



가변속 냉동사이클의 강인제어를 위한 퍼지로직의 멤버십함수 범위 설계 Design of Membership Ranges for Robust Control of Variable Speed Drive Refrigeration Cycle Based on Fuzzy Logic

정석권†
 Seok-Kwon Jeong†

(Received 08 August 2017, Revision received 27 November 2017, Accepted 20 December 2017)

Abstract: This paper focuses on systematic design about the membership ranges of the main design factors such as control error, control error rate, and sampling time for the fuzzy logic control of the variable speed drive refrigeration cycle. The upper and the lowest limit of the membership ranges are set up from the data of static characteristics obtained by experiments. Three kinds of membership ranges on the control error and the control error rate are tested by experiments. Especially, an effect of sampling time on control performance is also investigated in the same way. Experimental data showed the control error rate and the sampling time strongly effected on the control performance of the refrigeration cycle with a variable speed drive.

Key Words : Variable speed drive (VSD) refrigeration cycle, Fuzzy logic control (FLC), Systematic design

1. 서 론

최근 에너지 절약을 위한 가변속 냉동시스템의 제어가 주목받고 있다. 가변속 냉동사이클의 제어법은 Table 1에서와 같이 크게 제어대상의 수학적 모델 기반형과 모델에 의존하지 않는 AI(Artificial Intelligence) 수법으로 크게 구분된다. 비선형 특성을 갖는 냉동사이클은 제어용 선형 모델 구축이 우선 쉽지 않다.¹⁾ 실험적인 섭동법으로 선형 근사 모델을 구한 경우에도 모델 기반의 PID 제어로는 모델의 불확실성, 외란 등에 대한 강인한 제어가 어렵다.²⁾ 현대제어에 기반한 LQR, LQG 제어법은 MIMO 시스템의 효율적 제어가 용이하고, 에너지와 제어오차를 설계자가 조절 가능한 최적제어가 가능하다. 그러나 선형화 한 상태방정식의 모델링

오차로 인한 제어계의 강인성 확보 문제가 여전히 존재하고, 모델 자체의 시스템렬의 차원이 커 그다지 실용적이지 못하다.

이처럼 비선형성이 큰 시스템의 강인한 제어법으로 퍼지제어(Fuzzy Logic Control; FLC)가 많이 적용되고 있다.³⁻¹¹⁾ 냉동사이클의 퍼지제어 관련 최근 연구로는 비등구간 멤버십 함수를 이용한 온도제어³⁾, 가변속 냉동시스템의 퍼지제어기 설계에 관련된 논문^{1,3,7)} 등이 있다. 하지만 연구들 대부분은 과도 특성 개선이나 정상상태오차를 줄일 수 있는 제어성능 향상에만 초점을 맞추고 있어 퍼지제어기의 주요 설계인자들인 제어오차나 제어오차의 시간변화율 등의 멤버십함수 범위와 제어주기 등을 설계자가 어떻게 체계적으로 설계할 것인지에 대한 정보가 현저히 부족한 실정이다.

† 정석권(교신저자) : 부경대학교 냉동공조공학과
 E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : +82-51-629-6181

† Seok-Kwon Jeong(corresponding author) : Department of Refrigeration and Air Conditioning Engineering, PKNU.
 E-mail : skjeong@pknu.ac.kr, Tel : +82-51-629-6181

Table 1 Control methods for variable speed refrigeration system

	Model based control		AI technique
	PID	LQR, LQG	Fuzzy Logic Control
Benefits	<ul style="list-style-type: none"> • simple control logic • good control performance • low cost control equipment 	<ul style="list-style-type: none"> • suitable for optimum control • suitable for decoupling control • suitable for MIMO system 	<ul style="list-style-type: none"> • independent on system model • suitable for non-linear system • strong robustness against model uncertainty and disturbances
Drawbacks	<ul style="list-style-type: none"> • complicated acquisition for transfer function model • unsuitable for MIMO system • difficulty for robust control • difficulty for decoupling control 	<ul style="list-style-type: none"> • complicated modeling process for building state equation model • needs for decision of many system parameters • complicated control algorithm • high cost control equipment 	<ul style="list-style-type: none"> • difficulty for precision control • long size of control algorithm • insufficiency of information on system dynamic behaviors

저자 등은 이 점에 주목하여 냉동사이클의 퍼지제어기의 주요 설계인자들이 제어성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석한 바 있다.¹⁾ 그러나 이들 결과는 실험으로 제어대상의 동특성을 구한 후, 이 전달함수 근사모델에 근거한 시뮬레이션 결과이므로 실제 실험에서도 동일한 제어 결과가 재현될지에 대한 일반성과 타당성이 확보되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 가변속 냉동사이클의 체계적인 퍼지제어기 설계를 위해 퍼지제어의 주요 설계인자들의 결정 방법과 이들이 제어성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석한다.

우선 퍼지제어의 주요 설계인자인 제어오차 및 제어오차 변화율의 멤버십함수의 상·하한 값 설정 방법을 설명한다. 등 간격을 갖는 멤버십함수 범위와 각 설계인자별 임의로 설정한 두 대조군에 대한 실험 결과를 토대로 이들이 제어성능에 미치는 영향을 상세히 밝힌다. 또한 오차 변화율과 관련 있는 제어주기의 영향 분석과, 이들 실험 결과가 시뮬레이션 결과와도 일치함을 밝힌다.

2. 가변속 냉동사이클의 퍼지제어 설계

2.1 가변속 냉동사이클의 온도제어

Fig. 1은 가변속 냉동사이클의 제어 개념도이다. 주된 제어량은 챔버(chamber) 온도 T_a 이고, 시

스템의 안정적이고 최적 COP 상태 운전을 위해 부수적으로 과열도(superheat) T_s 를 동시에 제어한다. 제어대상은 챔버, 액츄에이터로는 압축기와 전자팽창밸브(EEV), 조작량은 인버터 주파수(Hz)와 EEV 개도(%)이다. 주파수 가변장치로는 $V/f = \text{일정}$ 형식의 인버터, EEV 개도 제어용으로는 스텝밸브컨트롤 드라이버를 각각 사용하였다.

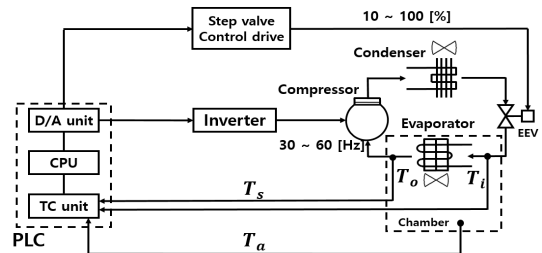


Fig. 1 Control system for a VSRS

과열도 T_s 는 증발기의 입·출구 온도차 $T_o - T_i$ 로부터 구하였다. 각 지령값(SV)의 저장, 현재값(PV)들의 피드백을 통한 제어오차 및 퍼지제어 로직에 의한 최종 조작량 연산을 위해 컨트롤러로 PLC(Programmable Logic Controller)가 사용되었다.

Fig. 2는 멤버십함수의 범위 설정을 위해 Fig. 1의 장치를 이용하여 실험으로 얻은 가변속 냉동사이클의 제어량인 T_a , T_s 의 정특성 그래프이다.

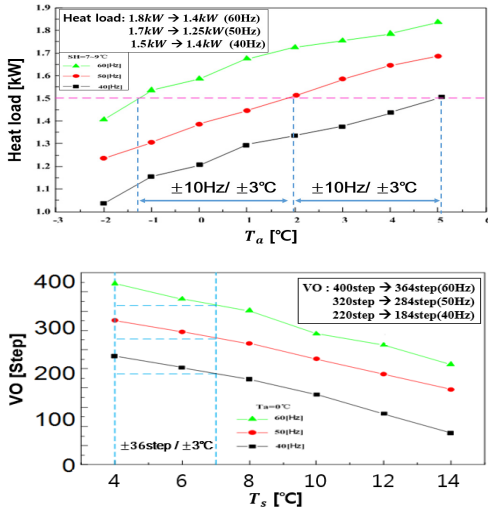


Fig. 2 Statistic characteristic data by experiments

2.2 퍼지제어기의 기본 구성

퍼지제어기는 퍼지화(fuzzification)기, 지식베이스(knowledge base), 퍼지추론(fuzzy inference)부, 비퍼지화(defuzzification)기로 구성된다. 지식베이스는 데이터베이스와 규칙베이스로 구성되며, 규칙베이스는 IF-THEN 형식으로 기술된다.

Table 2 Rule base for compressor control

		<i>ee</i>						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
<i>e</i>	NB	NB	NB	NB	NB	ZO	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO	ZO
	NS	NB	NB	NB	NS	ZO	ZO	ZO
	ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PS	NS	ZO	ZO	PS	PM	PM	PM
	PM	ZO	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	ZO	ZO	PB	PB	PB	PB

Table 3 Rule base for EEV control

		<i>ee</i>						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
<i>e</i>	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO	ZO
	NS	NM	NS	NS	ZO	ZO	ZO	ZO
	ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
	PB	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB

Table 2와 Table 3은 본 논문의 챔버온도와 과열도 제어에 사용된 압축기 및 EEV 제어용 규칙 베이스이다.²⁾ 이들은 SD(Surface Diagram) 분석과 설계자들의 경험에 의해 주로 설계된다. 비퍼지화기는 식 (1)의 무게중심법(Center Of Gravity method; COG)으로 최종 출력값을 연산한다.

$$U^c = \frac{\sum b_i \mu(i)}{\sum \mu(i)} \quad (1)$$

여기서, U^c 는 크리스프(crisp) 값, b_i 는 멤버십함수의 면적 중심값, $\mu(i)$ 는 세로값을 각각 나타낸다.

2.3 퍼지제어기의 주요 설계인자

퍼지제어기의 주요 설계인자로는 두 제어량에 대한 제어오차 $e (= T^* - T)$ 와 그 시간변화율 ee 가 주로 사용된다. 오차 e 와 해당 조작량은 제어대상에 대한 Fig. 2와 같은 정특성 실험을 통해 설계된다.³⁾ 한편, ee 는 $\Delta e / t_s$ 이므로 제어주기(scan time) t_s 도 주요 설계인자에 속한다. ee 의 멤버십 범위는 제어주기 동안 변동할 Δe 를 고려하여 설계한다.

본 연구에서는 제어량인 챔버온도 T_c 와 과열도 T_s 를 제어하기 위한 퍼지제어기가 독립적으로 설계된다. 설계 시에는 입력변수와 출력변수의 멤버십함수의 범위를 위에 언급된 기준에 따라 우선적으로 정한다. 입력변수는 e 와 그 시간변화율 ee , 그리고 출력변수는 T_c 제어 시 인버터 주파수의 변화량 Δf_c , T_s 의 제어 시 EEV 개도 변화량 ΔV_e 이다. 입·출력 변수의 멤버십함수는 ‘ZO’를 기준으로 3개씩 7개의 퍼지수를 갖는 가장 일반적인 형태의 등 구간 연속 삼각형을 사용하였다. 입력변수 e , ee 와 출력변수 Δf_c , ΔV_e 의 상·하한 범위는 제어대상의 정특성 실험을 통한 조작량과 제어량 사이의 관련 데이터로부터 경험적으로 선정할 수 있다.³⁾ 예컨대 Fig. 2에서 10 Hz의 주파수 변동 시 $\pm 3^\circ\text{C}$ 의 온도 변화가 발생하므로 이를 Fig. 3에 반영한다.³⁾

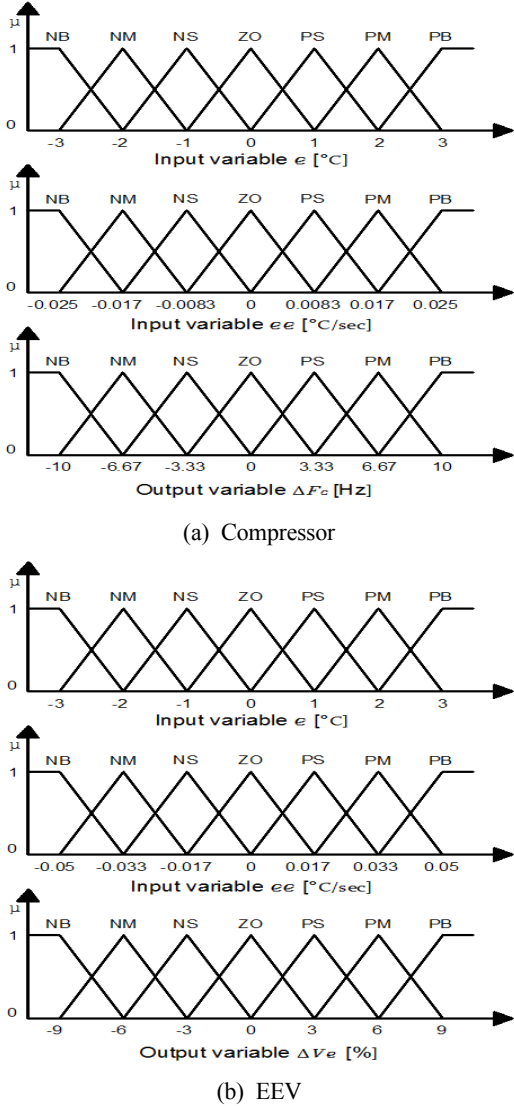


Fig. 3 Membership functions for the FLC

퍼지제어의 출력값은 추론부에서 Fig. 3을 통해 퍼지화된 입력값과 Table 2, Table 3의 규칙베이스를 이용하여 연산된다. 이 추론에는 Mamdani의 최소-최대법을 적용하되 입력 퍼지화기에서는 최소값, 출력 퍼지화기에서는 최대값을 선택한다.

Fig. 4는 T_a 와 T_s 제어를 위한 압축기 및 EEV 제어용 입·출력 멤버십함수이다. 이 멤버십함수들의 범위들은 시뮬레이션 결과와의 비교를 위해 선행 연구에서 얻어진 값을 그대로 이용하였다.¹⁾

3. 실험결과 및 고찰

Table 4는 본 연구에서 상정한 챔버온도 제어시스템의 주요 사양을 나타낸다. Fig. 4와 Fig. 5는 FLC의 설계인자들이 제어성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 소프트웨어와²⁾ 하드웨어의 개략도이다. 챔버온도 T_a 의 설정값은 4°C, 과열도 T_s 의 설정값은 6°C, 초기온도 t_a 값은 28°C로 각각 설정하였다. 냉매는 R-22, 인버터 용량은 1.5 kW였다.

Table 4 Specifications of the test unit

Item	Type/Spec.	Value	Unit
Compressor	Vertical	1.5	kW
Condenser	Fin-tube	4	kW
Evaporator	Fin-tube	0.71	kW
Chamber	1200×700×1650		mm
EEV drive	In/Out	DC 12/1~5	V

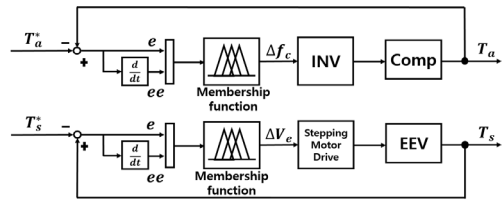


Fig. 4 Control block diagram for experiments

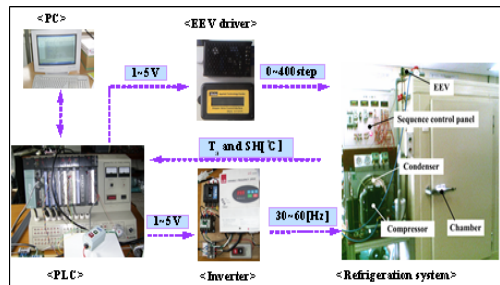


Fig. 5 Experimental system

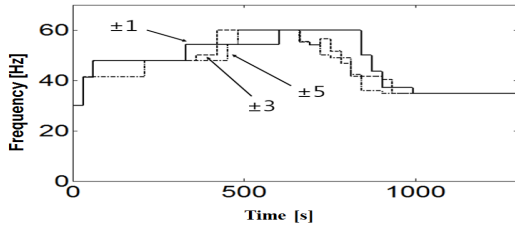
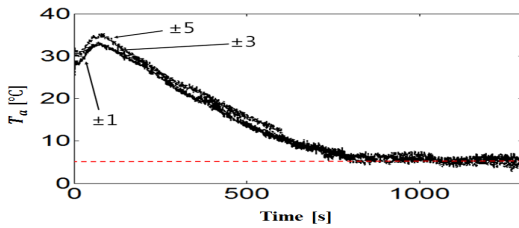
Table 5는 실험에 사용된 설계인자들의 각 값을 나타낸다. 실험에서는 주요 설계인자인 e , ee 와 t_s 가 제어량 T_a , T_s 에 미치는 영향에 대해 분석하였고, 한 인자의 영향 분석 시에는 나머지 두 인자를 표준 조건(standard)의 값으로 고정하였다. t_s 의

경우, 제어량 T_a , T_s 모두 30초인 경우를 표준 조건으로 하고, 각 인자들의 값을 임의로 변경하였다.

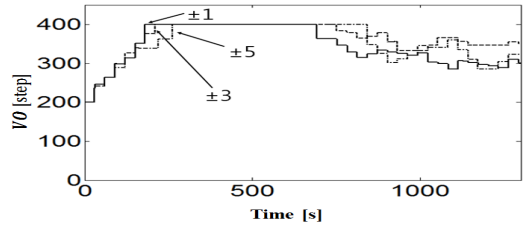
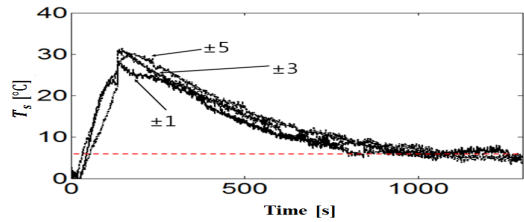
Table 5 Ranges of design factors for experiments

Item	t_s	e	ee	etc.
T_a	10	± 1	± 0.0125	-
	30	± 3	± 0.025	standard
	50	± 5	± 0.0375	-
T_s	10	± 1	± 0.025	-
	30	± 3	± 0.05	standard
	50	± 5	± 0.075	-

Fig. 6은 e 의 범위에 따른 T_a , T_s 의 응답과 조작량의 거동을 각각 나타낸다. T_a , T_s 의 수렴 속도는 멤버십함수 e 의 범위에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그 까닭은 세 가지 경우 모두 초기값과 목표값의 차가 매우 커, 조작량이 순식간에 하한과 상한의 포화값에 도달하기 때문이다. T_a 의 정상응답 부근에서는 e 의 범위가 작을수록 오차에 대한 민감도가 커 조작량은 미세하게 진동하지만 T_s 응답에는 영향이 없음을 알 수 있다.

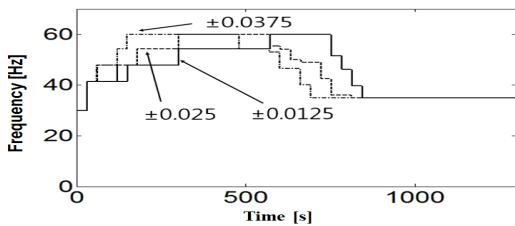
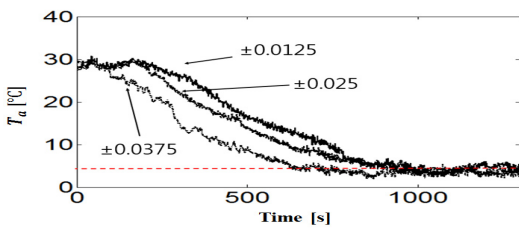


(a) Chamber temperature and its control input

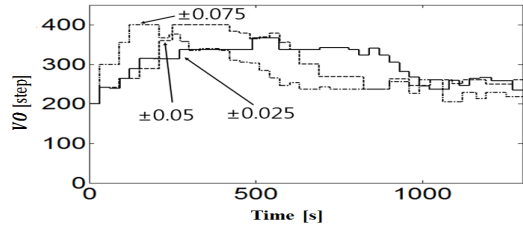
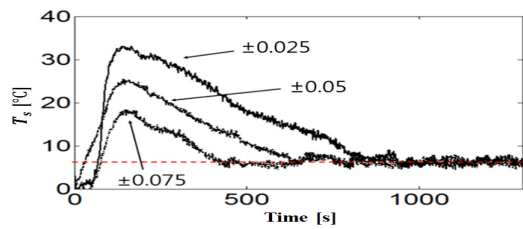


(b) Superheat and its control input

Fig. 6 Effects of e membership range by experimental results

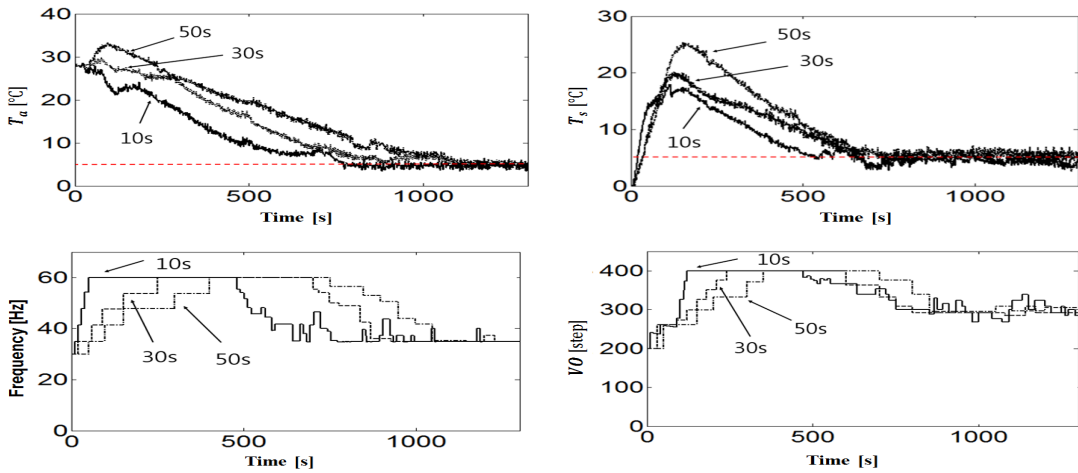


(a) Chamber temperature and its control input



(b) Superheat and its control input

Fig. 7 Effects of ee membership range by experimental results



(a) Chamber temperature and its control input

(b) Superheat and its control input

Fig. 8 Effects of sampling time t_s by experimental results

Fig. 7은 ee 의 범위에 따른 제어량의 응답과 조작량의 거동을 나타낸다. T_a , T_s 의 응답 모두 ee 의 범위가 클수록 목표값에 빠르게 도달함을 알 수 있다. 그 까닭은 ee 의 범위가 클수록 조작량도 비례하여 증가하기 때문이다. T_a , T_s 의 응답에서 미소한 정상상태오차가 발생하는 까닭은 규칙베이스의 설계값과 멤버십함수의 등 구간 설정에 그 원인이 있다. 이 문제는 퍼지수 ZO 부근에서 멤버십함수의 비등구간 적용으로 해결될 수 있다.³⁾

Fig. 8은 제어주기 t_s 를 10초, 30초, 50초로 각각 설정했을 때의 제어량 T_a , T_s 의 응답과 대응하는 조작량을 각각 나타낸다. 제어주기 t_s 가 가장 짧은 10초의 경우가 T_a , T_s 의 응답 모두 목표값에 빨리 도달하였다. 하지만 나머지 두 경우는 유사한 응답 속도를 보였다. 이는 조작량에서 볼 수 있듯이 t_s 가 짧을수록 ee 의 값이 상대적으로 커서 전체 조작량이 매우 큰 값으로 되기 때문이다. 그러나 제어주기가 일정값 이상으로 클 경우에는 ee 의 영향이 거의 무시되어 조작량의 변화가 적게 되므로 제어량의 응답에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 6-8의 실험 결과들은 섭동법으로 얻은 전달함수 모델과 Table 2, Table 3 그리고 Fig. 3의 멤버십함수를 이용한 Matlab 시뮬레이션 결과와 거의 일치하였다.¹⁾ 따라서 이들 실험 결과들은 그 일반성과 타당성이 확인되었다.

4. 결론

본 논문에서는 비선형성이 강한 가변속 냉동사이클의 체계적인 퍼지제어기 설계를 위해 멤버십함수의 범위와 제어주기 등의 주요 설계인자들이 제어성능에 미치는 영향을 실험으로 검토하였다.

우선 멤버십함수의 상·하한 값을 정특성 실험으로 얻은 데이터로부터 설계 가능함을 보였다. 각 멤버십함수의 세부 범위는 등 구간으로 설정한 표준조건과 이 값을 임의로 변동시킨 두 대조군의 실험 결과를 통해 제어성능이 어떻게 변화하는지를 상세히 분석하였다. 실험을 통해 얻은 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1) 제어오차 e 의 범위는 조작량의 빠른 포화로 인해 제어량의 과도응답에 큰 영향을 미치지 않았다. 다만 e 의 범위가 작을수록 오차에 대한 민감도가 커 정상상태 부근에서 조작량의 미소한 진동을 유발하였다. 한편, T_a , T_s 의 정상상태응답에서는 미소한 정상상태오차가 발생하였다. 이는 규칙베이스와 등 구간 멤버십함수의 영향인 것으로 분석되었다.

2) 제어오차의 시간변화율인 ee 의 범위는 그 값이 클수록 조작량의 크기가 커 제어량 T_a , T_s 의 수렴속도가 빠르게 되어 과도특성이 개선되었다.

그러나 정상상태에서는 Δe 가 극히 작은 값이 되므로 응답 특성에는 큰 영향을 미치지 않았다.

3) 제어주기 t_s 는 짧을수록 조작량의 급격한 증가를 유발하므로 제어량 T_m, T_s 의 응답이 목표값에 빨리 도달한다. 하지만, 일정 값 이상의 큰 제어주기들은 유의미한 응답 차이를 발생시키지 않았다. 또한 정상상태응답에도 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 제어주기는 CPU의 속도와 프로그램의 길이에 의존한다. 빠른 CPU는 고속 응답이 가능하지만 제어장치의 가격 상승을 유발한다. 따라서 원하는 제어정도와 가격경쟁력을 고려한 CPU 결정 및 간결한 제어로직 구성이 요구된다.

4) 실험 결과는 선행 연구를 통해 확보한 시뮬레이션 결과와 매우 일치된 경향을 보였다. 이로 부터 본 논문에서 다룬 퍼지제어기 설계인자들의 영향 분석이 타당함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 부경대학교 학술지원비 CD-2016-0424의 지원으로 연구되었음.

References

1. S. W. Choi, S. K. Jeong and J. H. Yang, 2016, Analysis of Design Factors for High Performance Fuzzy Logic Control of Refrigeration Cycle, Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 6, pp. 11-19.
2. S. W. Choi, 2017, "Design of Rule Base and Analysis on Effect of Membership Function Range for High Performance Fuzzy Logic Control of Refrigeration Cycle", MS thesis, Pukyong National University, Busan Korea.
3. J. P. Cao, S. K. Jeong and Y. M. Jeong, 2014, "Fuzzy Logic Controller Design with Unevenly-distributed Membership Function for High Performance Chamber Cooling System", Journal of Central South University of Technology, Vol. 21, pp. 2684-2692.

4. J. H. Kim, W. Y. Kim, J. K. Kang, I. S. Jang and J. S. Kim, 1997, "Fuzzy Control of Superheat and Evaporating Temperature of Evaporator in Refrigeration and Air Conditioning System", International Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 5, pp. 185-194.
5. S. D. Dhamakale and S. B. Patil, 2011, "Fuzzy Logic Approach with Micro Controller for Climate Controlling in Green House", International Journal on Emerging Technologies, Vol. 2, No. 1, pp. 17-19.
6. J. Lu and Y. Hu, 2006, "A Histogram Modification Approach for Analysis of Membership Function Relocation in Fuzzy Logic Control", Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 10, No. 6, pp. 913-920.
7. Li, H. and Jeong, S. K., 2007, "Design and Analysis of Fuzzy Control in a Variable Speed Refrigeration System", International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol. 15, No. 2, pp. 61-69.
8. D. Y. Han and K. J. Park, 2006, "Fuzzy Control Algorithm for the Compressor and the Electronic Expansion Valve for a Multi-type Air Conditioning System Using Multiple Input Variables", Journal of the SAREK, Vol. 18, No. 2, pp. 163-171.
9. C. Apreaa, R. Mastrullo and C. Rennoa, 2004, "Fuzzy Control of the Compressor Speed in a Refrigeration Plant", International Journal of Refrigeration, Vol. 27, pp. 639-648.
10. H. Zhuang and X. Wu, 2001, "Membership Function Modification of Fuzzy Logic Controllers with Histogram Equalization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol. 31, No. 1, pp. 125-132.
11. B. S. Butkiewicz, 1998, "Steady-State Error of a System with Fuzzy Controller", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol. 28, No. 6, pp. 855-860.