이터 수집 및 제어 시스템을 사용하였다. PC #1을 통하여 환경조성챔버의 온도, 습도 등을 측정하여 제어를 수행하였고 텐덤형 냉방시스템의 성능관련 데이터를 수집하였다. PC #2를 통하여 텐덤형 시스템의 각 부위의 온도, 압력, 전력, 냉매유량 등 각종 데이터를 측정하였고 또한 텐덤형 냉방시스템의 압축기와 전자팽창밸브 등을 제어하였다. 온도측정을 위해 T형 열전대를, 압력측정을 위해 4~20 mA 출력의 압력 변환기를 사용하였다.

3. 텐덤형 냉방시스템 제어알고리즘

텐덤형 냉방시스템의 제어알고리즘은 Fig. 3에서 보듯이 압축기 제어알고리즘, 전자팽창밸브 제어알고리즘 및 압력제어 알고리즘으로 구성되었으며, 시스템을 점검하고 초기화를 실시한 후 각종 데이터를 수집하여 압축기와 전자팽창밸브를 조절하였다.

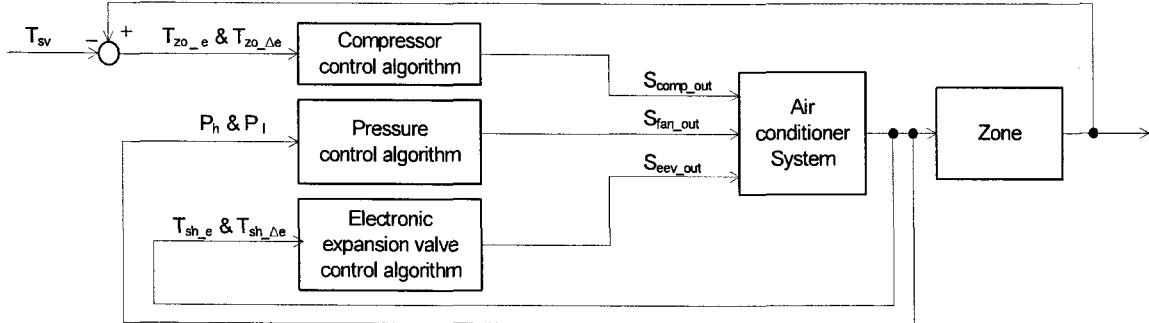


Fig. 3 Control block diagram for a tandem system

3.1 압축기 제어알고리즘

Table 2에서 보듯이 압축기 운전단계는 압축기 운전 조합에 따라 4가지 운전단계로 구별하였다.

Table 2 Compressor capacity

Stage	Compressor		Capacity(%)
	#1	#2	
0	off	off	0
1	off	on	40
2	on	off	60
3	on	on	100

압축기 제어알고리즘으로 실내현재온도 T_{zo_pu} 와 실내설정온도 T_{zo_sv} 의 차이 값인 실내온도편차 T_{zo_e} 와 실내온도편차변화율 $T_{zo_\Delta e}$ 를 입력변수로 하고, 설정압축기단계증감 S_{cal_comp} 를 출력변수로 한 퍼지 알고리즘을 사용하였다. Fig. 4, Fig. 5에 입력변수의 멤버십을, Table 3에 출력변수의 멤버십을, Table 4에 룰베이스를 나타내었으며 추론방법으로는 Takagi-Sugeno⁽⁸⁾ 알고리즘을 사용하였다. 추론과정은 식(1), (2)에 비퍼지화 과정은 식(3)에 나타내었다.

$$w_i = f_1(T_{zo_e}) \times f_2(T_{zo_\Delta e}) \quad (1)$$

$$z_i = Rules(T_{zo_e}, T_{zo_\Delta e}) \quad (2)$$

$$S_{cal_comp} = \frac{\sum_{i=1}^4 [w_i \times z_i]}{\sum_{i=1}^4 w_i} \quad (3)$$

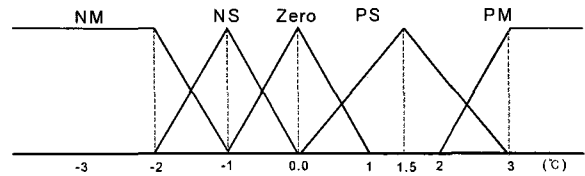


Fig. 4 Membership for T_{zo_e} ; f_1

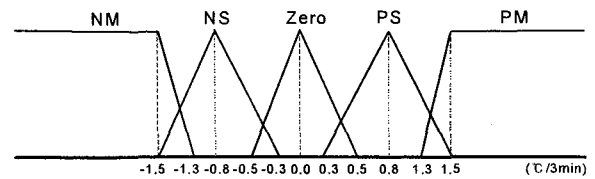


Fig. 5 Membership for T_{zo_e} ; f_2

Table 3 Membership for S_{cal_comp}

NM	-2
NS	-1
zero	0
PS	1
PM	2

Table 4 Rule-bases for compressor control algorithm ; Rules

S_{cal_comp}	T_{zo_e}					
	NL	NS	zero	PS	PL	
T_{zo_e}	NM	NM	NM	NM	NS	zero
	NM	NM	NS	NS	zero	PS
	zero	NM	NS	zero	PS	PM
	PS	MS	zero	PS	PS	PM
	PL	zero	PS	PM	PM	PM

3.2 전자팽창밸브 제어알고리즘

전자팽창밸브 제어알고리즘은 효율적인 운전을 위하여 설정과열도인 10℃를 유지하기 위하여 설정개도변화량을 계산하여 전자팽창밸브를 제어하도록 구성되어 있다.

전자팽창밸브 제어알고리즘은 현재과열도 $T_{sh_{pv}}$ 와 설정과열도 $T_{sh_{sv}}$ 의 차이 값인 과열도 편차 T_{sh_e} 와 과열도편차변화율 $T_{sh_{\Delta e}}$ 을 입력변수로 하고, 전자팽창밸브의 설정개도변화량인 $S_{cal_{ecv}}$ 을 출력변수로 한 퍼지 알고리즘을 사용하였다. Fig. 6, Fig. 7에 입력변수의 멤버십을, Fig. 8에 출력변수의 멤버십을, Table 5에 룰베이스를 나타내었다. 사용된 퍼지알고리즘의 추론 방법으로는 최소-최대법을 사용하였으며 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 사용하였다.

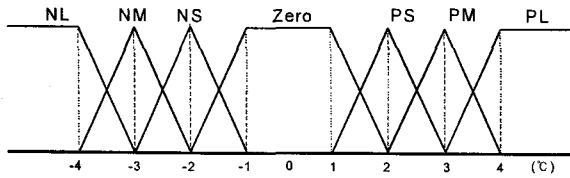


Fig. 6 Membership for T_{sh_e} .

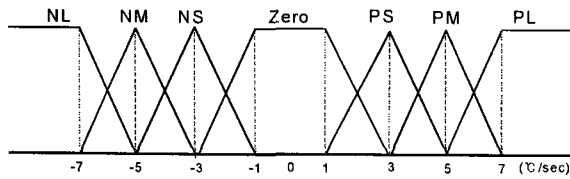


Fig. 7 Membership for $T_{sh_{\Delta e}}$.

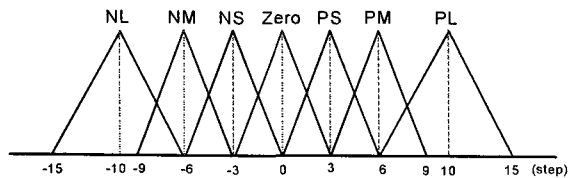


Fig. 8 Membership for $S_{cal_{ecv}}$.

Table 5 Rule-bases for indoor air temperature control algorithm

$S_{cal_{ecv}}$	T_{sh_e}							
	NL	NM	NS	zero	PS	PM	PL	
$T_{sh_{\Delta e}}$	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	zero
	NM	NL	NM	NM	NM	NS	zero	PL
	NS	NL	NM	NS	NS	zero	PS	PM
	zero	NL	NM	NS	zero	PS	PM	PL
	PS	NM	NS	zero	PS	PS	PM	PL
	PM	NS	zero	PS	PM	PM	PM	PL
	PL	zero	PS	PM	PL	PL	PL	PL

3.3 압력 제어알고리즘

압축기는 제조사에서 허용하는 안전운전 압력범위 내에서 운전되어야 고장 없이 안전하게 운전될 수 있다. 압력 제어알고리즘은 안전운전 압력범위 내에서 압축기가 운전될 수 있도록 보정압축기단계증감 $S_{p_{comp}}$ 와 보정개도변화량 $S_{p_{ecv}}$ 를 계산하여 압축기 제어알고리즘과 전자팽창밸브 제어알고리즘의 출력값을 보정하여 압축기와 전자팽창밸브로 출력하도록 구성되어 있다.

고압 P_h 와 저압 P_l 을 입력변수로 하고, 압축기의 보정압축기단계증감 $S_{p_{comp}}$ 과 전자팽창밸브의 보정개도변화량 $S_{p_{ecv}}$ 을 출력변수로 한 퍼지 알고리즘을 사용하였다. Fig. 9, Fig. 10에 입력변수의 멤버십을, Fig. 11에 출력변수의 멤버십을, Table 6에 룰베이스를 나타내었다. 출력변수의 경우 NL과 PL은 각각 압축기 1단 감소와 증가를 NM, NS는 전자팽창밸브의 스텝감소를 PS와 PM은 스텝증가를 의미한다. 사용된 퍼지알고리즘의 추론 방법으로는 최소-최대법을 사용하였으며 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 사용하였다.

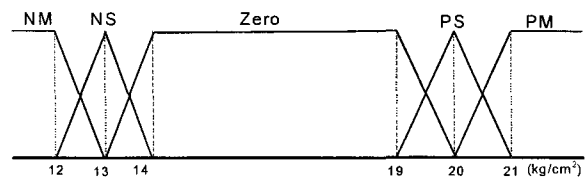


Fig. 9 Membership for P_h .

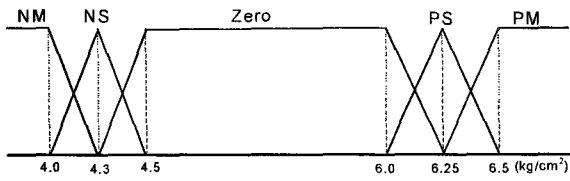


Fig. 10 Membership for P_1 .

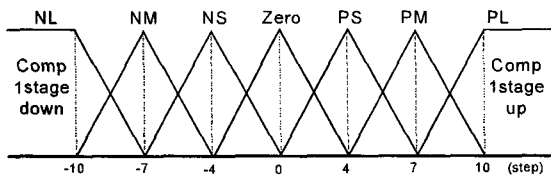


Fig. 11 Membership for S_{p_comp} and S_{p_eev} .

Table 6 Rule-bases for pressure control algorithm

S_{p_comp} and S_{p_eev}		P_1				
		NM	NS	zero	PS	PM
P_h	NM	-	-	NL	NS	NM
	NS	-	NL	NS	NS	NM
	zero	PM	PS	zero	NS	NM
	PS	PM	PS	PS	PL	-
	PM	PM	PM	PL	-	-

4. 실험결과

개발된 제어알고리즘의 성능을 검증하기 위해 한국산업규격 KSC 9306⁽⁹⁾에 제시된 표준조건을 기준으로 실외온도를 표준조건인 35℃를 유지하였고, 실내설정온도는 27℃를 사용하였다. 실내침버에는 전기히터를 사용하여 3.0~7.2 kW의 변동 부하를 제공하였다. 초기에 실내부하를 4.0 kW로 투입하여 실내온도를 증가시킨 후 자동운전을 수행하였다. 실내부하를 제거시키기 위해 압축기가 단계적으로 운전되도록 하였으며 이후 실내부하를 증가시켜 압축기가 단계적으로 정지되는 실험을 수행하였다. Fig. 12, 13, 14에는 실험결과를 보여준다.

Fig. 12에서 보듯이 고정부하에 실내온도는 다소의 과도기를 거친 후 설정온도의 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 에서 제어되었으며 그때의 압축기는 급격한 단계의 변화 없이 순차적으로 안정되게 제어되었음이 확인되었다. 온도 편차의 원인은 실내부하가 고정되어 있기 때문이다. 이는 급격한 실내 부하변화에 압축기 제어알고리즘이 잘 적용됨을 보여준다.

Fig. 13에서 보듯이 전자팽창밸브는 압축기 운전이 변화되었을 경우를 제외하고 안정되게 제어되었다. 압축기 단계변화 후 과도기에 일부 높은 구간이 발생되었으나 일반적으로 $10.0 \pm 4.0^\circ\text{C}$ 사이에서 적절히 안정되게 제어되었음이 확인되었다.

Fig. 14에서 보듯이 압력 제어알고리즘은 고압과 저압의 변화에 따라 전자팽창밸브의 스텝보상을 수행하였으며, 압축기 보상은 전자팽창밸브 보상으로 인해 허용압력 내에서 운전되므로 수행되지 않음이 확인되었다.

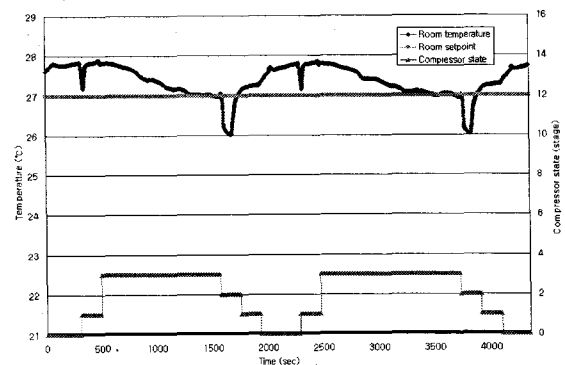


Fig. 12 Indoor air temperature control and compressor state.

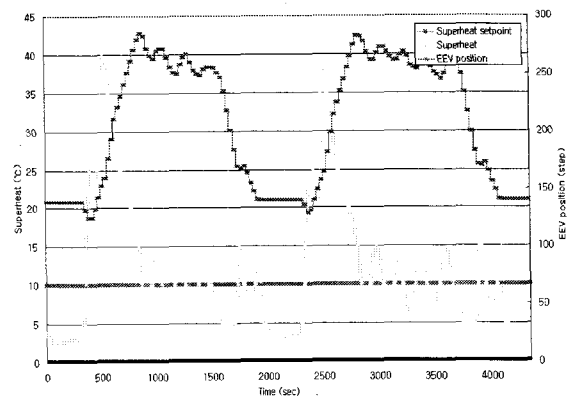


Fig. 13 Superheat control and EEV position.

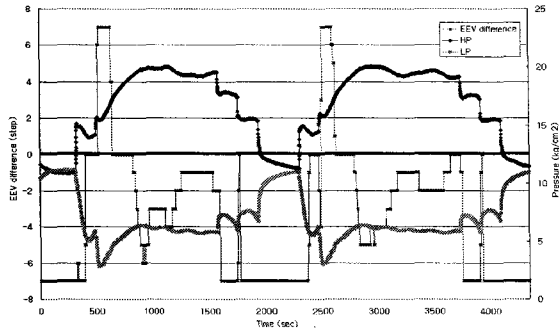


Fig. 14 Pressure control.

5. 결론

탠덤형 냉방시스템의 효율적인 제어를 위한 제어알고리즘을 개발한 후 개발된 제어알고리즘의 성능을 평가하기 위해 실험을 실시하였으며 실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 실내온도와 설정온도 차이인 실내온도편차와 실내온도편차변화율을 입력변수로 하고 설정압축기단계증감을 출력으로 하는 퍼지로직을 사용한 압축기 제어알고리즘을 개발하였다.
- 2) 과열도편차와 과열도편차변화율을 입력으로 하고 전자팽창밸브 설정개도변화량을 출력으로 하는 퍼지로직을 사용한 과열도 제어알고리즘을 개발하였다.
- 3) 압축기운전 고압과 저압을 입력으로 하고 전자팽창밸브의 보정개도변화량과 압축기의 보정압축기단계증감을 출력하는 퍼지제어 알고리즘을 사용한 압력 제어알고리즘을 개발하였다.
- 4) 개발된 제어알고리즘을 사용하여 급격한 부하의 변동에도 압축기와 전자팽창밸브의 신속한 제어를 통해 실내온도는 설정온도의 $\pm 1.3^{\circ}\text{C}$ 범위에서, 과열도는 $10.0 \pm 4.0^{\circ}\text{C}$ 사이에서 적절히 안정되게 제어됨이 확인되었다.

따라서 본 연구에서 개발된 압축기 제어알고리즘과 전자팽창밸브 제어알고리즘은 탠덤형 냉방시스템의 제어를 위해 적절히 사용할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Han, D. and Park, K., 2003, Characteristics of a multi-type air-conditioning system on superheat controls at indoor units, Proceedings of the SAREK, pp. 123-129.
2. Park, J. B., Kim, S. Y. and Cho, K. C., 2003, Performance characteristics of a refrigeration system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 13, pp. 187-195.
3. Han, D. and Lee, S., 2003, The EEV control of the multi-type air-conditioning system by using a fuzzy logic superheat temperature setpoint reset algorithm, Korean Journal of the Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 382-388.
4. Han, D. and Pyo, S., 2002, EEV superheat control of a multi-type heat pump by using dither signal, Korean Journal of the Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 11, pp. 948-963.
5. Han, D. and Kwon, H., 2001, Compressor control of a multi-type air conditioning system, Korean Journal of the Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 780-787.
6. Han, D. and Park, K., 2004, The integrated control algorithm for effective operations of a multi-type air-conditioning system, Proceedings of the SAREK, pp. 457-463.
7. Han, D. and Kim, J., 2005, A study on the compressor failure of a tandem-type air conditioning system, Proceedings of the SAREK, pp. 908-913.
8. Passino, K. and Yurkovich, S., 1998, Fuzzy control, Addison-Wesley, pp. 30-109.
9. Korean Standards, 1999, Room air conditioners, KSC9306, Korean Standards Association.